

Anfängerpraktikum V503

Der Millikan-Öltröpfchenversuch

Helena Nawrath
helena.nawrath@tu-dortmund.de

Carl Arne Thomann
arnethomann@me.com

Durchführung: 28. April 2015

Abgabe: 05. Mai 2015

TU Dortmund – Fakultät Physik

Ziel

Es werden die Elementarladung e und die AVOGADRO-Konstante N_A ermittelt.

1 Theorie

Bewegt sich ein Öltröpfchen im luftgefüllten Raum, so erfährt es als treibende Kräfte Auftrieb und Gravitation. Weiterhin wird aufgrund laminarer Luftreibung nach STOKES eine Grenzgeschwindigkeit v_0 erreicht. Bei Erreichen dieser Geschwindigkeit stellt sich ein Kräftegleichgewicht ein, die Geschwindigkeit v_0 ist daher konstant. Die Bewegungsgleichung für einen solchen Tropfen ist mit

$$\frac{4\pi}{3}r^3(\rho_{\text{Öl}} - \rho_{\text{Luft}})g = 6\pi\eta_{\text{Luft}}v_0 \quad (1)$$

gegeben, wobei ρ die Dichte, η die Viskosität und r der Tröpfchenradius ist. Für den Tröpfchenradius r gilt damit sofort

$$r = \sqrt{\frac{9\eta_{\text{Luft}}v_0}{g(\rho_{\text{Öl}} - \rho_{\text{Luft}})}}. \quad (2)$$

Befindet sich auf dem Tröpfchen, etwa ausgehend von triboelektrischen Effekten bei der Zerstäubung, eine Ladung, so reagiert es auf anwesende elektrische Felder. Im Folgenden wird ein homogenes elektrisches Feld E angenommen, das in oder gegen Fallrichtung des unbeeinflussten Tröpfchens ausgerichtet ist. Bei bekanntem elektrischen Feld E muss in der Gleichung 1 die zusätzlich auftretende Kraft berücksichtigt werden. Es gilt hierfür im Allgemeinen

$$\frac{4\pi}{3}r^3(\rho_{\text{Öl}} - \rho_{\text{Luft}})g - 6\pi\eta_{\text{Luft}}v_0 = F_{\text{el}}. \quad (3)$$

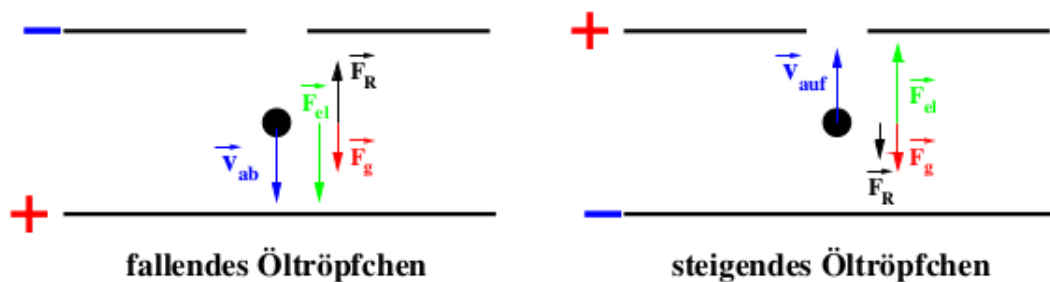


Abbildung 1: Kräfte wirken auf ein geladenes Tröpfchen, welches sich im Plattenkondensator befindet.[1]

Je nach Ausrichtung des Feldes E ist die Bewegung des Tröpfchen in oder gegen Fallrichtung, wie in Abbildung 1 dargestellt.. Hieraus folgen für beide Fälle die Bewegungsgleichungen

$$\frac{4\pi}{3}r^3(\rho_{\text{Öl}} - \rho_{\text{Luft}})g - 6\pi\eta_{\text{Luft}}v_{\text{ab}} = -qE, \quad (4)$$

$$\frac{4\pi}{3}r^3(\rho_{\text{Öl}} + \rho_{\text{Luft}})g + 6\pi\eta_{\text{Luft}}v_{\text{auf}} = qE. \quad (5)$$

