

# Die Spannungsmessung mit elektrostatischen Voltmetern

Von Dipl.-EI.-Ing. Ernst Singer, Zürich  
Separatdruck aus der «Technischen Rundschau» Nr. 20, vom 3. Mai 1957

Mit freundlicher Genehmigung der „Binkert Medien AG“  
vom 23. Sept. 2011

1. Allgemeines	2
2. Das elektrostatische Messprinzip	4
3. Das Duantenmesswerk	7
4. Tragbare Voltmeter mit Duantenmesswerk	10
a) Tragbare Kontrollvoltmeter für Bereiche zwischen 150 und 2000 V	10
b) Tragbare Kontrollvoltmeter für höhere Spannungen (Bild 13):	11
c) Tragbare Laboratoriumsgeräte mit Lichtzeiger (Bild 14)	13
5. Das Messwerk des Schutzringeletrometers	14
6. Tragbare Voltmeter des Schutzringtyps für Hochspannungen (Bild 18)	15
7. Hochspannungsvoltmeter für sehr hohe Spannungen (Bilder 19-22)	17
8. Die Anwendungsmöglichkeiten elektrostatischer Voltmeter	19

## Die Spannungsmessung mit elektrostatischen Voltmetern

Im nachfolgenden Aufsatz soll der Leser mit einem elektrischen Messprinzip näher vertraut gemacht werden, das bisher zu Unrecht nur geringe Verbreitung gefunden hat, obgleich die elektrostatischen Spannungsmesser gegenüber den üblichen Voltmetern zahlreiche Vorteile aufweisen und eine Fülle von Anwendungsmöglichkeiten bieten.

### 1. Allgemeines

Während bei den üblichen Spannungsmessern die Kraftwirkungen des elektrischen Stromes zur Messung herangezogen werden, sind die elektrostatischen Voltmeter, auch kurz «Elektrometer» genannt, reine Spannungsmesser mit sehr hohem Eingangswiderstand. Definitionsgemäss versteht man unter elektrostatischen Messwerken solche, bei denen die statischen Kräfte zwischen zwei auf gleiches oder verschiedenes Potential aufgeladenen Körpern zur Anzeige des zu messenden Wertes verwendet werden. Das Messwerk stellt somit eine rein kapazitive Belastung dar. Da durch eine solche bei Gleichspannungsmessungen dem Messobjekt nur einmal die zur Aufladung des Messwerkes benötigte Elektrizitätsmenge entzogen wird, ist — nach erfolgter Einstellung auf den Messwert — das Messobjekt nicht mehr belastet, vorausgesetzt, dass kein sonstiger Ladungsverlust eintritt. Es genügt also zur Messung bereits das Vorhandensein elektrischer Ladungen, ohne dass es zu einem dauernden Stromfluss kommt. Da also der Wirkleistungsverbrauch des Messwerkes allein durch den Isolationswiderstand und die dielektrischen Verluste bestimmt wird, ist hervorragende Isolation nötig und stellt ein wichtiges äusseres Merkmal aller elektrostatischen Instrumente dar. Als Mass für die Güte des Isolationswiderstandes und zugleich auch für die Kleinheit der dielektrischen Verluste wird vom Hersteller die sogenannte «Halbwertzeit» angegeben. Das ist diejenige Zeitdauer, innerhalb der die Spannung infolge einer aufgebrauchten Ladung nicht unter den halben Wert herabsinken darf. Die Wechsellspannungsmessungen erfolgen nicht vollkommen leistungslos, wobei der Eigenverbrauch des Messwerks von der Grösse seiner Kapazität abhängig ist. Nach Einstellung auf den Messwert ist hier der Instrumentenstrom — abgesehen von den vor erwähnten Verlustströmen — ein kapazitiver Blindstrom der Grösse  $I_C = 2\pi fCU$ . Wie daraus ersichtlich, ist er stark frequenzabhängig, belastet jedoch das Messobjekt praktisch nicht.

Der Isolationswiderstand ist frequenzunabhängig, während die dielektrischen Verluste mit wachsender Frequenz ansteigen, aber durch verlustfreien Aufbau des Messwerks bis ca. 10 MHz vernachlässigbar klein gehalten werden können. Damit kann bis zu ca. 10 MHz der Wirkleistungsverbrauch praktisch als Null angenommen werden.

## Die Spannungsmessung mit elektrostatischen Voltmetern von Ernst Singer

Während also das Messprinzip an sich, d. h. die Ablenkung im elektrischen Feld, praktisch frequenzunabhängig ist, wird der Frequenzbereich nach oben durch die Eigenkapazität des Systems mitsamt inneren und äusseren Zuleitungen begrenzt.

Der Einfluss von elektrostatischen Fremdfeldern auf die Anzeige muss durch entsprechende Abschirmung des Messwerkes ausgeschaltet werden. Meist genügt es, ein gut geerdetes Blech unter das Messwerk zu schieben. Da für die Anzeige, wie wir noch sehen werden, das Quadrat der angelegten Spannung massgebend ist, zeigt das elektrostatische Instrument den Effektivwert an und ist somit unabhängig von der zeitlichen Kurvenform der Spannung. Bei Gleichspannungsmessungen ist die Polarität ohne Einfluss auf die Messung.

Allerdings lassen sich wegen der geringen auftretenden Einstellkräfte keine Messbereiche für kleine und kleinste Spannungen herstellen, und die Überlastbarkeit wird eingeschränkt, da der Konstrukteur gezwungen ist, die zur Verfügung stehende Messspannung fast voll auszunützen.

Bei Hochfrequenz stört u. U. die Tatsache, dass sich die Eigenkapazität des Messwerkes mit dem Ausschlag ändert, wenn es z. B. gilt, die Resonanzkurve von Schwingkreisen aufzunehmen, sofern nicht die zur Verstimmung notwendige Kapazitätsänderung des Abstimmkondensators erheblich überwiegt. Eine derart aufgenommene Resonanzkurve muss nachträglich durch Ändern des Abszissenmaßstabes berichtigt werden.

Ganz allgemein eignen sich elektrostatische Voltmeter besonders zur Messung hoher und höchster Spannungen, wobei für Wechselstrom der Messbereich eines Instruments durch Vorschalten von Kondensatoren oder durch kapazitive Spannungsteilung erheblich nach oben erweitert werden kann.

Die obere Frequenzgrenze bei Eichung mit Gleichspannung kann — je nach Ausführung und Messbereich — bis zu 10 MHz reichen.

Als Schalttafelinstrumente in Starkstromanlagen werden elektrostatische Geräte seltener verwendet, da die Überschlagspannung nur höchstens 50 % über der Meßspannung liegt, was nach den einschlägigen Vorschriften (SEV, VDE) für den Einbau in Starkstromnetze nicht ausreicht. Häufiger werden sie dagegen in tragbaren Ausführung in Laboratorien und Prüfräumen benutzt besonders für Messungen von Mittel- und Hochfrequenzspannungen.

