

CL9204 (EU2204) Millikan-Gerät
CL9206 (EU2206) Millikan-Netzgerät

1. Technische Daten

1.1. Millikan-Gerät CL9204

Millikan-Kammer: 8,0 cm Ø
 Abstand der Kondensatorplatten: 0,6 cm
 Mikroskop mit Okularmikrometer
 Objektvergrößerung: 2fach
 Okularvergrößerung: 10fach
 Beleuchtungseinrichtung mit
 Glühlampe: 6 V; 2,5 A; E10
 Abmessungen: 32 cm x 37 cm x 32 cm
 Gewicht: 4,7 kg

1.2. Netzgerät CL9206

Entnehmbare Spannungen:
 für Plattenkondensator: 0...600 V
 für Beleuchtung: 6 V, 2,5A
 Drehspulinstrument zur Messung der Kondensatorspannung
 Meßbereich: 600 V -
 Güteklasse: 2,5
 Skalenteilung: 10 V
 Skalenlänge: ca. 8,6 cm
 Netzanschlußspannungen: 110, 130, 220, 240 V
 50-60 Hz
 Sicherung: M 0,315 B
 Abmessungen: 23 x 16 x 10 cm
 Gewicht: 1,5 kg

2. Beschreibung

2.1. Millikangerät (Fig. 1)

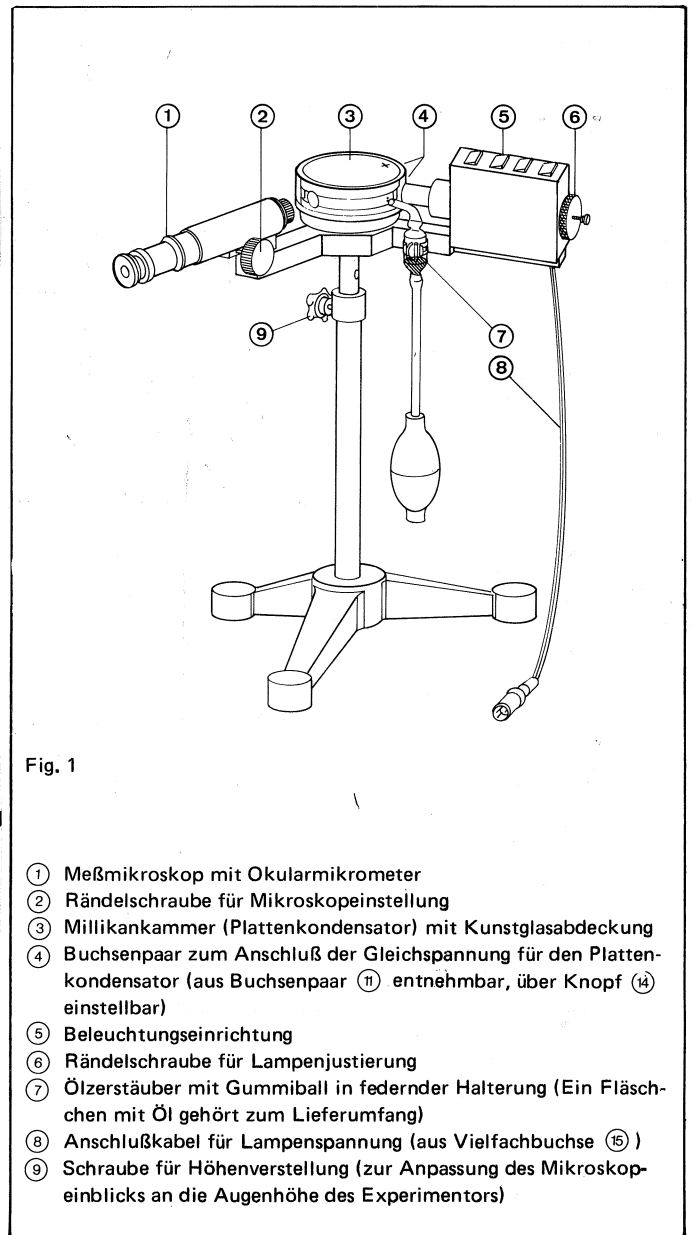
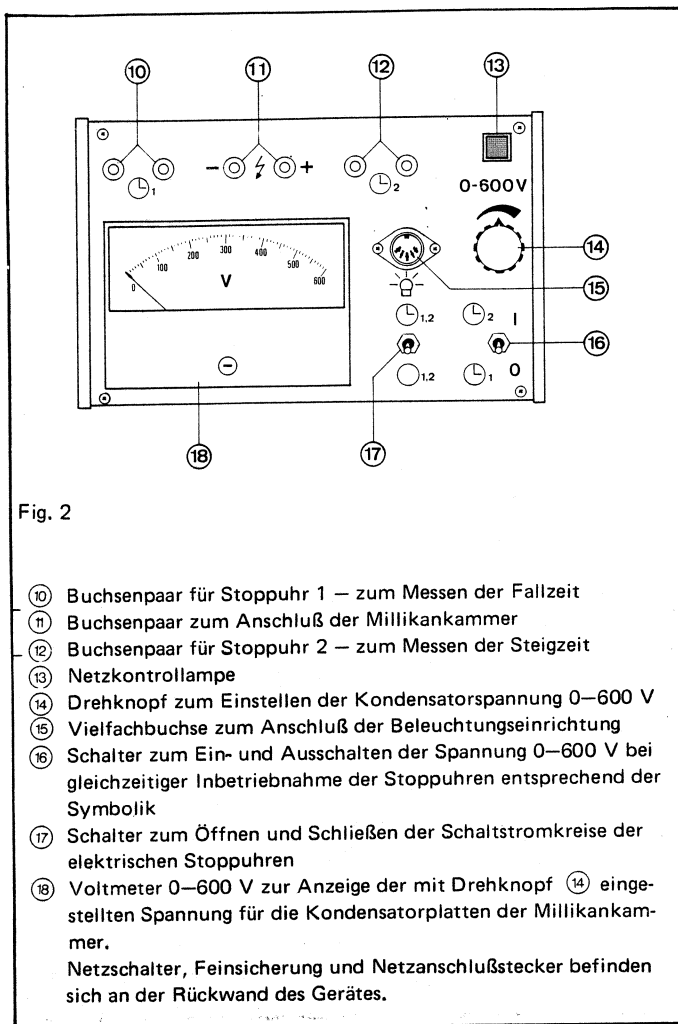