Mit Hilfe der Geschwindigkeiten kann eine Aussage getroffen werden, welcher Radius r das gemessene Tröpfchen aufweist und welche Ladung q es trägt. Es gelten

$$r = \sqrt{\frac{9\eta_{\text{Luft}}(v_{\text{ab}} - v_{\text{auf}})}{2g(\rho_{\text{Öl}} - \rho_{\text{Luft}})}} \quad (6)$$

und

$$q = 3\pi\eta_{\text{L}}\sqrt{\frac{9\eta_{\text{Luft}}(v_{\text{ab}} - v_{\text{auf}})}{4g(\rho_{\text{Öl}} - \rho_{\text{Luft}})}}\frac{(v_{\text{ab}} + v_{\text{auf}})}{E}. \quad (7)$$

Durch das Zerstäuben der Öltröpfchen ist deren Durchmesser so gering, dass er sich in ähnlichen Größenordnungen bewegt wie die mittlere freie Weglänge der Moleküle in Luft. Die STOKESSche Reibung F_{η} wird hier ungenau und muss durch eine Korrektur behoben werden. Die Viskosität in den Gleichungen (6) und (7) wird angepasst. Es gilt für die Viskosität in oben beschriebenen Gleichungen

$$\eta = \eta_{\text{Luft}}\left(\frac{1}{1 + B^{1/pr}}\right) \quad (8)$$

mit dem CUNNINGHAM-Korrekturterm $B = 6.17 \cdot 10^{-3} \text{ Torr} \cdot \text{cm}$ [1].

Für die AVOGADRO-Konstante mit $F = 96\,485,34 \text{ C/mol}$ [4] gilt

$$F = N_{\text{A}} \cdot e, \quad (9)$$

sodass diese in der Auswertung bestimmt werden kann, wenn F als gegeben vorausgesetzt und e berechnet wird.

2 Durchführung

In einem ungeladenen, vertikal ausgerichteten Plattenkondensator wird Öl fein zerstäubt. Zur Beobachtung der Tröpfchen dient eine Kamera, die mit ausreichender Vergrößerung die Tröpfchen innerhalb des Kondensator sichtbar macht. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Es wird die Zeit t gemessen, die ein ausgewähltes Tröpfchen zum Überstreichen einer abgemessenen Strecke s benötigt, und dadurch die Geschwindigkeit v bestimmt. Ein Teilchen ist als messbar zu betrachten wenn die Horizontalbewegung minimal ist, sich die vertikale Grenzgeschwindigkeit v_0 ohne Einfluss des

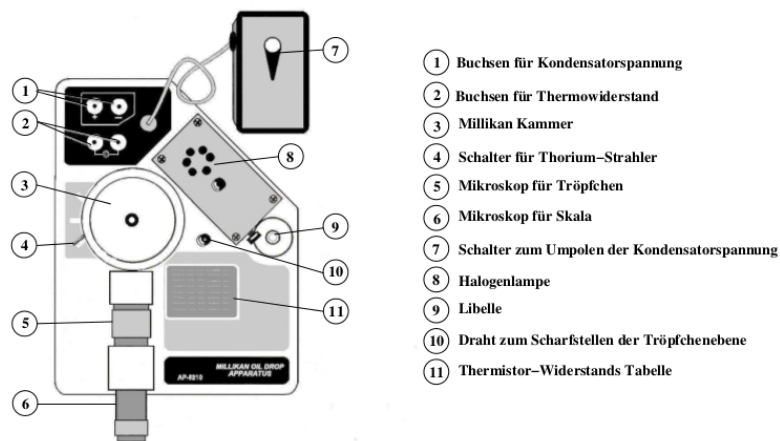


Abbildung 2: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Elementarladung.[1]

elektrischen Feldes in der Größenordnung von $v_0 = 0,01 \text{ cm/s}$ bewegt. Wichtig ist, dass das Tröpfchen bei der Zerstäubung eine Ladung aufgenommen hat, sodass es auf das elektrische Feld des Plattenkondensators reagiert. Die Horizontalbewegung kann durch Justieren der Apparatur gering gehalten werden.

Ist ein messbares Teilchen vorhanden, so wird t_0 gemessen um die unbeeinflusste Grenzgeschwindigkeit v_0 zu berechnen. Anschließend wird bei festgelegter Plattenspannung U die Steig- t_{auf} und die Sinkzeit t_{ab} unter Einfluss des elektrischen Feldes E gemessen. Die Messung bei eingeschaltetem Kondensator wird an demselben Tröpfchen mit gleicher Spannung solange wiederholt, bis für jedes Teilchen die Zeiten t_{ab} und t_{auf} jeweils drei Mal notiert sind. Dieses Verfahren wird für vier weitere Tröpfchen unter gleichen Bedingungen wiederholt, sodass für eine angelegte Kondensatorspannung U fünf Messwert-Datensätze von je einem Tröpfchen zur Auswertung bereitstehen.