## 2. Das elektrostatische Messprinzip

Das elektrostatische Messprinzip beruht darauf, dass anziehende oder abstossende statische Kräfte zwischen zwei auf verschiedenes oder gleiches Potential aufgeladenen Körpern auftreten. In seiner ältesten und zugleich einfachsten Form tritt es uns in Elektroskop (Bild 1) und den einfachen Elektrometern (Bild 2) entgegen, bei denen es sich um die ältesten elektrischen Messgeräte überhaupt handelt. Hier wird die Abstossung gleichnamig aufgeladener

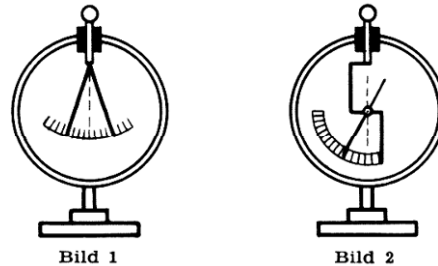


Bild 1. Elektroskop nach W. Thomson  
Bild 2: Braunsches Elektrometer.

und gegen das geerdete Gehäuse hochisolierter Blättchen (Gold- oder Aluminiumfolien, Wollastonsaiten, Quarzfäden u. a.) zur Messung herangezogen. Wir sprechen dann vom «Blättchenelektrometer» (für luftelektrische Untersuchungen und Ionisationsmessungen) sowie von «Saiten»- und «Fadenelektrometern». Bei diesen Instrumenten, die ausschliesslich im Labor gebraucht werden, erfolgt die Ablesung immer mit einem Mikroskop, da die Ausschlagwinkel sehr klein sind. Als Rückstellkraft wird die Schwerkraft benutzt. Neben den in Bild 1 und 2 dargestellten Ausführungen existiert noch eine Fülle ähnlicher Elektrometer, deren Aufzählung und Besprechung den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

Vielmehr wollen wir uns nun den beiden wichtigsten Grundformen der elektrostatischen Messwerkkonstruktionen zuwenden, die als Duanten (Binanten-, Quadranten-) und als Schutzringelektrometer bekannt sind. An diesen beiden Ausführungsformen soll im Folgenden zunächst das elektrostatische Messprinzip untersucht werden.

Jedes elektrostatische Messwerk ist im Prinzip ein Kondensator, dessen eine Elektrode feststehend und die andere ganz oder teilweise beweglich ausgebildet ist. Lädt man diesen Kondensator auf, dann übt das zwischen den beiden Elektroden entstehende elektrische Feld eine Kraft auf die bewegliche Elektrode aus, deren Wirkung so gerichtet ist, dass durch die Wegänderung die Kapazität vergrössert wird. Nach dem Prinzip des kleinsten Widerstandes sucht sich nämlich das Feld so auszubilden, dass seine Kraftlinien einen möglichst kurzen Weg oder einen möglichst grossen Querschnitt suchen. Beides entspricht einer Vergrösserung der Kapazität. Die dabei entstehende Bewegung dient zur Anzeige der angelegten Spannung.

## Die Spannungsmessung mit elektrostatischen Voltmetern von Ernst Singer

Die Anordnung der beiden Elektroden kann entweder so erfolgen, dass die bewegliche wie bei einem Drehkondensator in die feste Elektrode eintaucht (Bild 3; Prinzip der Duanten-, Binanten- und Quadrantenelektrometer), oder aber, dass sich wie beim

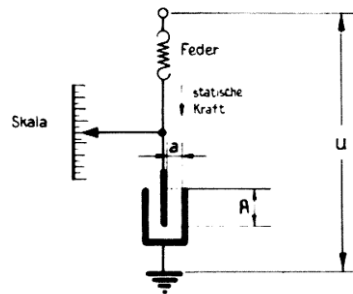


Bild 3. Vergrössern der wirksamen Elektrodenfläche A bei konstantem Elektrodenabstand a — Anwendung bei mittleren und niederen Spannungen.

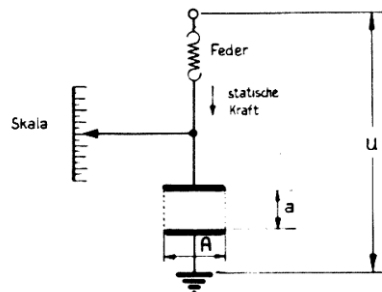


Bild 4. Verkleinern des Elektrodenabstandes a bei konstanter Elektrodenfläche A — Anwendung bei hohen Spannungen.

Plattenkondensator zwei ebene parallele Platten oder zwei Kugelkalotten gegenüber stehen (Bild 4; Prinzip der Schutzringelektrometer und der Kugelvoltmeter).

Die mechanische Arbeit, die geleistet wird, um die bewegliche Platte um die Strecke  $dx$  gegen die Federkraft  $P$  zu bewegen, beträgt  $P \cdot dx$ . Dabei ändert sich die Kapazität  $C$  um den Betrag  $dC$ , wobei die elektrische Arbeit  $\frac{1}{2}U^2dC$  geleistet wird. Im Beharrungszustand (Gleichgewichtslage) müssen beide Energien gleich gross sein, also:

$$Pdx = \frac{1}{2} U^2 dC \quad (1)$$

Daraus bestimmt sich die Einstellkraft zu

$$P = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{dx} \quad (2)$$

Die Kapazität eines Plattenkondensators (Fläche  $A$  in  $\text{cm}^2$ , Plattenabstand  $a$  in  $\text{cm}$ ) beträgt, gemessen im absoluten elektrostatischen Maßsystem,

$$c = \frac{\varepsilon A}{4\pi a} [CM] \quad (1CM = 1.11Pf) \quad (3)$$

Für Luft als Dielektrikum zwischen den Platten kann die Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon = 1$  gesetzt werden.

## Die Spannungsmessung mit elektrostatischen Voltmetern von Ernst Singer

Im Falle von Bild 3 ändert sich die wirksame (d. h. einander gegenüberliegende) Plattenfläche  $A$ , welche in diesem Falle aus beiden Seiten der beweglichen Platte besteht, in Abhängigkeit vom Wege  $x$ , so dass man sagen kann, die Plattenfläche  $A$  nimmt nach einer Funktion  $f(x)$  mit dem Wege  $x$  zu. Die Kapazität des Kondensators in Funktion vom Plattenwege wird

$$C = \frac{\varepsilon A}{4\pi a} [1 + f(x)], \quad (4)$$

und die Kapazitätsänderung ergibt sich aus der Ableitung der C-Funktion nach dem Wege  $x$  zu:

$$\frac{dC}{dx} = \frac{\varepsilon A}{4\pi a} \cdot \frac{d[1 + f(x)]}{dx} \quad (5)$$

Liegen die Kanten der beiden Elektroden parallel zur Bewegungsrichtung, so kann für die Funktion  $f(x)$  der Wert  $kx$  ( $k = \text{Konstante}$ ) angenommen werden, womit sich der Ausdruck für die Einstellkraft (2) ergibt:

$$P = k \cdot \frac{\varepsilon A}{8\pi a} U^2 = K \cdot A \cdot a \cdot \left(\frac{U}{a}\right)^2 \quad (6)$$