Fig. 1

- ① Meßmikroskop mit Okularmikrometer
- ② Rändelschraube für Mikroskopeinstellung
- ③ Millikan-Kammer (Plattenkondensator) mit Kunstglasabdeckung
- ④ Buchsenpaar zum Anschluß der Gleichspannung für den Plattenkondensator (aus Buchsenpaar ⑪ entnehmbar, über Knopf ⑭ einstellbar)
- ⑤ Beleuchtungseinrichtung
- ⑥ Rändelschraube für Lampenjustierung
- ⑦ Ölzerstäuber mit Gummiball in federnder Halterung (Ein Fläschchen mit Öl gehört zum Lieferumfang)
- ⑧ Anschlußkabel für Lampenspannung (aus Vielfachbuchse ⑮)
- ⑨ Schraube für Höhenverstellung (zur Anpassung des Mikroskop-einblicks an die Augenhöhe des Experimentors)

2.2. Netzgerät (Fig. 2)



3. Funktionsweise

Voraussetzung für dieses erstmals 1913 von R. A. Millikan beschriebenen Verfahren*) ist die Tatsache, daß auf ein im homogenen Feld eines Plattenkondensators bewegliches, elektrisch geladenes Öltröpfchen verschiedene Kräfte wirken, die indirekt meßbar sind.

Bringt man ein elektrisch geladenes Öltröpfchen mit der Masse m_{Oel} und der Ladung Q in das homogene Feld eines Plattenkondensators mit der Feldstärke E , so wirken auf dieses Tröpfchen die folgenden Kräfte:

die Gewichtskraft $m_{\text{Oel}} \cdot g$

die Auftriebskraft $m_{\text{L}} \cdot g$

(m_{L} = Masse der durch das Öltröpfchen verdrängten Luftmenge)

die elektrische Kraft QE

nur wenn sich das hierbei als kugelförmig angesehene Tröpfchen gegenüber der umgebenden Luft bewegt: die Stokesche Reibungskraft $6 \pi r \eta v$.

(η = Viskosität der Luft, r = Radius des Tröpfchens, v = Bewegungsgeschwindigkeit).

Schreibt man unter Berücksichtigung der Auftriebskraft für $m_{\text{Oel}} - m_{\text{L}} = m$ und für $\rho_{\text{Oel}} - \rho_{\text{L}} = \rho$, wobei ρ_{Oel} die Dichte des Öles, ρ_{L} die Dichte der Luft und m und ρ die entspre-

chenden, um die Wirkung des Auftriebes verkleinerten Größen darstellen, so folgt, unter der Voraussetzung, daß eine nach unten gerichtete Kraft positiv anzusetzen ist, für ein Tröpfchen, das im feldfreien Raum mit der Geschwindigkeit v_1 sinkt, folgender Kräfte-Ansatz:

$$\begin{aligned} mg - 6 \pi r v_1 \eta &= 0 \\ V \rho g - 6 \pi r v_1 \eta &= 0 \\ 4/3 \pi r^3 \rho g - 6 \pi r v_1 \eta &= 0 \end{aligned}$$

$$r = \sqrt{\frac{9 \eta v_1}{2 \rho g}} \quad (I)$$

Wenn man die Spannung zwischen den Platten der Millikankammer mit U , den Plattenabstand mit d und die Steiggeschwindigkeit eines Tröpfchens mit v_2 bezeichnet, gilt für ein unter der Wirkung eines elektrischen Feldes der Feldstärke

$E = \frac{U}{d}$ aufsteigendes Tröpfchen die Beziehung:

$$\begin{aligned} mg - QE + 6 \pi r v_2 \eta &= 0 \\ 4/3 \pi r^3 \rho g - Q \frac{U}{d} + 6 \pi r v_2 \eta &= 0 \end{aligned} \quad (II)$$

Für ein unter der Wirkung eines elektrischen Feldes in der Kammer schwebendes Tröpfchen gilt entsprechend:

$$\begin{aligned} mg - QE &= 0 \\ 4/3 \pi r^3 \rho g - Q \frac{U}{d} &= 0 \end{aligned} \quad (III)$$

Die Bestimmung der Elementarladung läßt sich mit diesem Gerät nach zwei verschiedenen Meßverfahren durchführen:

3.1. Durch Messen der Spannung, bei der ein geladenes Öltröpfchen in der Millikankammer schwebt und durch Messen der Geschwindigkeit des Tröpfchens, das nach Abschalten der Spannung im feldfreien Raum sinkt.