Die Kondensatorspannung U ist zwischen 200 V und 300 V zu wählen. Das Verfahren wird für insgesamt 5 Spannungen durchgeführt.

Da die Viskosität der Luft von der Temperatur abhängig ist und linear mit ihr ansteigt, wird während der Messung die Temperatur in dem Plattenkondensator notiert. Sie wird bestimmt über einen Thermistorwiderstand, welcher über eine Tabelle den zugehörigen Temperaturen zugeordnet werden kann. Eine Temperaturänderung kann vor allem durch die verwendete Halogenlampe hervorgerufen werden, welche die Tröpfchen anstrahlt um sie für die Kamera sichtbar zu machen.

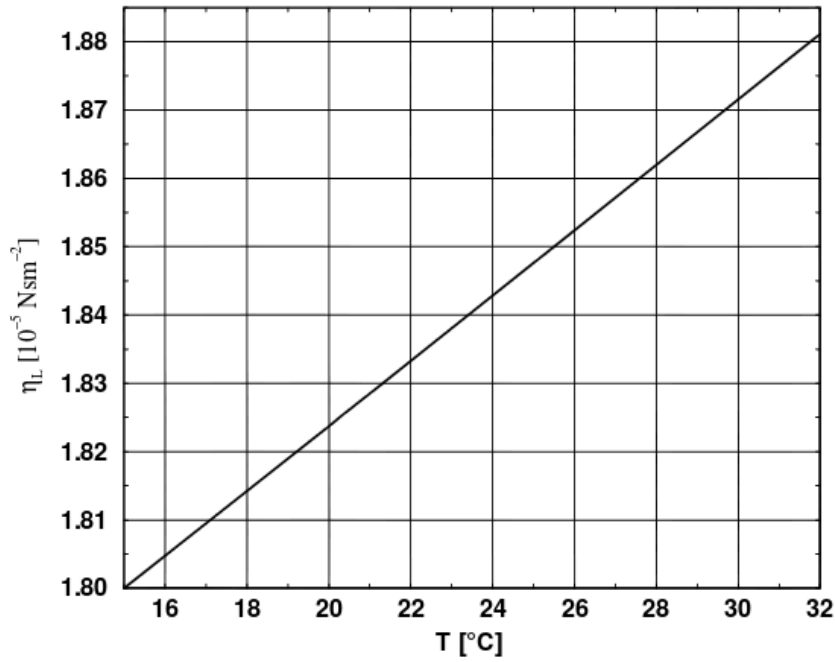


Abbildung 3: Viskosität der Luft in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. [1]

3 Auswertung

Alle in der Auswertung benutzten Mittelwerte werden über die Gleichung

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (10)$$

bestimmt. Die Standardabweichung der Mittelwerte ergibt sich zu

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{x})^2}. \quad (11)$$

Wird eine Größe bestimmt, welche sich aus fehlerbehafteten Daten zusammensetzt, ergibt sich der absolute Fehler über die GAUSSschen Fehlerfortpflanzung

$$\Delta f(x_1, \dots, x_n) = \sqrt{\left(\frac{df}{dx_1} \Delta x_1\right)^2 + \dots + \left(\frac{df}{dx_n} \Delta x_n\right)^2}. \quad (12)$$

Zur Berechnung aller Größen werden die nicht gerundeten Größen benutzt um Rundungsfehler zu vermeiden. Am Ende der Auswertung aller Größen werden diese auf die erste signifikante Stelle des Fehlers gerundet.

In den gemessenen Zeiten t_{auf} , t_{ab} und t_0 überwinden die Öltropfen eine Strecke von $s = 0,5 \text{ mm}$. Aufgetragen sind die Messwerte in den Tabellen 1 bis 5. Die Temperatur innerhalb der Ölkammer ändert sich im Laufe des Versuches nur sehr geringfügig.

In Tabelle 6 sind die berechneten Fallgeschwindigkeiten und deren Fehler aufgelistet. Es gehen nur die Tröpfchen in die folgende Auswertung ein, welche die Gleichung

$$2v_0 \approx v_{\text{ab}} - v_{\text{auf}} \quad (13)$$

erfüllen. Ist dies nicht der Fall, so haben die Tröpfchen während der Messung ihre Ladung geändert. Dadurch sind sie zur Bestimmung der Elementarladung e unbrauchbar. Nach (6) und (7) werden Radien r und Ladungen q der Tröpfchen mit absolutem Fehler bestimmt. Gemäß der Geradengleichung

$$\eta_{\text{Luft}} = 47,0580 \cdot 10^{-19} \frac{\text{Ns}}{\text{Km}^2} \cdot T + 4,4433 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \quad (14)$$

wird η_{Luft} ermittelt. Der lineare Zusammenhang zwischen Temperatur und Viskosität ist dargestellt in Abbildung 3.