Im Falle von Bild 4 ändert sich der Abstand  $a$  mit dem Wege  $x$ , so dass — eingesetzt in Gleichung (3) — sich für die Kapazität die Funktion ergibt.

$$C = \frac{\varepsilon A}{4\pi} \frac{1}{(a-x)} \quad (7)$$

Die Kapazitätsänderung wird dann [analog (5)]

$$\frac{dC}{dx} = \frac{\varepsilon A}{4\pi} \frac{1}{(a-x)^2} \quad (8)$$

und die Einstellkraft nach (2):

$$P = \frac{\varepsilon A}{8\pi} \frac{U^2}{(a-x)^2} \quad (9)$$

Solange  $x \ll a$  ist, kann mit guter Annäherung geschrieben werden:

$$P = \frac{\varepsilon A}{8\pi} \left(\frac{U}{a}\right)^2 = K' \cdot A \cdot \left(\frac{U}{a}\right)^2 \quad (10)$$

Die Grösse  $\left(\frac{U}{a}\right)$  stellt in beiden Fällen [Gleichungen (6) und (10)] die elektrische Feldstärke zwischen den beiden Platten dar und muss stets kleiner als die Durchbruchfeldstärke des zwischen den Platten liegenden Dielektrikums sein. Die Durchbruchfeldstärke zwischen zwei parallelen Platten in Luft bei Atmosphärendruck und einer Temperatur von 20° C beträgt 21,4 kV/cm. Wird an Stelle von Luft ein reines Gas (z. B. Kohlendioxyd oder Stickstoff) als Dielektrikum verwendet und der Druck erhöht, so steigt die Durchbruchfeldstärke proportional mit dem Druck an. Auf diese

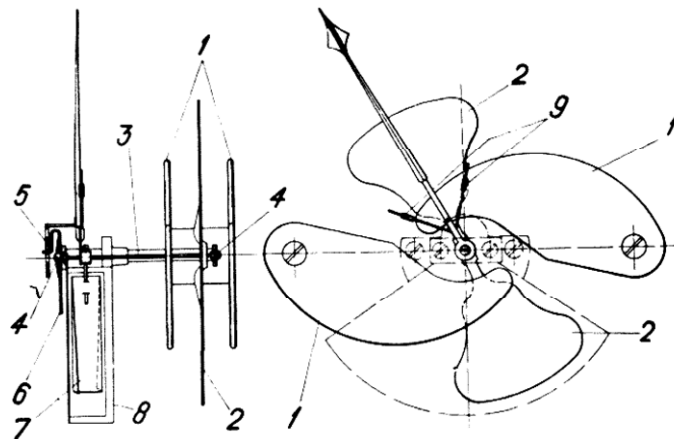
## Die Spannungsmessung mit elektrostatischen Voltmetern von Ernst Singer

Weise kann die obere Messbereichsgrenze wesentlich nach oben verschoben werden (Anwendung: sog. «Pressgasvoltmeter» mit ca. 20 at Druck).

Wie aus den soeben abgeleiteten Gleichungen für die Einstellkraft  $P$  hervorgeht, ist diese für positive und negative Spannungen  $U$  immer gleichgerichtet und positiv im Sinne einer Anziehung der Platten. Aus diesem Grunde ist das elektrostatische Messwerk sowohl für die Messung von Gleich- als auch von Wechselspannungen geeignet. Das Messwerk kann auch zur Messung von elektrischen Ladungen ( $Q = CU$ ) herangezogen werden. Infolge seiner geringen Kapazität sind die messbaren Ladungsmengen sehr klein. Eine Erweiterung des Messbereiches ist durch Parallelschalten einer bekannten Kapazität möglich.

### 3. Das Duantenmesswerk

Anhand eines handelsüblichen Duantenmesswerks sollen der Aufbau und die Eigenschaften eines solchen Systems erläutert werden (Bild 5).



Die beiden festen Elektrodenpaare (1), die nierenförmigen «Duanten», sind unter sich leitend verbunden und gegen das Gehäuse hochisoliert (Bernstein). Von der Güte dieser Isolation hängt in erster Linie die elektrische Güte des Messwerks ab (grosse Halbwertzeit). Die «Nadel» genannte drehbare Elektrode (2) besteht aus einem besonders geformten Aluminiumflügel, welcher zusammen mit dem auf gleicher Achse (3) befestigten Zeiger und Dämpferflügel (7) das sogenannte «bewegliche System» bildet. Mit der Form von Nadel und Duanten kann der Konstrukteur den Skalenverlauf ziemlich weitgehend beeinflussen, ja sogar über einen relativ weiten Bereich eine annähernd lineare Charakteristik herbeiführen. Dieser Vorteil wird allerdings meist mit einem Verlust an Drehmoment erkauft. Die Systemachse (3) ist in Steinen (4) gelagert. Das relativ schwache mechanische Gegendrehmoment («Richtkraft») wird durch die Spirale (5) aufgebracht. Die Dämpfung des beweglichen Systems wird durch einen Dämpferflügel (7) erzeugt, welcher sich in der Luftkammer (8) bewegt. Mit den Gegengewichten (9)

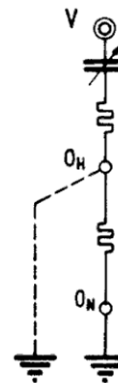
## Die Spannungsmessung mit elektrostatischen Voltmetern von Ernst Singer

wird das bewegliche System ausbalanciert. Die Nullstellung (6) dient zur Nachjustierung des Zeigers in der Nulllage, und zwar muss diese in spannungslosem Zustande und an vollkommen entladene Instrument vorgenommen werden. Zum Zwecke der Entladung genügt es, die hochisolierte Duantenklemme mit der Hand zu berühren.

Zum Erreichen einer höheren Empfindlichkeit — besonders für niedrige Messbereiche — werden häufig mehrere Duantenpaare übereinander angeordnet, in welche dann eine entsprechende Anzahl Nadeln eintaucht. Alle diese einzelnen Nadel-Duanten-Kombinationen werden parallelgeschaltet, so dass sich ihre Kapazitäten addieren. Auf diese Weise erhält man das «Multizellular-Voltmeter».