3.2. Durch Messen der Sinkgeschwindigkeit eines Tröpfchens im feldfreien Raum und der Steiggeschwindigkeit eines Tröpfchens bei einer bestimmten zu messenden Spannung.

Aus den Gleichungen (I) bis (III) lassen sich die für beide Meßverfahren benötigten weiteren Beziehungen wie folgt herleiten:

zu 3.1. Bestimmung der Elementarladung durch Messen der Schwebespannung U und der Sinkgeschwindigkeit v_1 eines Öltröpfchens im feldfreien Raum.

Nach Einsetzen von (I) in (III) ergibt sich:

$$Q = \frac{6 \pi d \eta v_1}{U} \sqrt{\frac{9 \eta v_1}{2 \rho g}}$$

Nun werden für η , d und ρ die folgenden Zahlenwerte eingesetzt:

$$\begin{aligned} \eta &= 1,81 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \\ d &= 6 \cdot 10^{-3} \text{ m} \\ \rho_{\text{Oel}} &= 875,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ \rho_{\text{L}} &= 1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ \rho &= 874 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

was zu folgender Endgleichung führt:

$$Q = 2 \cdot 10^{-10} \frac{v_1^{3/2}}{U} \text{ As} \quad (IV)$$

*) R. A. Millikan: ON THE ELEMENTARY ELECTRICAL CHARGE AND THE AVOGADRO CONSTANT. PHYSICAL REVIEW Nr. 2, 1913, S 109 ff.

zu 3.2. Bestimmung der Elementarladung durch Messen der Sinkgeschwindigkeit v_1 im feldfreien Raum, der Steiggeschwindigkeit v_2 im elektrischen Feld und der Spannung U an der Millikanammer.

Hierzu werden die Gleichungen (I) und (II) verwendet:

$$Q \frac{U}{d} = 6 \pi \eta v_2 \sqrt{\frac{9 \eta v_1}{2 \rho g}} + 4/3 \pi \rho g \frac{9 \eta v_1}{2 \rho g} \sqrt{\frac{9 \eta v_1}{2 \rho g}}$$

$$Q = (v_1 + v_2) \frac{\sqrt{v_1}}{U} \eta^{3/2} \frac{18 \pi d}{\sqrt{2 \rho g}}$$

Nach Einsetzen der unter 3.1. bereits angegebenen Werte für η , d und ρ kommt man zu der folgenden Endgleichung, die ein relativ schnelles Ausrechnen der Ladungswerte ermöglicht:

$$Q = (v_1 + v_2) \frac{\sqrt{v_1}}{U} \cdot 2 \cdot 10^{-10} \text{ As} \quad (\text{V})$$

4. Bedienung

4.1. Zusammenbau des Millikangerätes (nur vor Erstinbetriebnahme erforderlich)

Dreifuß, Stativstab und Aufsatz mit Millikanammer, Beleuchtungseinrichtung und Meßmikroskop entsprechend Fig. 1 fest miteinander verschrauben. Dabei darauf achten, daß die lose aufgesetzte Millikanammer mit Kunstglasabdeckung beim Kippen des Aufsatzes nicht herunterfällt.

4.2 Einfüllen des Öls

Ölzerstäuber unter Verwendung des zum Lieferumfang gehörenden Öls (Ersatzteil-Nr. ...) durch die Aussprühöffnung so weit füllen, daß das gebogene Kapillarrohr ca. 2 mm im Öl steht. Ölzerstäuber in die federnde Halterung einsetzen. Dabei beachten, daß sich die Aussprühöffnung vor den beiden Bohrungen in der Kunstglasabdeckung der Millikanammer befindet.

4.3 Hinweise zur Zeitmessung:

Je nach Meßmethode 1 Zeitmeßgerät

an Buchsenpaar ⑩ oder 2 Zeitmeßgeräte an die Buchsenpaare ⑩ und ⑫ anschließen (s. Fig. 3.1 — 3.3); weitere Schaltungsmöglichkeiten s. Abschnitt 7, Fig. 6.1 — Fig. 6.3.

Bitte beachten bei Verwendung der Großen Elektrischen Stoppuhr

Schalter ③ nach unten stellen, wenn der Schaltplan auf der großen elektrischen Stoppuhr (s. Fig. 3.1) entspricht;

Schalter ③ nach oben stellen, wenn der Schaltplan Nebenskizze 2 entspricht.

Beschreibung der Meßverfahren mit elektrischen Stoppuhren: s. Versuchsbeschreibung, Abschnitt 7.

