Elektrometer

Unter besonderer Berücksichtigung der Konstruktionen für luftelektrische und radioaktive Messungen

Von

Professor Dr. G. Berndt
Privatdozent an der Technischen Hochschule Charlottenburg

Mit 74 Abbildungen

LEIPZIG
Verlag von Hachmeister & Thal
1921

Elektrometer

Unter besonderer Berücksichtigung der Konstruktionen für luftelektrische und radioaktive Messungen

Von

Professor Dr. G. Berndt
Privatdozent an der Technischen Hochschule Charlottenburg

Mit 74 Abbildungen

LEIPZIG
Verlag von Hachmeister & Thal
1921

II 33870

Sonderdruck aus
„Helios“, Fach- und Exportzeitschrift für Elektrotechnik
1920, Nr. 48, 49, 50 und 51.

Vorwort.

Während das Elektroskop der früheren Jahre ein wenig beachtetes Demonstrationsinstrument darstellte ist das moderne Elektrometer ein außerordentlich empfindliches und für viele Untersuchungen unersetzliches Meßinstrument geworden. Diese Umwandlung ist vor allem durch die Wiederbelebung der luftelektrischen Forschung, die Entdeckung der Radioaktivität und die Entwicklung ihrer Meßmethoden bedingt worden. Hierfür liegen jetzt eine ganze Reihe guter Konstruktionen vor. Da ihre Beschreibung aber auf viele Zeitschriften verstreut ist, war es selbst dem auf diesem Gebiete Bewanderten nicht immer leicht, die für den speziellen Zweck geeignete aufzufinden.

Das Manuskript der vorliegenden Zusammenstellung (ein Nebenergebnis meiner luftelektrischen Beobachtungen auf See und auf der südlichen Halbkugel), das nicht nur eine Beschreibung der verschiedenen Ausführungen, sondern auch Angaben über Empfindlichkeit, Meßbereich, Kapazität usw. enthält, lag gerade bei Kriegsausbruch druckfertig vor; wegen der Einstellung des »Helios« war aber eine Veröffentlichung zu jener Zeit ausgeschlossen. Als man dieser im Jahre 1919 wieder näher treten konnte, war ich bemüht, die in der Zwischenzeit erschienenen Konstruktionen, soweit sie mir irgend zugänglich waren, sinngemäß mit hineinzuarbeiten. Die Literatur ist bis etwa Mitte 1919 berücksichtigt.

Den einzelnen Firmen, welche mich durch Überlassung von Bildstöcken unterstützt haben, möchte ich auch an dieser Stelle meinen Dank ausdrücken.

Friedenau, Dezember 1920.

Berndt.

B-ka GPG
DG 35477/55

Inhaltsverzeichnis.

I. Einleitung. Seite

Elektroskop 5
Elektrometer von Braun 5
Elektrometer von Hankel 6
Quadrantelektrometer 6
Schaltung des Quadrantelektrometers 8
Messung von Stromstärken mit dem Elektrometer 9
Isolationsmaterialien 9

II. Elektrometer.

a) Gegenkraft: Die Schwerkraft.

Elektrometer von Exner und Elster und Geitel 11
Modifikation von Schering 13
Modifikation von Gerdien 14
Elektrometer mit zwei Meßbereichen von Gerdien 14
Registrierelektrometer von Le Cadet 15
Verbessertes Elektrometer von Braun 15
Modifikation von Bräuer 16
Modifikation von Haga 16
Elektrometer von Curie 16
Elektrometer von Schmidt 16
Goldblatt-Elektrometer von Wilson 18
Quarzfaden-Elektrometer von Wiechert 18
Einfaden-Elektrometer von Elster und Geitel 20
Kippelektrometer von Wilson 23
Elektrometer von Zeleny und Horton 25
Sinus-Elektrometer von Hubbard 26

b Gegenkraft: Die Biegungselastizität.