Wie bereits erwähnt, muss der Konstrukteur von elektrostatischen Messwerken aus Gründen einer maximalen Empfindlichkeit den jeweiligen Messbereich vollkommen ausnützen, so dass die noch verbleibende Überlastbarkeit oft nur noch ca. 10 % des Messbereichendwerts beträgt. Dieser Eigenschaft elektrostatischer Messinstrumente haben denn auch die VDE-Regeln 0410 (§ 24, Abs. e) Rechnung getragen, indem sie diese Geräte ausdrücklich von der Stossüberlastprüfung ausnehmen. Daraus ergibt sich aber die Forderung, der Gefahr einer Zerstörung des Messwerks durch Überschlagn und des damit verbundenen katastrophalen Kurzschlusses der Meßspannung bei plötzlich auftretenden Spannungsspitzen auf andere Weise entgegenzutreten. Dies geschieht meist durch Vorschalten eines hochohmigen Schutzwiderstandes oder eines

Bild 6. Elektrostatisches Voltmeter mit Schutzwiderständen. V = hochisolierte Hochspannungsklemme; O<sub>H</sub> = Erdklemme für HF-Messungen; O<sub>N</sub> = Erdklemme für NF-Messungen.



grossen Kondensators (nur für Wechselspannung), welche die Überspannung zu über - nehmen haben. Wird das Instrument durch einen ohmschen Widerstand geschützt, so ergibt sich eine gewisse Frequenzabhängigkeit der Anzeige. Ein Überschreiten der zulässigen Toleranz bei höheren Frequenzen wird durch eine entsprechende Anzapfung am Schutzwiderstand vermieden (Bild 6). Dabei ist noch darauf hinzuweisen, dass bei Messungen an Hochfrequenzapparaten die Gefahr einer Schädigung des Instruments durch Überschläge sehr gering ist.



## Die Spannungsmessung mit elektrostatischen Voltmetern von Ernst Singer

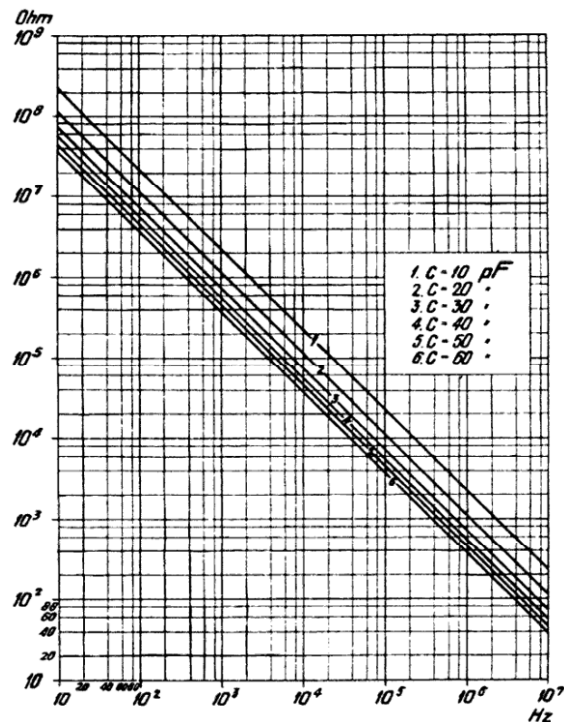


Bild 7. Grenzwerte derjenigen Schutzwiderstände, welche im Frequenzbereich von  $10 \dots 10^7$  Hz bei den wirksamen Kapazitäten von  $10 \dots 60 \text{ pF}$  zusätzliche Messfehler von  $-1 \%$  bewirken.

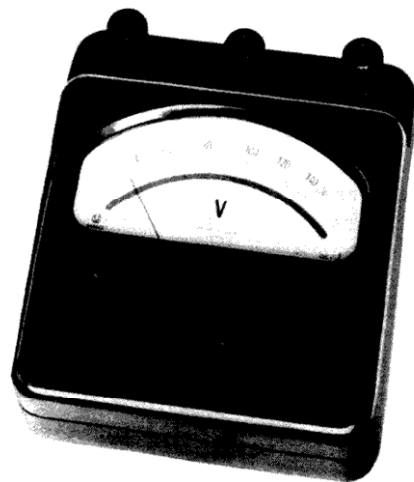
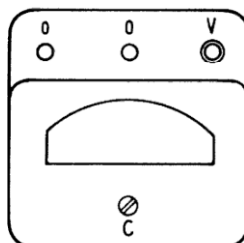


Bild 8a



Bilder 8a und 8b. Tragbares elektrostatisches Kontrollvoltmeter (Ausführung Trüb, Täuber & Co. AG, Zürich). V = Hochisolierte Hochspannungsklemme, 0 = Erdklemmen, C = Nullpunkt-korrektion.

Für die Wahl des Schutzwiderstandes entsprechend dem gewünschten Frequenzbereich ist Bild 7 massgebend.

## 4. Tragbare Voltmeter mit Duantenmesswerk

### a) Tragbare Kontrollvoltmeter für Bereiche zwischen 150 und 2000 V

Die Erkenntnis, dass ein elektrisches Messinstrument um so widerstandsfähiger gegen mechanische Beanspruchungen, wie Erschütterungen und Schläge beim Transport, ist, je leichter sein bewegliches System ist, führte zur Konstruktion kleiner elektrostatischer Voltmeter, wie in Bild 8 dargestellt.

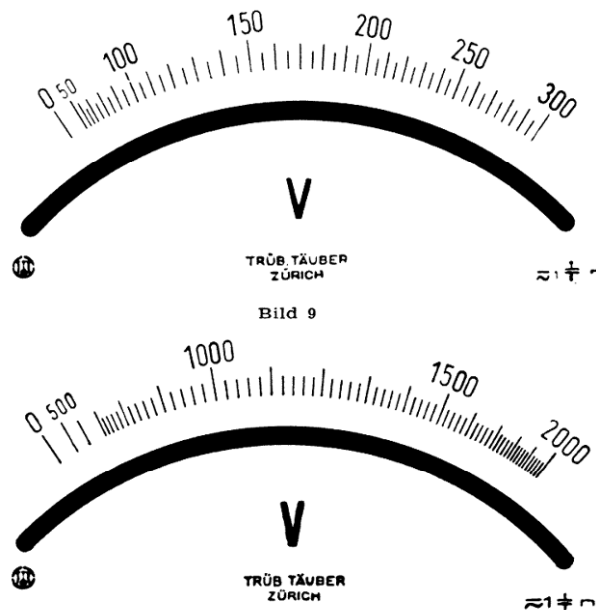
Bei einem Preßstoffgehäuse von nur 140 x 160 x 60 mm Abmessungen hat das Instrument eine Spiegelskala von ca. 70 mm Länge (Bilder 9 und 10), auf welcher ein Messerzeiger eine genaue Ablesung gewährleistet. Die garantierte Halbwertzeit beträgt mindestens einige Stunden Die charakteristischen Daten solcher Instrumente gibt Tab. 1 wieder.

Jedes Instrument ist nur für einen Messbereich ausgeführt, doch kann z. B. bei einem solchen mit Messbereich 0...150 V ein ohmscher Spannungsteiler mit einem Totalstrom von ca 0,3 mA verwendet werden, der folgende Zusatzmessbereiche gestattet: 0...300 V, 0...750 V und 0...1500 V. Der Spannungsteiler ist in einem Kästchen von ungefähr gleichen Abmessungen wie das Instrument eingebaut. Mit diesem ohmschen Spannungsteiler kann das Voltmeter bei einem zulässigen Anzeigefehler von 1 % des Messbereichendwerts bis zu 1000 Hz verwendet werden.