An Stelle der elektrischen Stoppuhren können ersatzweise je nach Meßverfahren auch ein oder zwei Handstoppuhren verwendet werden. In diesem Falle Schalter ⑰ nicht betätigen. Seine Stellung ist beliebig. Schülerstoppuhren gleichzeitig mit Umlegen des Schalters ③ starten bzw. stoppen. Insbesondere bei dem unter Abschnitt 3.2. beschriebenen Meßverfahren sind zur Durchführung der Messungen jetzt zwei Personen erforderlich.

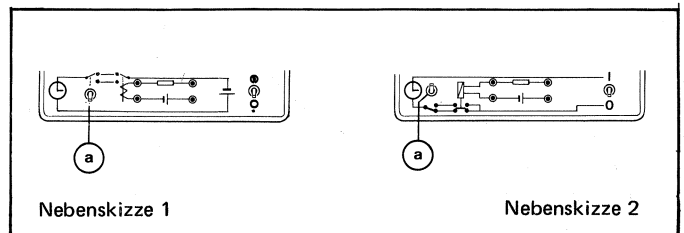
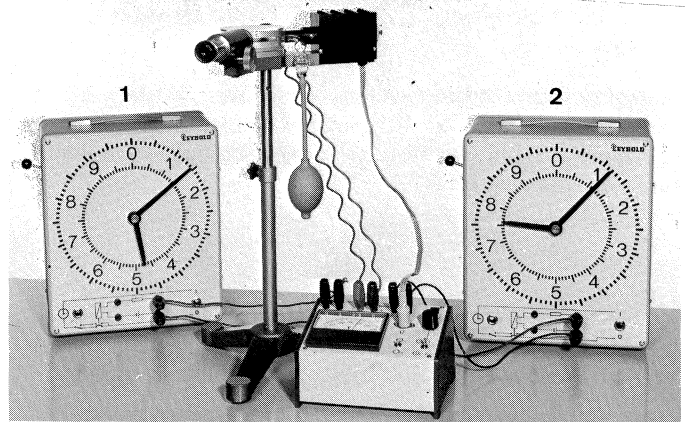


Fig. 3.1

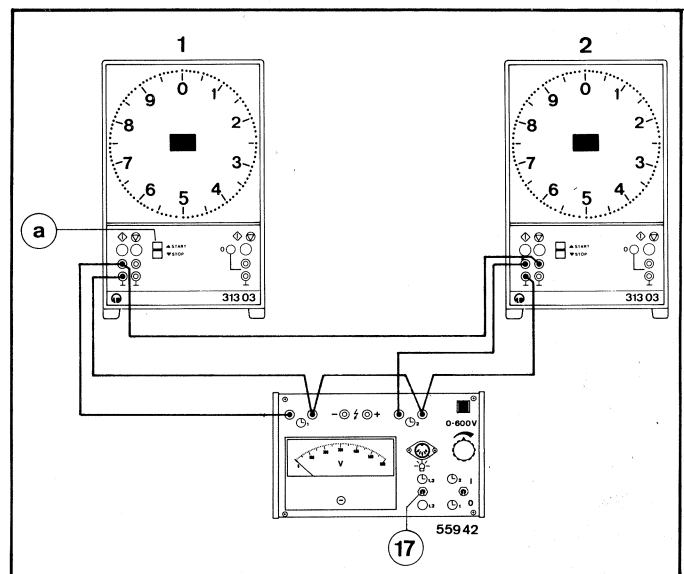


Fig. 3.2

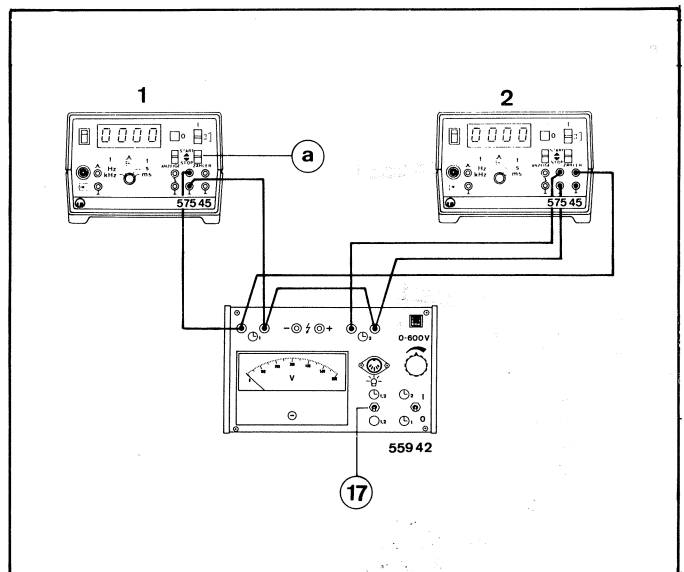


Fig. 3.3

4.4. Ermittlung des Weges s eines zu beobachtenden Öltröpfchens; experimentelle Vergrößerung des Mikroskopobjektivs

Bewegt sich ein Öltröpfchen längs eines Weges s' von x Mikrometer-Skalenteilen ($= x \cdot 10^{-4} \text{ m}$), so beträgt unter Berücksichtigung der 2fachen Objektiv-Vergrößerung der tatsächlich zurückgelegte Weg s

$$s = \frac{x}{2} 10^{-4} \text{ m}$$

Die Mikroskopvergrößerung kann bei verschiedenen Geräten geringfügig von dem oben genannten Wert abweichen. Die Abweichung wird aber $\pm 1\%$ nicht wesentlich überschreiten.