Zweifaden-Elektrometer von Wulf
mit Hilfskonduktor 27
als Registrierinstrument 33
als Oszillograph 34
als Vibrations-Elektrometer 35
Einfaden-Elektrometer von Wulf 35
Schaltungen des Einfaden-Elektrometers 37
Saiten-Elektrometer von Lutz.
1. Konstruktion 41
2. Konstruktion 43
Schulinstrument
als Registrierinstrument 47
Saiten-Elektrometer von Laby 49
Registrier-Elektrometer von Villard 49
Elektrometer von Eccles 51

c) Gegenkraft: Die Torsionselastizität. Seite
Quadrantelektrometer von Elster und Geitel 52
Quadrantelektrometer von Gerdien 54
Quadrantelektrometer von Schulze 55
Quadrantelektrometer von Dolezalek 56
Quadrantelektrometer von Paschen 58
Quadrantelektrometer von Kleiner und Mülly 59
Quadrantelektrometer von Compton 61
Quadrantelektrometer von Parson 61
Binanten-Elektrometer von Dolezalek
mit Zeigerablesung 62
Dinanten-Elektrometer von Hofmann 65
Elektrometer von Szillard,
1. Konstruktion 68
2. Konstruktion 68
Zeiger-Quadrantelektrometer von Hartmann & Braun 69
Torsionselektrometer von Crémieu 70
Torsionselektrometer von La Rosa 71
Torsionselektrometer von Folmer 73
Elektrometer von Barus mit interferentieller Messung 74
Registrier-Quadrantelektrometer von Elster und Geitel . . . 75
Registrier-Quadrantelektrometer von Ebert 75
Registrier-Quadrantelektrometer von Rudge 78
Registrier-Dolezalek-Elektrometer von Walker 79
Registrier-Quadrantelektrometer von Benndorf 80
Automatische Umschaltung von Sprung und Rempp . . . 81
Modifikation von Patterson 82
Aufladung des Quadrantelektrometers nach Erikson 83
Vibrationselektrometer von Curtis 83

d) Zusammenstellung der Angaben über die verschiedenen Elektrometer.
Tabelle der Spannungsempfindlichkeit, des Meßbereiches und der Kapazität 85
Spannungs- und Ladungsempfindlichkeit 86

1. Einleitung.

Zum Nachweis elektrischer Ladungen hat man sich von jeher der Elektroskope bedient, deren Urform das elektrische Doppelpendel ist, das aus zwei mit leitenden Fäden an einer isolierenden Stütze aufgehängten Holundermarkkügelchen besteht. Nach dem Grundgesetz der Abstoßung gleichnamig geladener Körper spreizen sich die beiden Fäden bei Mitteilung einer Ladung solange auseinander, bis die Schwerkraft der elektrischen Abstoßung das Gleichgewicht hält. Um die Empfindlichkeit zu steigern, setzte man den Einfluß der Schwerkraft durch Verwendung leichterer Körper (wie Strohhalme, Gold- und Aluminiumfolie) oder dreieckiger an Stelle rechteckiger Blättchen[1]) herab, die durch Einschließen in ein Glasgefäß gegen Luftströmungen geschützt wurden (Fig. 1).

Nach den Faradayschen Vorstellungen gehen von jedem positiv geladenen Körper Kraftlinien aus, welche auf benachbarten Leitern und Halbleitern enden. Die relative Bewegung von elektrisch geladenen Körpern gegeneinander erklärt man nun durch das Bestreben der Kraftlinien, sich in ihrer Längsrichtung zusammenzuziehen und senkrecht dazu abzustoßen. Der Kraftlinienverlauf und damit auch der Ausschlag des Elektroskopes werden demnach wesentlich durch in der Nähe befindliche Leiter und Halbleiter und noch mehr durch geladene Körper beeinflußt; das Elektroskop vermag aus diesem Grunde nur qualitative Angaben zu liefern. Eine weitere Störung kann durch Ladungen erfolgen, die sich bei mangelhafter Isolation auf den Glaswänden ansammeln.

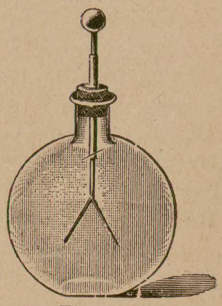


Fig. 1.

Nach Erkenntnis der Ursachen dieser Störungen war es leicht, sie durch Einbau der beweglichen Teile in ein Metallgehäuse zu vermeiden, da sämtliche Kraftlinien auf seiner Oberfläche enden und somit auch von außen kommende Kraftlinien nicht in das Innere eintreten können.