**Tabelle 1**

Kapazität beim Messbereich	Skalenanfang Skalenende		Schutzwiderstand und Grenzfrequenz rote Klemme schwarze Klemme	
	ca.	ca.		
0... 150 V	28 pF	48 pF	1 kΩ bis 40 kHz	200 kΩ bis 200 Hz
0... 300 V	26 pF	36 pF	1 kΩ bis 100 kHz	200 kΩ bis 500 Hz
0... 500 V	23 pF	27 pF	2 kΩ bis 50 kHz	200 kΩ bis 500 Hz
0...1000 V	20 pF	24 pF	5 kΩ bis 60 kHz	1 MΩ bis 300 Hz
0...2000 V	19 pF	21 pF	10 kΩ bis 40 kHz	1 MΩ bis 400 Hz

## Die Spannungsmessung mit elektrostatischen Voltmetern von Ernst Singer



Bilder 9 und . 10: Skalenbilder des Kontrollvoltmeters von Bild 8 in natürlicher Grösse.

Wenn auf die Messung von Gleichspannungen verzichtet und dafür bei höheren Frequenzen noch gemessen werden soll, bedient man sich eines kapazitiven Spannungsteilers (Bilder 11 und 12).

Der kapazitive Spannungsteiler kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$U = U' \left( 1 + \frac{C + C_1}{C_2} \right) \quad \text{u. daraus: } C_2 = \frac{U}{U - U'} (C + C_1)$$

- U = neuer gewünschter Messbereichendwert bei Vollausschlag;
- U' = bisheriger Messbereich des Instruments bei Vollausschlag;
- C = Kapazität des Instruments beim Skalenende (vgl. Tab. 1);
- C<sub>1</sub> = Kondensator parallel zum Instrument (C<sub>1</sub> > 100 C wählen!);
- C<sub>2</sub> = Vorkondensator.

### b) Tragbare Kontrollvoltmeter für höhere Spannungen (Bild 13):

Für höhere Spannungsmessbereiche werden die elektrostatischen Voltmeter in Holzgehäuse von ca. 160 X 165 X 130 mm mit Ledertragriemen eingebaut. Auch diese Ausführung ist mit einer Spiegelskala von ca. 110 mm Länge und Messerzeiger ausgestattet und entspricht den Genauigkeitsanforderungen der Klasse 1 der verschiedenen «Regeln» (VDE 0410, SEV-Publ.

156) für zeigende Messgeräte. Das Instrument weist nur zwei Klemmen auf, deren linke die Erdungsklemme ist, während auf die rechte, hochisolierte Duantenklemme ein ca. 1,5 m langes Hochspannungskabel mit Prüfspitze für 35 kV Prüfspannung aufgesteckt wird.

## Die Spannungsmessung mit elektrostatischen Voltmetern von Ernst Singer

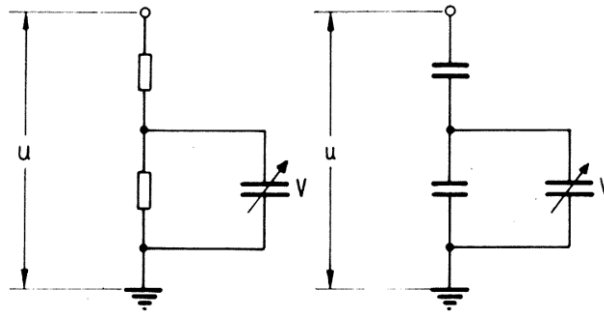


Bild 11

Bild 12

Bild 11. Elektrostatisches Voltmeter (V) mit ohmschem Spannungsteiler.  
 Bild 12. Elektrostatisches Voltmeter (V) mit kapazitivem Spannungsteiler.

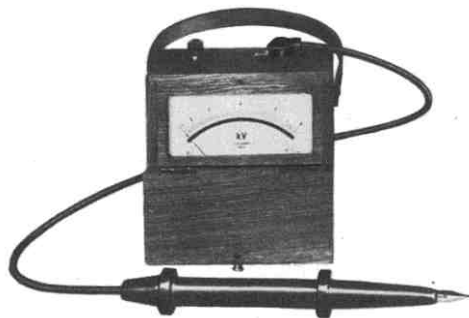


Bild 13. Tragbares elektrostatisches Voltmeter für 6 kV  
 (Ausführung Trüb, Täuber & Co. AG, Zürich).

Als Schutz gegen Überspannungen ist bei dieser Ausführung an Stelle eines Schutzwiderstandes eine Schutzfunkenstrecke eingebaut, welche im Gegensatz zur erstgenannten Schutzart den Frequenzbereich nicht einengt, bei niedrigen Spannungen jedoch nicht wirksam ist. Aus diesem Grunde können nur Voltmeter für höhere Spannungen mit einer Funkenstrecke ausgerüstet werden.

Die elektrischen Daten dieser Voltmeter sind in Tab. 2 aufgeführt.

**Tabelle 2**

Messbereich	Kapazität beim Skalenanfang	Obere Skalenende	Grenzfrequenz
0... 6 kV	ca. 7 pF	ca. 7,6 pF	ca. 300 kHz
0...18 kV	5 pF	5,4 pF	150 kHz

Das Instrument für 6 kV empfiehlt sich besonders für Messungen, wie sie bei der Fabrikation von Leuchtstoffröhren notwendig werden, während dasjenige für 18 kV in erster Linie für die Messung der Anodenspannung an Bildröhren für Fernsehempfänger mit 20 kV Prüfspannung (internationale Norm) geeignet ist. In beiden Fällen ist ja eine wirklich leistungslose Messung unerlässlich, wie sie bei so hohen Spannungen nur mit dem elektrostatischen Voltmeter möglich ist.

## c) Tragbare Laboratoriumsgeräte mit Lichtzeiger

(Bild 14)

Hier ist das Messwerk in dem üblichen Laboratoriumsgehäuse von ca. 205 x 280 x 120 mm (Preßstoff) eingebaut. Der Lichtmarkenzeiger spielt auf einer leicht gebogenen Skala von 150 mm Länge. Das Instrument genügt den Anforderungen der Instrumentenklasse 0,5. Das System ist mittels Spannband gelagert. Der Isolationswiderstand der hochisolierten Duantenklemme ist grösser als  $10^{14}$  Ohm und beträgt selbst bei Luft mit 70 % relativer Feuchtigkeit noch ca.  $10^{13}$  Ohm.

Da die zu messenden Spannungen meist kontrollierbar sind, werden diese Instrumente oft ohne Schutzwiderstand gebaut. In diesem Falle beträgt die obere Grenzfrequenz 5 MHz.



Bild 14. Elektrostatisches Laboratoriumsvoltmeter (Ausführung Trüb, Täuber & Co. AG, Zürich).