Unter Verwendung des Glasstabes mit Millimeterteilung besteht die Möglichkeit, die Mikroskopvergrößerung selbst zu bestimmen: Millikammer mit Kunstglasabdeckung von dem auf dem Stativstab befindlichen Aufsatz herunternehmen. Glasstab mit Millimeterteilung mittels flachem Radiergummi o. ä. vertikal gegen den jetzt sichtbaren Zentrierstab stellen. Mikroskop mit Rändelschraube so einstellen, daß die Millimeterteilung des Glasstabes scharf sichtbar wird. Durch Vergleichen der im Okular befindlichen Mikrometerskala (Teilstrichabstand 0,1 mm) mit der Millimeterteilung des Glasstabes läßt sich die Vergrößerung berechnen. Anschließend Millikammer mit Kunstglasabdeckung wieder an den vorgesehenen Platz setzen.

4.5 Versuchsbeschreibung

Die Quantelung der elektrischen Ladung läßt sich bereits nach Durchführung von ca. 6 – 8 Messungen nachweisen. Zur Bestimmung der Elementarladung ist dagegen die zwei- bis dreifache Anzahl an Messungen sinnvoll.

Aufbau:

Anordnung je nach Meßmethode mit einer Stoppuhr 1 oder mit zwei Stoppuhren 1 und 2 aufbauen (s. Fig. 3.1 – 3.3).

Netzgerät am Kippschalter an der Gehäuse-Rückwand einschalten, Okularmikrometer vertikal stellen und durch Drehen des schwarzen Okularrings scharf einstellen.

Durchführung:

Öl durch kräftiges Drücken des Gummiballs in die Millikan-kammer stäuben und Versuch entweder gemäß 4.5.1 oder 4.5.2 durchführen.

4.5.1 Meßmethode mit einer Stoppuhr (an Buchsenpaar ⑩)

Meßgrößen:

Spannung U , bei der ein geladenes Öltröpfchen im elektrischen Feld des Plattenkondensators in der Schwebe gehalten wird; Zeit t , die das gleiche Tröpfchen benötigt, um nach Abschalten der Spannung längs eines Weges s' zu sinken (zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit v_1 im feldfreien Raum).

Meßverfahren:

1.	Schalter ⑰ und ⑱ nach oben stellen: die Stoppuhr ist meßbereit, und die Verbindung zur Spannungsversorgung des Kondensators ist hergestellt	
2.	Spannung U an Drehknopf ⑭ so einstellen, daß 1 Tröpfchen im unteren Drittel des Beobachtungsfeldes (zweckmäßigerweise auf 1 Skalenstrich des Okularmikrometers) schwebt; Spannung U ablesen	
3.	Schalter ⑱ in Stellung 0 bringen: Die Spannung U wird abgeschaltet; gleichzeitig wird die Stoppuhr gestartet.	
4.	Das im feldfreien Raum sinkende Tröpfchen, das im Mikroskopbild aufsteigt, beobachten und Uhr durch Umlegen von Schalter ⑰ stoppen, wenn das Tröpfchen einen Weg s' von z. B. 30 Mikrometer zurückgelegt hat.	

4.5.2 Meßmethode mit zwei Stoppuhren (an den Buchsenpaaren ⑩ und ⑫)

Meßgrößen:

Zeit t_2 , die ein Öltröpfchen benötigt, um längs des Weges s' zu steigen, wenn am Plattenkondensator eine Spannung U liegt (zur Bestimmung der Steiggeschwindigkeit v_2 im elektrischen Feld);

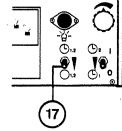
Kondensatorspannung U ;

Zeit t_1 , die das gleiche Tröpfchen nach Abschalten der Spannung U benötigt, um längs eines Weges s' zu sinken (zur Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit v_1 im feldfreien Raum).

Meßverfahren:

1.	Schalter ⑰ nach unten und Schalter ⑱ nach oben stellen: Der Steuerstromkreis für die Stoppuhren ist geöffnet, die Verbindung zur Spannungsversorgung des Kondensators ist hergestellt.	
2.	Am Drehknopf ⑭ eine Spannung U von 500 V bis 600 V einstellen, so daß die Öltröpfchen im elektrischen Feld langsam steigen (im Mikroskopbild als sinkende Tröpfchen zu beobachten); Spannung U messen	
3.	Im oberen Drittel des Beobachtungsfeldes ein langsam sinkendes Tröpfchen auswählen und Schalter ⑰ genau dann umlegen, wenn es eine Meßmarke (z. B. Skalenstrich 40 der Mikrometer-Skala) passiert: die Stoppuhr 2 zur Messung der Steigzeit t_2 im elektrischen Feld wird gestartet.	
4.	Das im Mikroskopbild sinkende, aber tatsächlich steigende Tröpfchen beobachten und Schalter ⑱ genau dann in Stellung 0 bringen, wenn es eine 2. Meßmarke (z. B. Skalenstrich 70 der Mikrometer-Skala) passiert: die Kondensatorspannung U wird abgeschaltet; gleichzeitig erfolgen Stop von Uhr 2 und Start von Uhr 1	