Vielfach hat man auch Elektroskope konstruiert, bei welchen nicht zwei Blättchen sich bewegen, sondern nur ein Blättchen von einer feststehenden Stange abgestoßen wird. Am bekanntesten ist wohl die zur Messung hoher Potentiale bestimmte Konstruktion von Braun[2]) (Fig. 2) geworden. Bei dieser ist in dem horizontalen Teile der zweimal gekröpften vertikalen Messingstange ein längliches rechteckiges Aluminiumblech zwischen Spitzen gelagert. Die Achse durchsetzt das Blech etwas oberhalb

---

[1]) G. Costanzo, Phys. ZS. **15**, 843, 1914.

[2]) F. Braun, Ann. d. Phys. **44**, 771, 1891.

seines Schwerpunktes. Als Gegenkraft gegen die elektrische Abstoßung dient auch hier wieder die Schwerkraft.

Die Faradayschen Vorstellungen weisen nun auch den Weg zu einer weiteren Steigerung der Empfindlichkeit durch Vergrößerung der Kraftliniendichte. Diese wird dadurch erzielt, daß man den Blättchen zwei nahe, geerdete Metallplatten gegenüberstellt, oder in weit stärkerem Maße dadurch, daß man zwischen zwei solchen, aber isolierten Platten (Fig. 3) ein starkes elektrisches Feld erzeugt, indem man sie an die beiden Pole einer Batterie von einigen hundert Volt anschließt (Elektrometer von Hankel[1]), das auf eine Konstruktion von Bohnenberger und Fechner zurückgeht). Hängt das Gold- oder Aluminiumblättchen genau in der Mitte zwischen ihnen, so befindet es sich in einer Art labilen Gleichgewichtes und schlägt bei der geringsten Elektrizitätszufuhr nach der entgegengesetzt geladenen Platte hin aus. Die Größe des Ausschlages wird mit Hilfe eines Mikroskopes mit Okularskala beobachtet. Das Instrument wird zu quantitativen Messungen geeignet, wenn man es in ein Metallgehäuse einschließt, das nur zwei gegenüberliegende kleine Fenster für das Mikroskop und die Beleuchtung besitzt.

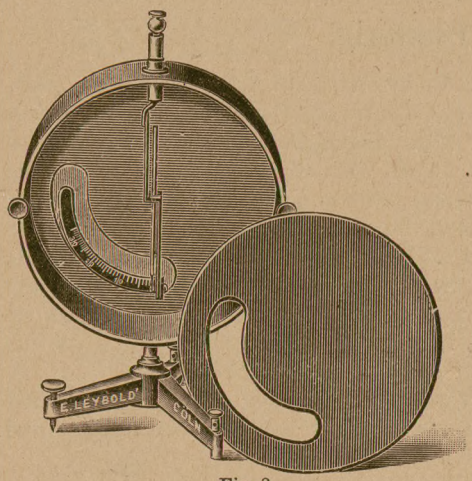


Fig. 2.

Auf demselben Prinzip der Bewegung des geladenen Körpers in einem äußeren elektrischen Felde beruht das auch — um drei Jahre ältere — Thomson-Mascartsche Quadrantelektrometer (Fig. 4). Es besteht im wesentlichen aus vier isoliert aufgestellten Quadranten, die man sich durch Zerschneiden einer leeren Blechbüchse nach zwei zueinander senkrechten Durchmessern entstanden denken kann. Je zwei diagonal gegenüberliegende Quadranten sind miteinander leitend verbunden. Innerhalb des Hohlraumes befindet sich eine flache, lemniskatenförmige Nadel aus dünnem Aluminiumblech, die mittels eines Aluminiumstiels an zwei Fäden bifilar aufgehängt ist; durch Änderung ihres oberen Abstandes wird die Empfindlichkeit reguliert. Der nach unten gehende Teil des Aluminiumstiels endet in eine Platinöse, welche in ein Gefäß mit konzentrierter Schwefelsäure taucht, der die Ladung durch einen Platindraht zugeführt wird. Die Schwefelsäure dient zugleich zur Dämpfung der Nadelbewegung und zum Trocknen des Elektrometers. Vielfach hat man auch

[1]) Hankel, Pogg. Ann. **103**, 209, 1858.

die Nadel (wie in Fig. 4) nur an einem Drahte aufgehängt; die Gegenkraft wird dann natürlich nicht durch die Schwerkraft, sondern durch die Torsion des Aufhängefadens gebildet. Nimmt man hierfür — ähnlich wie bei den D'Arsonval-Galvanometern — einen dünnen Metalldraht, so kann man die Ladung von oben her durch den auf einem Glasrohr sitzenden Torsionskopf zuführen und die mancherlei Unzuträglichkeiten mit sich bringende Schwefelsäure vermeiden. Das ganze Elektrometer wird natürlich von einem Metallmantel umschlossen.