Tröpfchen	$t_{\text{auf}} / \text{s}$	t_{ab} / s
1	46,72	13,76
	45,20	15,41
	42,66	13,66
2	4,32	3,52
	8,60	7,09
	8,78	4,06
3	6,83	5,16
	7,15	5,56
	7,00	5,69
4	12,53	7,95
	13,75	7,53
	12,16	7,29
5	31,50	13,83
	28,87	11,64
	22,32	10,89

Tabelle 1: $U = 200 \text{ V}, T = 300,15 \text{ K}$.

Tröpfchen	$t_{\text{auf}} / \text{s}$	t_{ab} / s
6	12,18	8,26
	13,84	9,01
	12,43	8,63
7	9,69	6,16
	7,29	6,41
	7,72	6,73
8	9,09	7,56
	9,32	8,26
	9,20	8,23
9	8,76	6,36
	9,09	5,52
	8,33	6,00
10	11,81	9,29
	12,03	7,00
	11,72	8,75

Tabelle 2: $U = 225 \text{ V}, T = 301,15 \text{ K}$.

Tröpfchen	$t_{\text{auf}} / \text{s}$	t_{ab} / s
11	9,36	9,07
	9,66	6,20
	9,52	7,20
12	12,52	9,26
	11,84	9,10
	12,13	9,30
13	6,06	5,64
	7,28	5,60
	6,90	5,83
14	36,47	12,03
	36,76	14,33
	36,60	16,72
15	12,96	9,03
	13,32	7,32
	14,61	8,91

Tabelle 3: $U = 250 \text{ V}, T = 301,15 \text{ K}$.

Tröpfchen	$t_{\text{auf}} / \text{s}$	t_{ab} / s
16	12,30	11,10
	14,90	10,86
	13,49	10,33
17	8,30	5,90
	8,41	6,12
	8,58	5,96
18	12,35	7,30
	11,76	6,87
	12,00	9,63
19	17,62	13,66
	13,18	10,66
	16,84	13,07
20	1,90	1,60
	2,10	1,55
	2,24	2,07

Tabelle 4: $U = 275 \text{ V}, T = 301,15 \text{ K}$.

Tröpfchen	$t_{\text{auf}} / \text{s}$	t_{ab} / s
21	7,00	6,03
	7,14	6,31
	7,45	5,89
22	9,66	4,09
	8,26	4,46
	8,73	4,14
23	4,30	3,83
	4,45	4,75
	4,56	4,33
24	10,73	4,98
	6,51	6,31
	7,15	5,03
25	9,25	5,01
	8,36	3,97
	8,78	4,14

Tabelle 5: $U = 300 \text{ V}$, $T = 301,15 \text{ K}$.

Tröpfchen	U/V	$v_{\text{auf}} / \frac{\text{mm}}{\text{s}}$	$\Delta v_{\text{auf}} / \frac{\text{mm}}{\text{s}}$	$v_{\text{ab}} / \frac{\text{mm}}{\text{s}}$	$\Delta v_{\text{ab}} / \frac{\text{mm}}{\text{s}}$	$v_0 / \frac{\text{mm}}{\text{s}}$
1	200	0,0111	0,0003	0,035	0,001	0,013
2	200	0,07	0,02	0,11	0,02	0,009
3	200	0,0715	0,001	0,091	0,003	0,009
4	200	0,039	0,001	0,065	0,002	0,014
5	200	0,018	0,002	0,041	0,003	0,010
6	225	0,0394	0,002	0,057	0,001	0,008
7	225	0,061	0,005	0,077	0,002	0,009
8	225	0,0543	0,0004	0,062	0,002	0,007
9	225	0,0573	0,001	0,084	0,003	0,008
10	225	0,0421	0,0003	0,060	0,005	0,008
11	250	0,0525	0,0005	0,068	0,007	0,008
12	250	0,0411	0,0007	0,0542	0,0004	0,008
13	250	0,074	0,004	0,087	0,001	0,010
14	250	0,013 655	0,000 03	0,035	0,003	0,010
15	250	0,036	0,001	0,059	0,004	0,008
16	275	0,037	0,002	0,046	0,001	0,010
17	275	0,0593	0,0006	0,0834	0,0009	0,023
18	275	0,0415	0,0006	0,064	0,006	0,010
19	275	0,032	0,003	0,040	0,003	0,008
20	275	0,24	0,01	0,29	0,03	0,014
21	300	0,069	0,001	0,082	0,002	0,010
22	300	0,056	0,003	0,118	0,003	0,012
23	300	0,112	0,002	0,117	0,007	0,011
24	300	0,064	0,009	0,093	0,007	0,009
25	300	0,056	0,002	0,115	0,008	0,010