5. Das im feldfreien Raum sinkende Tröpfchen, das im Mikroskopbild steigt, beobachten und Schalter ⑰ genau dann umlegen, wenn es die 1. Meßmarke (z. B. 40) wieder passiert: Uhr 1 wird gestoppt. Bei Verwendung der Elektrischen Stoppuhr P (313 03) oder des Zählgerätes P (575 45) – s. Fig. 3.2/3 – Zeitmessung an Gerät 1 über Schalter ⑳ stoppen (Stop durch Schalter ⑰ nicht möglich).



Hinweise:

Auf der Suche nach einem geeigneten Tröpfchen und gegebenenfalls während einer längeren Beobachtung läßt sich die Schärfe des Mikroskopbildes an der Rändelschraube ㉒ nachstellen. Ein Nachstellen der Schärfe während einer Messung ist im allgemeinen nicht notwendig, wenn der Raum, in dem das Gerät betrieben wird, frei von Zugluft ist. Ein geeignet erscheinendes Tröpfchen, das sich seitlich zu weit von der Okularskala entfernt bewegt, läßt sich durch geringfügiges Schwenken des Mikroskops leicht in die Bildmitte bringen.

Es empfiehlt sich, vor Beginn einer längeren Meßreihe zunächst die Ladungen von 2 – 3 Tröpfchen zu berechnen. Hierdurch soll der Experimentierende einen Anhaltspunkt für die Auswahl geeigneter Tröpfchen bekommen. Es hat sich gezeigt, daß die Ladung bei schnellbeweglichen Tröpfchen so groß ist, daß eine Aussage über die Quantelung und insbesondere über die Größe des größten gemeinsamen Divisors, nämlich der Elementarladung e erschwert wird. Als geeignet in diesem Sinne haben sich daher insbesondere Tröpfchen erwiesen, die maximal ca. 5 Elementarladungen enthalten, d. h. daß brauchbare Ergebnisse $< 10 \cdot 10^{-19}$ As sein sollten.

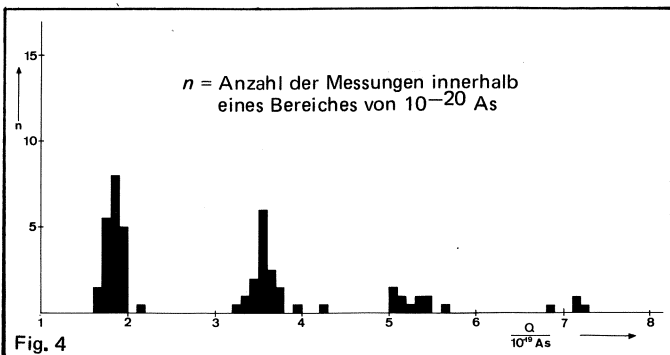
Auswertung der Meßergebnisse:

Nach Ausrechnen der Geschwindigkeit der Tröpfchen je nach gewähltem Meßverfahren mit Gleichung (IV) oder (V) (s. Abschn. 3) die Ladung $Q = n \cdot e$ berechnen.

Stellt man die Meßergebnisse in Form eines Histogrammes dar (s. z. B. Fig. 4), so wird die gequantelte Struktur der elektrischen Ladung bereits deutlich sichtbar.

Durch Bildung des größten gemeinsamen Divisors aus den verschiedenen Ladungswerten erhält man die Elementarladung e .

Vergleicht man den auf diese Weise erhaltenen Mittelwert für e mit dem exakten Wert der Elementarladung $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ As, so zeigt sich, daß der experimentell bestimmte Wert für e



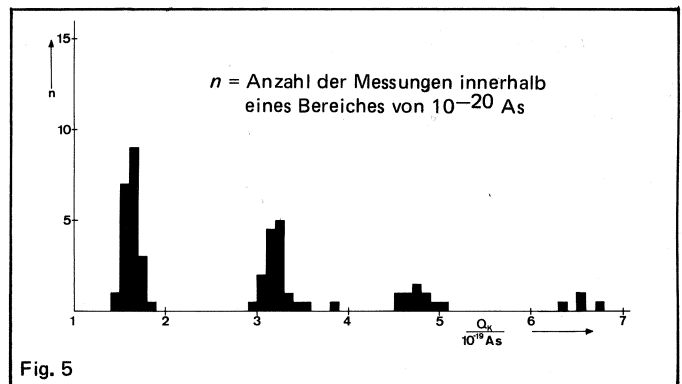
etwa um den Faktor 1,1 zu groß ausgefallen ist. Genauere Untersuchungen zeigen, daß dieser Faktor umso größer wird, je kleiner der Radius der beobachteten Öltröpfchen ist. Diese Erscheinung ist darauf zurückzuführen, daß das der Auswertung der Messungen zugrundeliegende Stokessche Gesetz für die Größe der hier vorkommenden Tröpfchen, die etwa zwischen 10^{-6} und 10^{-7} m und damit in der Größenordnung der mittleren freien Weglänge der Luftmoleküle liegt, nicht mehr exakt gilt.