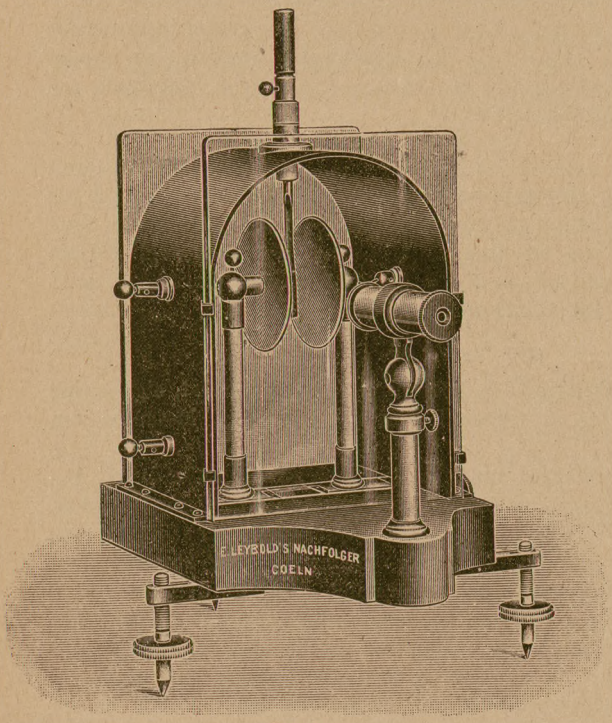


Fig. 3.

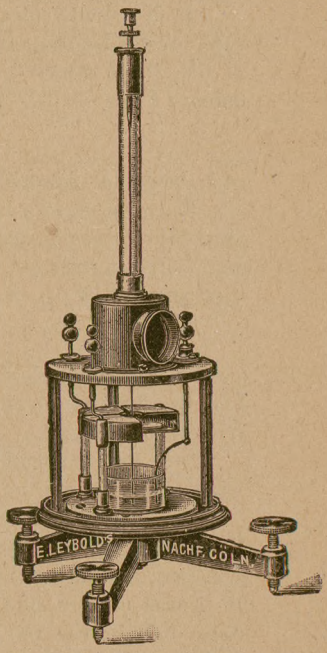


Fig. 4.

Bei geerdeten Quadranten (und horizontaler Aufstellung) steht auch die geladene Nadel immer in der Symmetrieebene ein. Existiert aber zwischen den beiden Quadrantenpaaren eine Potentialdifferenz, so dreht sich die Nadel um einen gewissen Winkel α, welcher mittels des an dem Aluminiumstiel angebrachten Spiegels mit Fernrohr und Skala beobachtet wird. Bezeichnet man die an die Quadrantenpaare und die Nadel gelegten Potentiale mit V_1, V_2 und V_N, so gilt die Beziehung[1])

$$\alpha = C \cdot (V_1 - V_2) \cdot [V_N - {}^1/_2 (V_1 + V_2)],$$

wo C ein Proportionalitätsfaktor ist.

[1]) S. z. B. H. Scholl u. W. Voege, Helios 1911, Nr. 21, 22, 24 u. 25.

Je nach der Größe des gesuchten Potentials (x) wendet man verschiedene Schaltungen an:

1. Quadrantenschaltung, für kleine x. Das gesuchte Potential wird an ein Quadrantenpaar gelegt ($V_1 = x$), das andere wird geerdet ($V_2 = 0$); an die Nadel kommt ein großes Potential (etwa 100 V). Dann ist

$$a = C \cdot x \cdot (V_N - {}^1/_2\, x).$$

Ist x klein gegen V, so ist angenähert a prop. x; es besteht aber keine strenge Proportionalität zwischen Potential und Ausschlag[1]).