Tabelle 6: Berechnete Geschwindigkeiten der einzelnen Tröpfchen bei verschiedenen Spannungen U_i .

Tröpfchen	$\eta_{\text{Luft}} / 10^{-5} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$	$r / 10^{-7} \text{m}$	$q / 10^{-19} \text{C}$	$\eta_C / 10^{-5} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$	$q_C / 10^{-19} \text{C}$	$q_C / \%$
1	1,8568	4,8±0,1	1,0 ±0,1	1,584±0,007	1,3 ±0,2	15,4
2	1,8568	6 ±2	5 ±5	1,63 ±0,08	6 ±6	100,0
3	1,8568	4,4±0,3	3,4 ±0,6	1,56 ±0,02	4,4 ±0,8	18,2
4	1,8568	5,1±0,2	2,5 ±0,2	1,597±0,009	3,2 ±0,3	9,4
5	1,8568	4,7±0,4	1,3 ±0,3	1,58 ±0,02	1,7 ±0,4	23,5
6	1,8615	4,3±0,2	1,7 ±0,2	1,56 ±0,01	2,3 ±0,3	13,0
7	1,8615	3,9±0,7	2,3 ±0,7	1,54 ±0,05	3,1 ±0,9	29,0
8	1,8615	2,8±0,3	1,4 ±0,4	1,44 ±0,04	2,0 ±0,5	25,0
9	1,8615	5,1±0,4	3,0 ±0,6	1,69 ±0,02	3,8 ±0,7	18,4
10	1,8615	4,2±0,6	1,8 ±0,7	1,56 ±0,04	2 ±1	50,0
11	1,8615	3,9±0,9	2 ±1	1,54 ±0,06	2 ±1	50,0
12	1,8615	3,6±0,1	1,28±0,07	1,510±0,008	1,76±0,09	5,1
13	1,8615	3,6±0,6	2,2 ±0,6	1,51 ±0,05	3,0 ±0,8	26,7
14	1,8615	4,6±0,4	0,9 ±0,2	1,58 ±0,02	1,1 ±0,3	27,3
15	1,8615	4,7±0,4	1,7 ±0,5	1,58 ±0,02	2,2 ±0,6	27,8
16	1,8615	3,0±0,4	0,9 ±0,2	1,46 ±0,04	1,2 ±0,3	25,0
17	1,8615	4,8±0,1	2,4 ±0,1	1,589±0,005	3,0 ±0,2	6,7
18	1,8615	4,7±0,7	1,7 ±0,7	1,58 ±0,03	2,2 ±0,9	40,9
19	1,8615	2,9±0,7	0,7 ±0,4	1,45 ±0,08	1,0 ±0,6	60,0
20	1,8615	7 ±2	12 ±8	1,66 ±0,05	15 ±10	66,7
21	1,8615	3,5±0,3	1,7 ±0,3	1,51 ±0,02	2,3 ±0,4	17,4
22	1,8615	7,7±0,3	4,3 ±0,4	1,682±0,005	5,0 ±0,4	8,0
23	1,8615	2,0±2,0	1 ±3	1,3 ±0,3	2 ±5	250,0
24	1,8615	5 ±1	3 ±1	1,61 ±0,04	3 ±1	33,3
25	1,8615	7,5±0,5	4,1 ±0,9	1,68 ±0,01	5 ±1	20,0

Tabelle 7: Ergebnisse der Berechnung zur Bestimmung der Ladung eines Öltröpfchens.