Korrektur der experimentell gewonnenen Werte für e

Sollten die erhaltenen Meßwerte bezüglich ihrer Genauigkeit den gestellten Anforderungen nicht genügen, so kann hier eine bereits von Millikan angewandte Korrekturrechnung herangezogen werden.

Wenn man die korrigierte Ladung mit Q_k und den Luftdruck mit p , gemessen in mbar bezeichnet, dann gilt folgende Gleichung:

$$Q_k = \frac{Q}{\left(1 + \frac{b}{rp}\right)^{3/2}} \quad \text{oder} \quad Q^{2/3} = Q_k^{2/3} \left(1 + \frac{b}{rp}\right)$$



b ist eine graphisch bestimmbare Konstante. Diese Gleichung ist die Gleichung einer Geraden von der Form

$$y = y_0 (1 + b x)$$

Stellt man $y = Q^{2/3}$ als Funktion von $x = \frac{1}{rp}$ graphisch dar, ergibt sich eine Gerade, die an der Stelle $y_0 = Q_k^{2/3}$ die Ordinate schneidet. Dividiert man die Steigung $\frac{dy}{dx}$ der Geraden

durch $y_0 = Q_k^{2/3}$, so erhält man die Konstante b . Für die hier beschriebenen Meßergebnisse ergab sich der Wert: $b = 6,33 \cdot 10^{-5}$ mbar \cdot m.

Um die Konstante b einigermaßen exakt bestimmen zu können, ist eine wesentlich größere Anzahl von Messungen als die oben genannte erforderlich. Da die Größe der hier auftretenden Tröpfchen aber durchweg in der Größenordnung 10^{-6} m liegt, kann mit ausreichender Genauigkeit der oben genannte Wert für b verwendet werden.

Die Korrekturrechnung für die in Fig. 4 dargestellten Meßergebnisse führt zu dem in Fig. 5 dargestellten Histogramm mit korrigierten Ladungen.

Bildet man schließlich aus den 148 korrigierten Elementarladungen, die in den Ergebnissen dieser 85 Messungen enthalten sind, den Mittelwert, so erhält man einen Wert: $e_k = 1,61 \cdot 10^{-19}$ As, der nur geringfügig vom exakten Wert für die Elementarladung abweicht.

5. Umrüsten auf andere Netzspannungen; Austausch einer defekten Sicherung

Das Netzgerät ist für eine Netzanschlußspannung von 220 V vorgesehen, kann aber nach Öffnen des Gerätes durch internes Umstecken der Transformatorzuleitung auch an 110 V; 130 V oder 240 V betrieben werden

Das Umrüsten wird wie folgt ausgeführt:

Netzstecker ziehen.

Eine der Seitenwände nach Lösen der 3 Befestigungsschrauben abnehmen und Bodenplatte mit Transformator herausziehen und auf den Tisch legen.

Federzunge von Kontaktzunge 220 V am Transformator abziehen und auf die Kontaktzunge stecken, die mit der passenden Spannung gekennzeichnet ist.

Bei Umrüstung auf 110 V~ oder 130 V~ außerdem die Schmelzsicherung M 0,315 B ersetzen durch eine Sicherung M 0,63 B.

Bei Austausch einer defekten Schmelzsicherung Sicherungshalter bei gezogenem Netzstecker aus der Gerätewand schrauben.

6. Pflege und Wartung

Durch den Ölzerstäuber werden nur geringe Ölmengen in die Millikanammer gebracht. Daher ist eine Reinigung der Kammer und der Kunstglasabdeckung, zu der sich ein weicher, saugfähiger Lappen eignet, nur in großen Zeitabständen nötig.

Die beiden Bohrungen in der Kunstglasabdeckung, durch die man die Öltröpfchen einsprüht, können zeitweilig von Öl verstopft werden, so daß keine Tröpfchen mehr in die Kammer gelangen. Zum Durchstoßen eignet sich eine aufgebogene Büroklammer.

Befriedigendes Zerstäuben des Öls ist nur mit einem einwandfreien Gummiball möglich. Wird die Funktionsfähigkeit des Gerätes durch unvermeidbaren natürlichen Verschleiß des Gummis beeinträchtigt, ist ein Austausch des Gummiballs erforderlich