2. Nadelschaltung, für große x. Das gesuchte Potential wird an die Nadel gelegt ($V_N = x$), die Quadranten werden durch eine in der Mitte geerdete Batterie auf entgegengesetzt gleiche Potentiale geladen ($V_1 = - V_2$). Für diesen Fall ist

$$a = 2\, C \cdot V_1 \cdot x$$

und somit der Ausschlag streng proportional dem Potential.

3. Doppelschaltung, für mittlere Werte von x. Das gesuchte Potential wird an ein Quadrantenpaar gelegt, das zugleich mit der Nadel verbunden wird ($V_1 = V_N = x$); das andere Quadrantenpaar wird geerdet ($V_2 = 0$). Die Gleichung lautet dann

$$a = {}^1/_2\, C \cdot x^2.$$

Da der Ausschlag dem Quadrat der Spannung proportional ist, eignet sich das Quadrantelektrometer in dieser Schaltung auch zur Messung von Wechselspannungen.

Der Proportionalitätsfaktor muß in jedem einzelnen Falle durch Anlegen einer bekannten Spannung (z. B. Normalelement) bestimmt werden.

Die Empfindlichkeit läßt sich bei der Quadrantenschaltung durch Vergrößerung von V_N nicht beliebig weit steigern, wie es zunächst den Anschein hat. Die obigen Formeln gelten nämlich nur für den Fall, daß die Nadel bei der Bewegung von den Quadrantenflächen stets gleichen Abstand behält, was nur möglich ist, wenn diese genau eben und horizontal sind und die Nadel sich um eine genau vertikale Achse dreht, alles Bedingungen, die sich praktisch nie vollkommen erfüllen lassen. Aus diesem Grunde ist der Ausschlag auch nie genau proportional V_N; bei zu großer Ladung nimmt die Nadel überhaupt keine stabile Lage mehr ein.

Im Vorstehenden sind die drei Typen von Elektrometern: Blättchenelektrometer mit zwei oder einem beweglichen Teile, Hankelsches und Quadrantelektrometer, wie sie bis etwa Mitte der achtziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts in Gebrauch waren, kurz geschildert. Mit dem Jahre 1886 setzte nun auf Anregung von Exner in Wien eine neue Periode luftelektrischer Messungen ein, die in Deutschland vollständig vernachlässigt worden waren. Die von Exner aufgestellte — hier uns nicht weiter interessierende — Theorie verlangte zahlreiche Messungen des

---

[1]) Wie leicht ersichtlich, ist aber das arithmetische Mittel der kommutierten Ausschläge proportional x.

atmosphärischen Potentialgefälles[1]) an möglichst verschiedenen Stellen der Erde und auch im Ballon. Dazu war ein leicht transportables, im Gelände ohne Schwierigkeit jederzeit aufzustellendes Elektrometer, mit guter Isolation und von geringem Gewicht, mit einem Meßbereich von einigen hundert Volt erforderlich, das Exner durch Umkonstruktion des Blättchenelektrometers schuf. Eine weitere Forderung wurde an die Elektrometer gestellt, als nach dem Vorgange von Elster und Geitel (die frühere Versuche von Linß seit 1887 wieder aufnahmen) die Zerstreuung der Elektrizität durch die in der Luft enthaltenen Ionen messend verfolgt wurde. Beobachtet man an einem mit einem Zerstreuungskörper (z. B. einem Draht) verbundenen Elektrometer in t sec einen Potentialverlust dV, so haben die Ionen während dieser Zeit die Elektrizitätsmenge

$$Q = C \cdot dV$$

neutralisiert, falls C die Kapazität der Anordnung bedeutet. Um nun bei gegebener Ionisierung der Luft, d. h. bei gegebenem Q, in kurzer Zeit einen meßbaren Rückgang des Ausschlages zu erhalten, muß die Kapazität klein gehalten werden. Die Messungen der Leitfähigkeit der Luft und ihres Ionengehaltes verlangen also Elektrometer von möglichst hoher Ladungsempfindlichkeit, d. h. kleiner Kapazität und großer Spannungsempfindlichkeit.