Die CUNNINGHAM-Korrektur der Viskosität nach Gleichung (8) fließt in die Berechnung der Ladung mit ein, deswegen wird erneut die Ladung q_C und Fehler dieser mit Korrekturfaktor bestimmt. Messbedingt treten teilweise sehr große Fehler auf, wie in Tabelle 7 zu sehen ist. Deswegen werden alle Werte mit einem relativen Fehler größer als 20% aus der Rechnung herausgenommen. Nun wird die berechnete Ladung der Tröpfchen in

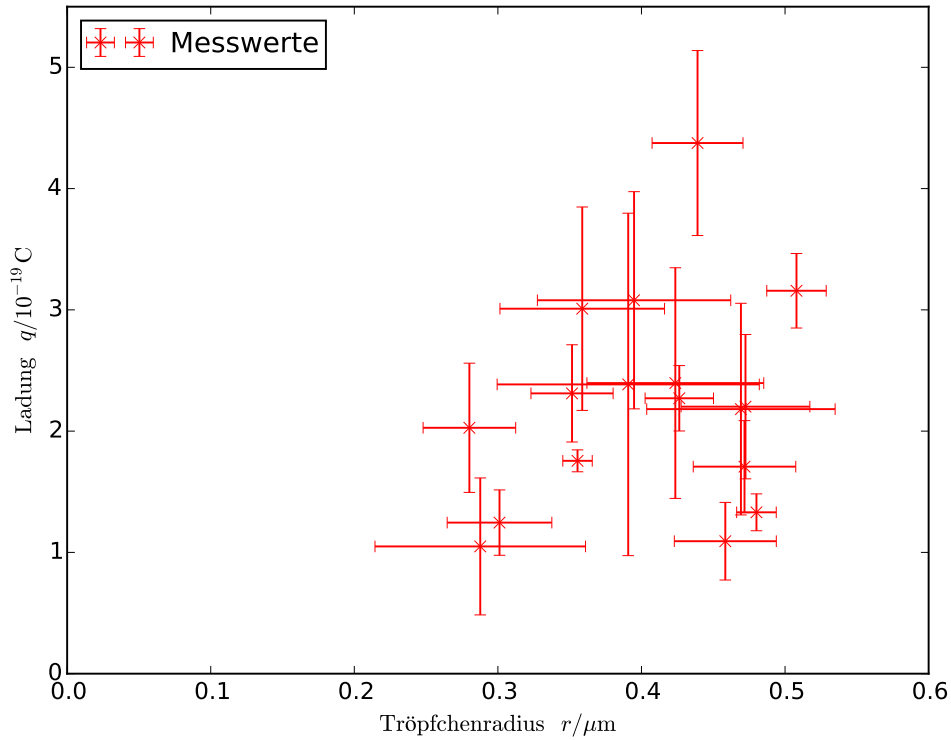


Abbildung 4: Ladungen q der Tröpfchen aufgetragen gegen den Radius r .

Abbildung 4 gegen ihren Radius aufgetragen. Tropfen mit größerem Radius tragen prinzipiell mehr Ladung als Tröpfchen mit kleinem. Untersucht werden hauptsächlich Tröpfchen mit geringem Radius und wenig Ladung, welches eine langsamere Geschwindigkeit hervorruft. Gemäß der Annahme, dass Ladung quantisiert ist, müssen die Öltröpfchen immer genau die Elementarladung oder ein Vielfaches derer tragen. Zur Bestimmung der Elementarladung muss der größte gemeinsame Teiler der berechneten Ladungen gefunden werden. Da die Größen fehlerbehaftet sind wird ein Algorithmus zur Auswertung herangezogen. Der gesuchte Wert für e wird vom Computer zu e' "erraten", falls ein in frage kommender eingegrenzter Bereich vorgegeben wird. Dies setzt voraus, dass die ungefähre Größenordnung der Elementarladung bekannt ist. Ausgewählt wird der Bereich zwischen $1,0 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ und $1,8 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Es wird berechnet, um welchen Wert die gemessenen Ladungen von der "geratenen" Ladung bzw. deren Vielfachen abweichen. Die

Abweichungen aller nach CUNNINGHAM korrigierten Ladungen q_C werden aufsummiert. Anschließend wird der Mittelwert gebildet. Daraus kann für jede geratene Ladung eine mittlere Abweichung der Messwerte bestimmt werden. Ist diese Abweichung minimal ist die Elementarladung gefunden. Die mittlere relative Abweichung des Ladungsvielfachen von der geratenen Ladung ist

$$\tilde{\Delta}q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{q_i \left(\frac{q_i}{e'} \right)^{-1}}{e'} \right). \quad (15)$$

In Abbildung 5 wird der mittlere relative Fehler aller Ladungen gegen diese aufgetragen.