7. Ergänzung zu Abschnitt 4.3

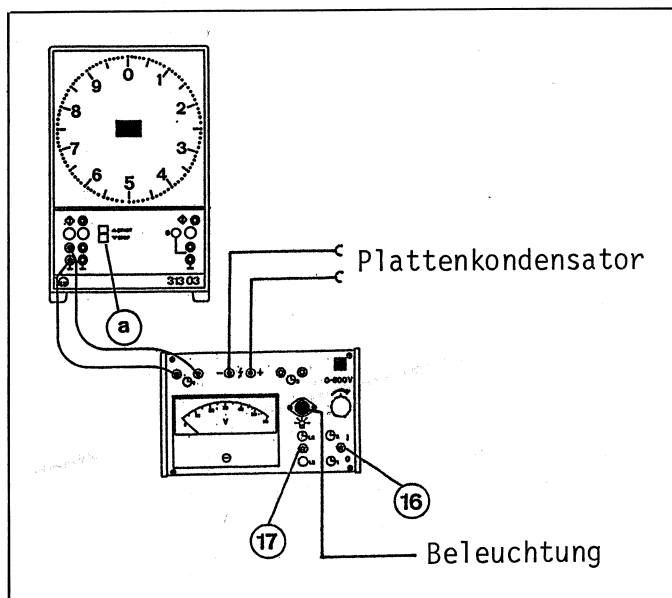


Fig. 6.1
Schaltung mit elektronischer Stoppuhr P für die Gleichgewichtsmethode

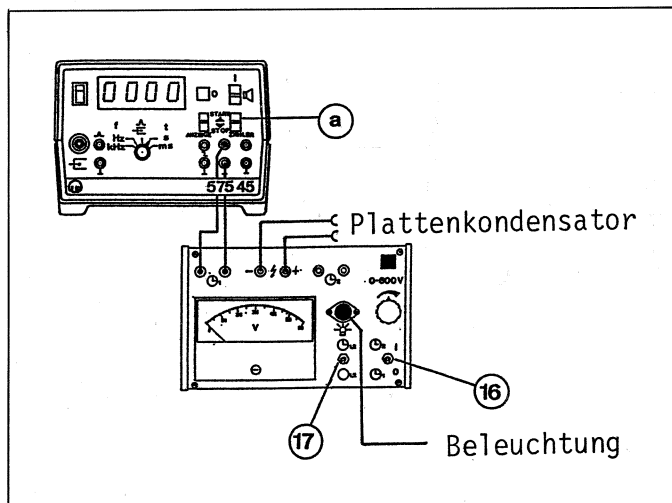


Fig. 6.2
Schaltung mit Zählgerät P für die Gleichgewichtsmethode

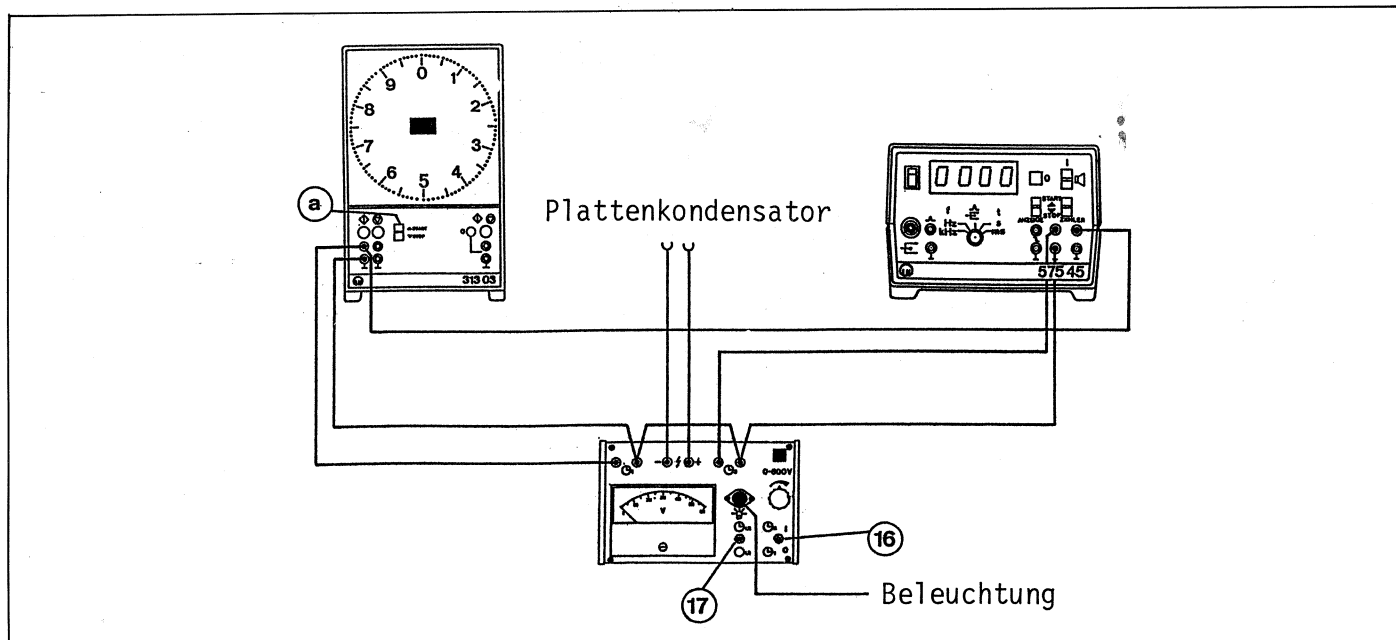


Fig. 6.3
Schaltung der Stoppuhr P und des Zählgerätes P für dynamische Methode