Einen weiteren Aufschwung nahmen die elektrometrischen Messungen seit der Entdeckung der radioaktiven Substanzen durch Becquerel im Jahre 1896. Das einzige quantitative Meßverfahren hierfür beruht auf ihrer Eigenschaft, die Luft durch die von ihnen ausgesandten Strahlen zu ionisieren. Befinden sich demnach radioaktive Substanzen in einem geeigneten Luftkondensator oder treten die von ihnen ausgesandten Strahlen in diesen ein, so entsteht zwischen seinen Belegungen unter dem Einfluß einer an diese gelegten Potentialdifferenz ein elektrischer Strom. Diese Ströme sind aber selten so stark, daß es möglich ist, sie mit einem (selbst hochempfindlichen) Galvanometer zu messen. Für Ströme der Größenordnung 10^{-15} bis 10^{-16} A, wie sie hier häufig auftreten, bleibt nur die elektrometrische Messung. Der Strom i bestimmt sich aus der Gleichung

$$i = Q/t = C \cdot dV/t.$$

Auch die radioaktiven Messungen verlangen also hochempfindliche Elektrometer geringer Kapazität. Dazu kommt ferner noch die Forderung einer guten Isolation, damit nicht der über die Isolatoren abfließende Strom von derselben Größe oder gar stärker ist als der zu messende.

Als Isolationsmaterialien[2]) stehen — da Glas sich leicht mit einer Feuchtigkeitsschicht überzieht und dadurch zum Leiter wird — Ebonit, Siegellack, Schwefel, Bernstein und geschmolzener Quarz zur Verfügung. Ebonit läßt sich zwar leicht bearbeiten, wird aber unter dem

---

[1]) Das atmosphärische Potentialgefälle ist die zwischen einem in 1 m Höhe über ebenem Boden gelegenen Punkte der Luft und der Erdoberfläche herrschende Potentialdifferenz in Volt.

[2]) s. G. W. C. Kaye, Proc. Phys. Soc. London, **23**, 209, 1910.

Einfluß des Sonnenlichtes (durch Bildung von Schwefelsäure) zu einem Leiter. Das Isolationsvermögen läßt sich durch Abputzen mit Schlemmkreide wieder herstellen. Zweckmäßig überzieht man den Ebonit mit Firnis. Aus diesen Gründen wird Ebonit in neuerer Zeit bei Elektrometern kaum noch verwendet; das gleiche gilt vom Siegellack, der wegen des Schellackgehaltes stets hygroskopisch ist. Er kann dagegen bei improvisierten Instrumenten zuweilen nützliche Dienste leisten, wenn man eine gute Qualität verwendet und ihn nicht so hoch erhitzt, daß er zu brennen beginnt und dadurch Kohlenstoff abscheidet.

Der in England und Frankreich mit Vorliebe benutzte Schwefel hat den Vorteil, daß er leicht in beliebige Formen gegossen werden kann. Er isoliert ausgezeichnet, wenn er beim Schmelzen, das in sauberen Gefäßen zu erfolgen hat, nur gerade bis zum Schmelzpunkt erhitzt wird. Die Isolation nimmt aber im Laufe der Zeit, namentlich bei Sonnenbestrahlung, immer mehr ab. Aus diesem Grunde verwendet man in Deutschland fast ausschließlich (nach einem Vorschlag von Quincke) Bernstein, der, wenn es sich um Naturstücke handelt, ein ausgezeichneter Isolator ist[1]). In feuchtem Klima muß man seine Oberfläche durch Abreiben mit Wiener Kalk und Alkohol von Zeit zu Zeit reinigen und eventuell frisch polieren. Ein sehr gutes Isolationsvermögen besitzt der in der Knallgasflamme geschmolzene, geschliffene und polierte Quarz[2]). Entfernt man die vom Polieren herrührende, schwach leitende Oberflächenschicht durch Auskochen in Salz- und dann in Salpetersäure mit darauffolgendem Waschen in Wasser und absolutem Alkohol, so isoliert er ebensogut wie echter Bernstein (und ist übrigens auch nicht teurer als dieser). Durch Reinigen mit Wasser oder in schlimmeren Fällen durch Einlegen in kalte Salpetersäure und nachfolgendes Waschen mit destilliertem Wasser und absolutem Alkohol läßt sich das Isolationsvermögen leicht immer wieder herstellen. Quarz wird außerdem durch Luftfeuchtigkeit und Temperaturänderungen nicht beeinflußt und erleidet vor allem auch bei stärkerer Abkühlung keine bleibende Zusammenschrumpfung. Die Verwendung des geschmolzenen Quarzes bei hochempfindlichen Elektrometern kommt deshalb auch immer mehr in Aufnahme. Um die Isolatoren dem Einfluß des Lichtes, des Staubes und einer etwaigen Berührung zu entziehen, werden sie nach Möglichkeit geschützt eingebaut.