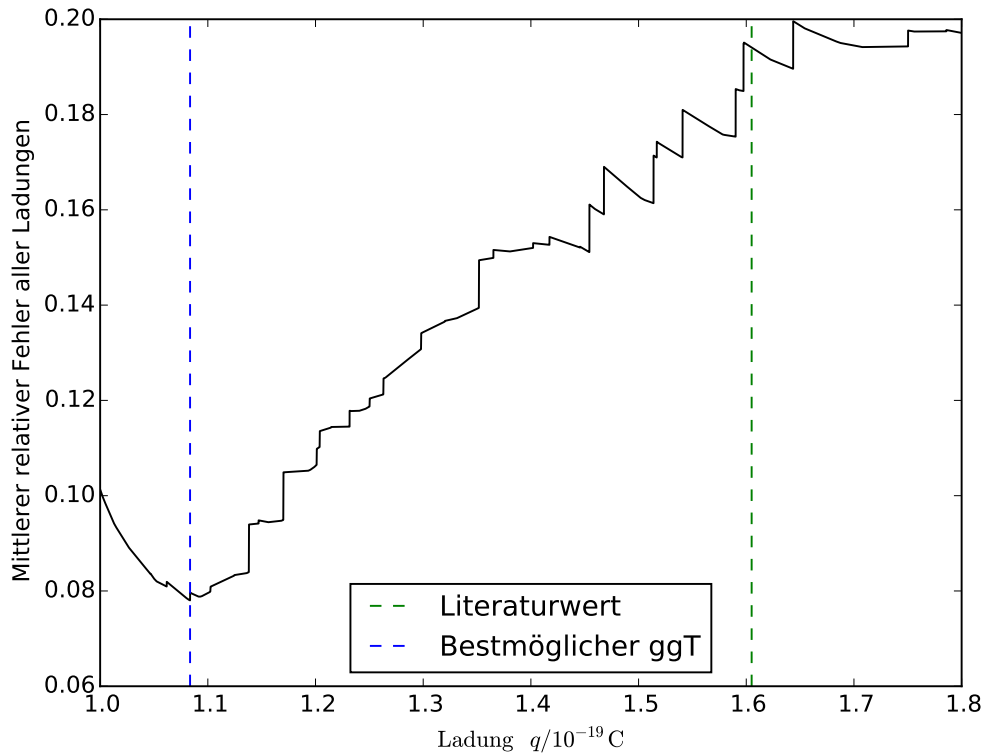


Abbildung 5: Bestimmung des größten gemeinsamen Teilers.

Der kleinste gemeinsame Teiler bei $e = 1,084 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ entspricht der Elementarladung. Diese weicht stark vom ebenfalls eingezeichneten Literaturwert [3] ab.

3.1 Bestimmung der Avogadro-Konstante

Die AVOGADRO-Konstante wird bestimmt über die vorherig berechnete Elementarladung e und die als gegeben vorausgesetzte FARADAY-Konstante. Sie beschreibt nach Gleichung

(9) die Ladung eines Mols einfach geladener Ionen. Wird F durch die Ladung geteilt ergibt sich die Anzahl der Teilchen in einem Mol zu $N_A = \frac{F}{e_0} = 8,905 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$. Dieser Wert weicht, bedingt durch die starke Abweichung der Elementarladung, relativ stark vom Literaturwert [2] mit $\tilde{N}_A = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$ ab.