**Tabelle 3**

Mess-Bereich	Kapazität beim Skalenanfang	Skalenende	Obere Grenzfrequenz
0 .. 60V	35 pF	47 pF	5 MHz
0 .. 150V	26 pF	31 pF	5 MHz
0 .. 300V	20 pF	24 pF	5 MHz
0 .. 750V	14 pF	15 pF	5 MHz
0 .. 1500V	13 pF	13,5 pF	5 MHz
0 .. 3000V	13 pF	13,5 pF	5 MHz

Die Kapazitäten der Messwerke sind aus vorstehender Tab. 3 ersichtlich. Bei diesen Spannbandinstrumenten ist es durch besondere Vorkehrungen gelungen, die Übereinstimmung der Eichwerte für Gleich- und Wechselspannung soweit zu treiben, dass sie als Präzisionsinstrumente in Laboratorien wertvollste Dienste als sog. Transferinstrumente leisten können, besonders bei höheren Frequenzen. Unter Transferinstrumenten sind solche Instrumente zu verstehen, die es gestatten, einen mit grösster Genauigkeit mit Gleichstrom eingeeichten Skalapunkt oder -wert auf Wechselstrom zu transferieren. Diese Eigenschaft geht besonders deutlich aus der nachfolgenden Tabelle hervor, in welcher die vom «Eidg. Amt für Mass und Gewicht» gefundenen Prüfwerte zusammengestellt sind (Tab. 4):

**Tabelle 4.**

## Die Spannungsmessung mit elektrostatischen Voltmetern von Ernst Singer

Prüfung des Instrumentes mit Gleich- und Wechselspannung 50 Hz, Raumtemperatur 21° C

Teilstriche	Korrektur in Teilstrichen	
	Gleichspannung	Wechselspannung 50 Hz
120	+ 0,2 <sub>5</sub>	+ 0,2 <sub>5</sub>
110	+ 0,1 <sub>5</sub>	+ 0,1
100	+ 0,1 <sub>5</sub>	+ 0,1 <sub>5</sub>
90	+ 0,1 <sub>5</sub>	+ 0,2
80	ca. + 0,1	+ 0,1 <sub>5</sub>
70	ca. + 0,0	+ 0,0
60	- 0,0 <sub>5</sub>	- 0,0
50	- 0,1	- 0,1
40	+ 0,0	0
30	ca. + 0,1 <sub>5</sub>	ca. + 0
20	ca. + 0,2	ca. + 0

Auf Grund dieser guten Eigenschaften können diese Voltmeter auch ausserordentlich gut in Verbindung mit einem Nullinstrument als Leistungsmessernormale verwendet werden.

### 5. Das Messwerk des Schutzringeletrometers

Nachdem das auf Bild 4 dargestellte Messprinzip bereits um 1860 von W. Thomson (=Lord Kelvin) angegeben worden war, fügte er 1870 den Schutzring hinzu, womit ein brauchbarer Spannungsmesser entstand (Bild 15).

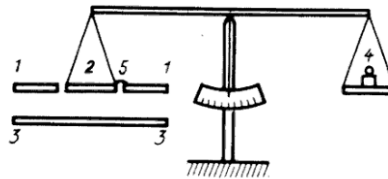


Bild 15. Elektrometerwaage für absolute Spannungsmessung. 1 = fester Schutzring, 2 = bewegliche Platte, 3 = feste Platte, 4 = Gegengewicht, 5 = Verbindung aus Litze oder Folie (Luftspaltbreite 1...5 mm).

Beim Schutzringeletrometer wird die zu messende Spannung zwischen zwei tellerförmigen parallelen Platten angelegt. Auf diese Weise entsteht zwischen den Platten ein praktisch homogenes elektrisches Feld. Eine kleine Scheibe (2) der einen Platte (1) ist beweglich angeordnet, so dass sie unter der Kraftwirkung dieses Feldes von der festen zweiten Platte (3) angezogen werden kann.

(3) Die Messung der Kraftwirkung kann dadurch erfolgen, dass, wie auf Bild 15, das bewegliche Scheibchen (2) mit einem Waagebalken verbunden wird, auf dessen Gegenseite durch Auflegen von Gewichten (4) der Gleichgewichtszustand der Ausgangslage wiederhergestellt wird (Kompensationsmethode). Eine andere Möglichkeit, die auftretende Kraft sichtbar zu machen, besteht darin, dass man, wie auf Bild 16, das Scheibchen (4)

## Die Spannungsmessung mit elektrostatischen Voltmetern von Ernst Singer

sich gegen eine Feder bewegen lässt und diese Bewegung mittels Spiegel und Lichtzeiger (3) auf eine Skala (5) übertragen wird (Ausschlagmethode).

Bild 17 stellt das letztgenannte Prinzip noch etwas deutlicher dar. Hinter einem konzentrischen Ausschnitt (3) in der feststehenden Messplatte (1) ist eine Fahne (5) an einem Spannband (4) unsymmetrisch drehbar aufgehängt. Bei steigender Spannung an den Elektroden (1) und (2) wird die Fahne in die Öffnung hineingezogen. Der Spiegel (6) wirft den Lichtstrahl der Lampe (7) auf die Skala (8). Die beiden Dämpfungsflügel (9) bewirken in den Luftkammern (10) die Dämpfung.

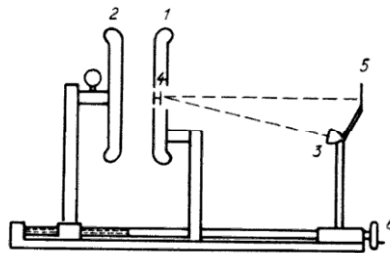


Bild 16. Schutzringeletrometer mit Lichtzeiger (Prinzip). 1 = fester Schutzring, 2 = feste Platte, 3 = Lichtquelle für Lichtzeiger, 4 = bewegliche Platte mit Spiegel, 5 = Milchglasskala, 6 = Handrad zum Verstellen der Platte 2 zur Änderung des Messbereiches.

Durch Verändern des Elektrodenabstandes  $a$  (Verschieben der Elektrode 2) kann innerhalb gewisser Grenzen jeder gewünschte Messbereich eingestellt werden. Abgesehen von einem konstanten Faktor gilt dabei immer die gleiche Eichkurve, so dass es genügt, das Gerät im niedrigsten Spannungsbereich absolut zu eichen.

## 6. Tragbare Voltmeter des Schutzringtyps für Hochspannungen (Bild 18)

Auf einem Sockel mit zwei Traggriffen ist unter Zwischenschaltung eines Isolierrohrs der Elektrodenträger montiert. Dabei ist eine Elektrode fest eingebaut und die zweite zur Einstellung verschiedener Messbereiche von Hand verschiebbar.

## Die Spannungsmessung mit elektrostatischen Voltmetern von Ernst Singer

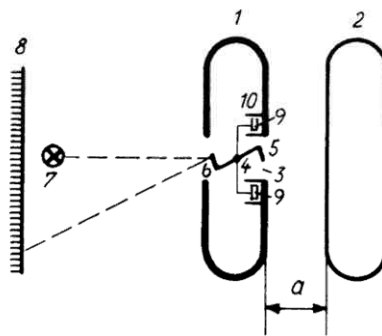
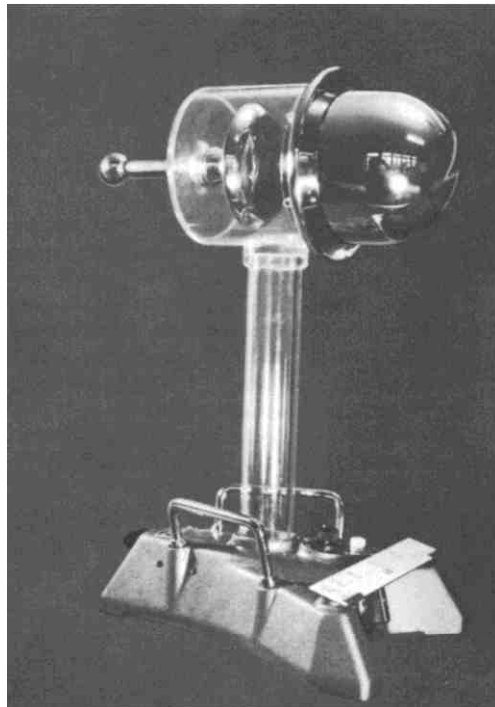


Bild 17. Prinzipieller Aufbau der Ablesevorrichtung von Bild 16, von oben gesehen im Schnitt.

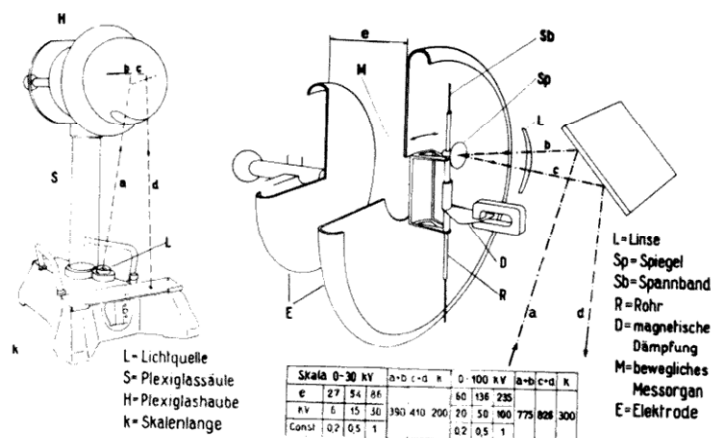


Bild 18b

Bilder 18a und 18b. Tragbares Schutzringvoltmeter (Ausführung Trüb, Täuber & Co. AG, Zürich).  
 a: Ansicht, b: Aufbau.

Die Einstellung der Distanz erfolgt mit Millimeterteilung und Nonius. Beide Elektroden sind von Erde isoliert und tragen je eine Anschlussbuchse, während sich am Sockel eine Erdungsklemme befindet. Die Beleuchtungseinrichtung für den Lichtmarken-



## Die Spannungsmessung mit elektrostatischen Voltmetern von Ernst Singer

zeiger ist ebenfalls im Sockel eingebaut. Der maximale Anzeigefehler beträgt  $\pm 0,5\%$  vom Messbereichendwert. Die übrigen Daten können der Tabelle 5 entnommen werden.

**Tabelle 5**

Mess- bereiche	Kapazität (total)	Obere Grenzfrequenz	Skala- länge
	ca.	ca.	
0... 3 kV	8 pF		
0... 6 kV	5,5 pF	30 MHz	200 mm
0... 15 kV	3,5 pF		
0... 30 kV	2,5 pF		
0... 20 kV	11,5pF		
0... 50 kV	6 pF	5 MHz	300 mm
0...100 kV	4 pF		

## 7. Hochspannungsvoltmeter für sehr hohe Spannungen (Bilder 19-22)

An Stelle von Kugelfunkenstrecken, bei denen ja definitionsgemäss die Meßspannung durch den Messvorgang verschwindet, können in Hochspannungslaboratorien und Prüfständen mit Vorteil elektrostatische Voltmeter der Bauart nach Bilder 19 und 22 verwendet werden.

In der unteren, geerdeten Elektrode ist ausser dem Kabelanschlusskasten ein induktiver Messwert-Ferngeber eingebaut, welcher als Federwaage ausgebildet ist und über ein Vorschaltgerät der Grösse 240 x 240 mm (Bild 20) die Übertragung des Messwertes über eine beliebige Entfernung auf ein Anzeigeeinstrument von 144 x 144 mm Frontrahmen-dimensionen (Bild 21) gestattet.

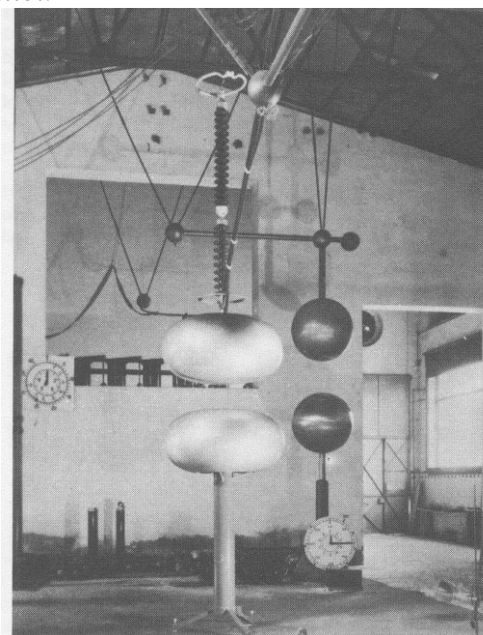


Bild 19: Hochspannungsvoltmeter (Ausführung Trüb, Täuber & Co. AG, Zürich).

## Die Spannungsmessung mit elektrostatischen Voltmetern von Ernst Singer

Die Fernmessanlage kann an das Lichtnetz als Speisequelle angeschlossen werden. Bild 22 zeigt den allgemeinen äusseren Aufbau einer solchen Messanlage. Durch eine Aufzugswinde mit Schneckenantrieb kann über zwei Umlenkrollen der genaue Elektrodenabstand an einem Maßstab mit Zeiger eingestellt werden.

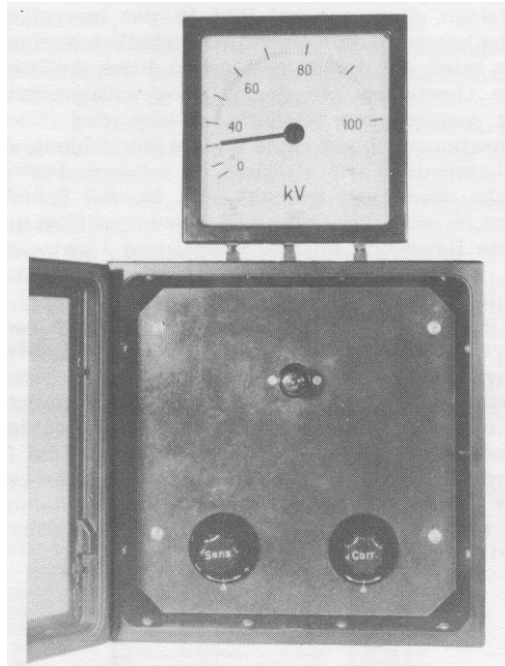


Bild 20. Unten: Vorschaltgerät mit Reguliereinrichtungen zu Empfangsinstrument, Bild 21. Oben: Empfangsinstrument zum Voltmeter, Bild 19.