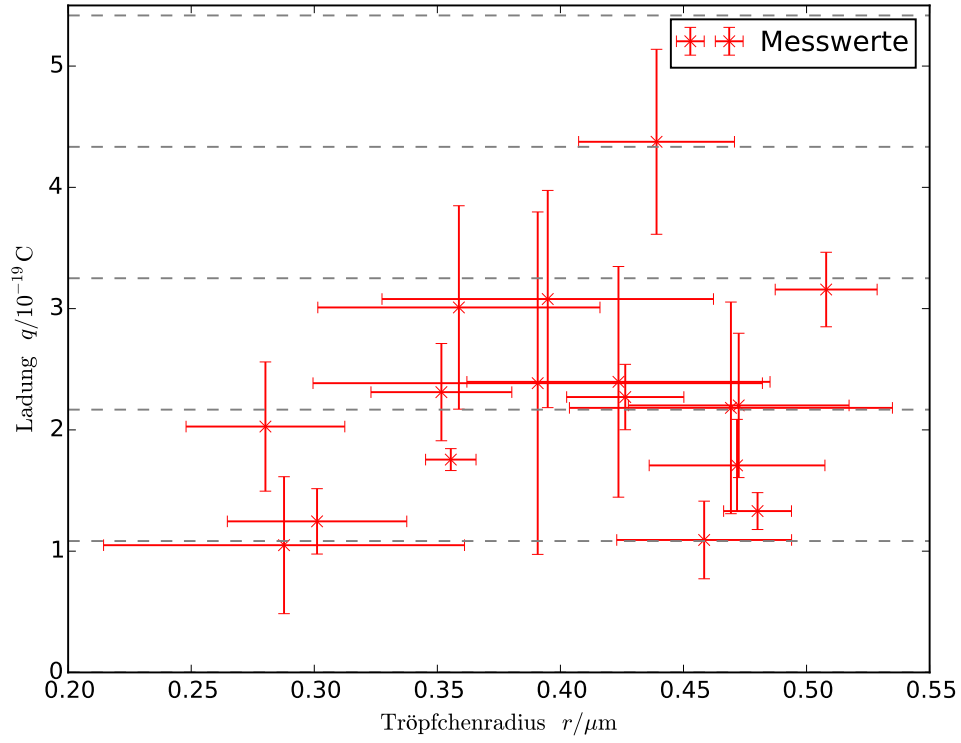


Abbildung 6: Abhängigkeit von Ladung q und Radius r der Tröpfchen mit eingezeichneten Vielfachen der berechneten Elementarladung.

4 Diskussion

4.1 Fehleranalyse

Mithilfe der Kontrolle, gegeben durch Gleichung (13), werden 17 Werte ausgewählt. Die restlichen 8 Tröpfchen sind wegen starker Abweichung von der Erwartung nicht berücksichtigt worden. Im Verlauf des Experiments sind Öltröpfchen beobachtet worden, die trotz sorgfältiger Zerstäubung keine Reaktion auf elektrische Felder zeigten. Daraus kann geschlossen werden, dass einige Tröpfchen ihre Ladung verloren haben. Für weitere Versuchsdurchführung nach diesem Aufbau ist darauf zu achten, dass die Ladung nicht abgegeben werden kann. Mögliche Ursache für die Ladungsabgabe sind eine zu hohe Tröpfchendichte, im Weiteren kann in einem separaten Versuch der Einfluss untersucht werden, den der Ladungszustand des Plattenkondensators im Moment der Einspritzung auf die Ladungsabgabe hat. Besondere Fehleranfälligkeit besitzt im Weiteren die Zeitmessung. Durch Reaktionszeit oder menschliches Versagen werden falsche Zeiten aufgenommen. Andere Gründe sind eine fehlerhafte Kondensatorspannung oder korrodierte Kontakte des Kondensators.

Es wurden vorwiegend Tröpfchen einer Größe für die Auswertung benützt. Mit großer Variation in der Tröpfchen-Größe kann der Fehler gering gehalten werden, da eventuelle systematische Fehler, die von der Größe abhängig sind, erkannt und ausgeschlossen werden könnten.

Wegen der hohen Ausscheiderate und geringer Disparität der Teilchen ist mit hoher statistischer Unsicherheit der Ergebnissen zu rechnen. Auffällig sind die geringen berechneten Ladungen in Tabelle 7, welche zum großen Teil weit unterhalb des Literaturwertes der Elementarladung liegen. Dies deutet eindeutig auf systematische Fehler hin, der sich durch die gesamte Messung ziehen.

4.2 Vergleich mit der Literatur

Die berechnete Elementarladung e weicht um 32,3% vom Literaturwert ab, die AVOGADRO-Konstante um 47,9%. Es werden Tropfen aussortiert, deren relativer Fehler von q_C größer als 20% ist. Für die tatsächliche Berechnung von e können nur wenige Daten verwendet werden, deren Fehler sich auf e und N_A auswirken. Um genauere Ergebnisse zu erhalten müsste ein großer Satz an Daten aufgenommen werden. Des Weiteren wäre ein besseres Ergebnis zu erzielen, wenn vor der Auswertung alle Tröpfchen, deren berechnete Ladung kleiner als die wirkliche Elementarladung ist, ebenfalls aussortiert werden.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch V503: Der Millikan-Öltröpfchenversuch*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V503.pdf> (besucht am 20.04.2015).
- [2] NIST: National Institute of Standards und Technology. *A: Avogadro's constant*. URL: http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?na%7Csearch_for=avogadro (besucht am 03.05.2015).
- [3] NIST: National Institute of Standards und Technology. *e: elementary charge*. URL: <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e> (besucht am 03.05.2015).
- [4] NIST: National Institute of Standards und Technology. *F: Faraday's constant*. URL: http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?f%7Csearch_for=faraday (besucht am 03.05.2015).