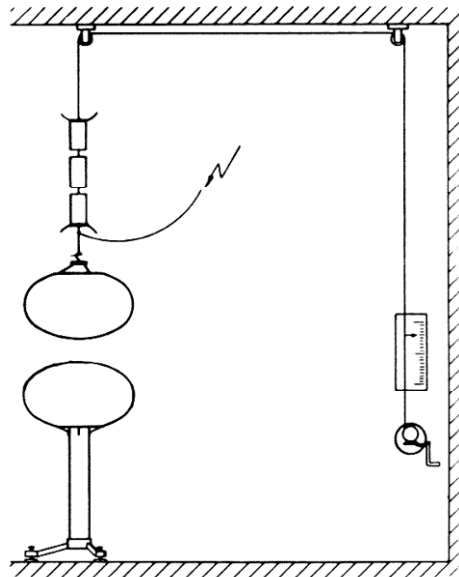


Bild 22. Allgemeiner äusserer Aufbau des Voltmeters nach Bild 19.

## Die Spannungsmessung mit elektrostatischen Voltmetern von Ernst Singer

Die höchste messbare Spannung beträgt normalerweise 600 kV, doch wurde auch schon eine ähnliche Ausführung für 1000 kV hergestellt. Die Anzeigegenauigkeit entspricht der Instrumentenklasse 1.

### 8. Die Anwendungsmöglichkeiten elektrostatischer Voltmeter

Da die elektrostatischen Voltmeter grundsätzlich bei Gleichstrom und bei Wechselstrom beliebiger Frequenz richtig zeigen und zudem die Messung praktisch leistungslos erfolgt, sind sie die geeigneten Instrumente für die Messung von Hochfrequenzspannungen, Potentialdifferenzen und statischen Aufladungen (z. B. in Papier- und Textilfabriken), sowie für Ionisationsmessungen (Röntgendosimeter). Besonders für die Messung von Gleich- und Wechselspannungen sehr kleiner Leistungen, wie bei Fernsehröhren, oder dort, wo die hohe Meßspannung eine direkte Messung mit anderen Instrumenten nicht erlaubt, sind elektrostatische Geräte unentbehrlich.

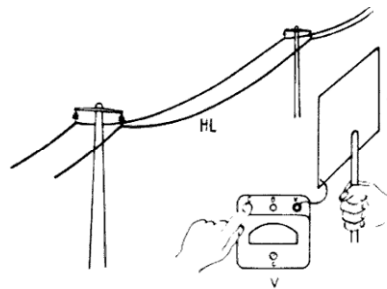


Bild 23. Nachweis von Hochspannung. HL = Hochspannungsleitung, S = Schirm, V = einpolig geerdetes Instrument.

Das gleiche gilt auch für Messungen an Spannungsquellen mit hohem Innenwiderstand. Ausserdem ist es mit elektrostatischen Instrumenten ohne weiteres möglich, Hochspannungen ohne metallische Berührung mit dem Leiter nachzuweisen oder die Spannung gegen Erde von isolierten metallischen Körpern, wie z. B. Blechdächern ohne Erdung, zu messen, die sich im Bereiche des elektrischen Feldes von Hochspannungsleitungen befinden. Das Vorgehen ist aus Bild 23 ersichtlich.

An einer Stange ist, gut von ihr isoliert, ein Blech von ca. 30 x 30 cm Fläche befestigt, welches mit der Hochspannungsklemme eines elektrostatischen Voltmeters leitend verbunden wird. Durch Berühren mit der Hand wird die Erdklemme des Instruments geerdet. Nähert man den Schirm einer unter Spannung stehenden Hochspannungsleitung, so erhält man bei noch sicherer Entfernung einen Zeigerausschlag am Instrument. Bei etwa 1m Entfernung von einer gegen Erde unter 20 kV Spannung stehenden Leitung erhält man z. B. ca. 150 V Anzeige. Diese Nachweismethode beruht auf der kapazitiven Spannungsteilung, indem Schirm und Leiter zusammen einen Vorkondensator zum Instrument bilden. In Verbindung mit einem Normalkondensator (Pressgaskondensator) genau bekannter Kapazität wird das elektrostatische Voltmeter auch zur Messung von Kapazitäten verwendet.

Grosse Widerstände können mit einer Anordnung nach Bild 24 durch Entladen eines Kondensators bekannter Kapazität und Messung der Entladezeit mit einer Stoppuhr gemessen werden. Für den zu messenden Widerstand gilt die Beziehung

## Die Spannungsmessung mit elektrostatischen Voltmetern von Ernst Singer

$$Rx = \frac{t}{(Ch + Cv) \cdot \ln\left(\frac{U1}{U2}\right)}$$

T in sec, C in Farad, R in Ohm

U1 und U2 sind hierin zwei gemessene Ladezustände des Kondensators C, zwischen deren Messung die Zeit t liegt. Am besten wählt man

$U2 = 36,8\%$  von U1, da dann die Grösse  $\ln\left(\frac{U1}{U2}\right)$  verschwindet.

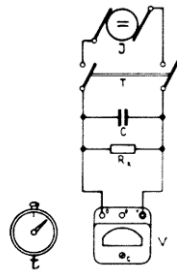


Bild 24

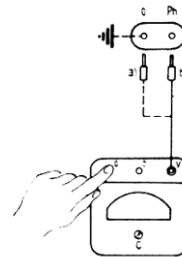


Bild 25

**Bild 24:** Messung sehr grosser Widerstände. J = Gleichstromquelle (Induktor), max. 600 V; T = Trennschalter; C = Messkondensator; Rx = zu bestimmender Widerstand; V = elektrostatisches Voltmeter; Z = Stoppuhr.

**Bild 25.** Aufsuchen des geerdeten Leiters in einem Netz; a) Stecker in geerdeter Klemme: kein Ausschlag am Instrument; b) Stecker in ungeerdeter Klemme: Instrument schlägt aus.

Eine weitere Anwendung elektrostatischer Voltmeter ist das Feststellen des geerdeten Leiters in einem Licht- oder Kraftverteilternetz nach Bild 25. Wenn die Duantenklemme der Reihe nach mit den Leitern verbunden und die Nadelklemme (Erdklemme) mit der Hand berührt wird, erkennt man den geerdeten Leiter daran, dass bei seinem Anschluss das Instrument ohne Ausschlag bleibt.

Wichtig bei elektrostatischen Instrumenten ist eine saubere Wartung. Insbesondere muss die hochisolierte Klemme sorgfältig vor Staub und Feuchtigkeit geschützt werden, da diese beiden Einflussgrössen den Isolationswiderstand wesentlich herabsetzen können. Bei Nichtgebrauch ist das Instrument stets an einem trockenen Ort zu lagern und sorgfältig vor dem Verstauben zu schützen.