Die große Reihe der durch den Aufschwung der luftelektrischen und radioaktiven Forschungen veranlaßten Elektrometerkonstruktionen läßt sich auf drei Grundprinzipien, je nach der Art der den elektrischen entgegenwirkenden Kräfte, zurückführen. Diese sind entweder 1. die Schwerkraft oder 2. die Biegungselastizität oder schließlich 3. die Torsionselastizität eines Aufhängefadens oder einer Spiralfeder. Während die erste und dritte Klasse an die früher beschriebenen Typen (Blättchen- und Quadrantelektrometer)

---

[1]) Das Isolationsvermögen der aus einzelnen Stücken zusammengepreßten Stangen (Ambroid) ist wesentlich geringer.

[2]) s. C. W. Lutz, Physik. ZS. **17**, 620, 1916. Der aus Schmelzöfen stammende Quarz isoliert (wegen des aufgenommenen Kohlenstoffs) nicht so gut.

organisch anknüpfen, tritt bei den Instrumenten der zweiten Klasse ein neues wesentliches Element auf.

2. Elektrometer.

a) Gegenkraft: Die Schwerkraft. Die Grundform der heute noch gelegentlich bei luftelektrischen Messungen verwendeten Blättchenelektrometer ist die Konstruktion von Exner[1]), die in der von Elster

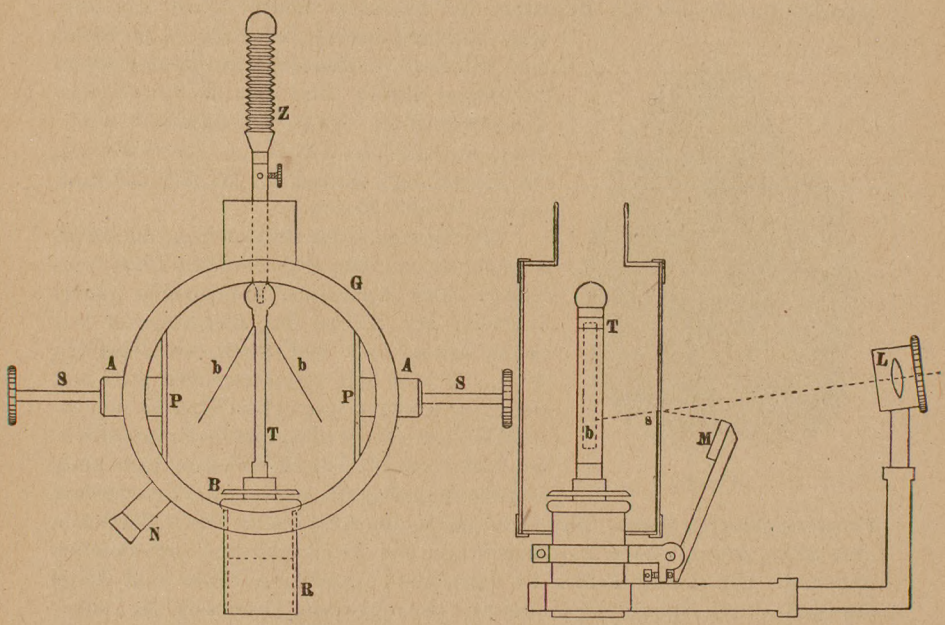


Fig. 5.

und Geitel[2]) verbesserten Form (Fig. 5) beschrieben werden soll. Sie besteht aus einer etwa 3 cm hohen Messingtrommel *G*, deren Basisflächen durch Glasplatten geschlossen sind. Der Bernsteinisolator für den Blättchenträger *T* ist in das Rohr *R* eingebaut und somit (im Gegensatz zur ursprünglichen Exnerschen Konstruktion) ganz in das Innere des Gehäuses verlegt worden. Um ihn ferner gegen Staub und Licht zu wahren, befindet sich unmittelbar darüber die dünne Messingplatte *B*; sie schützt gleichzeitig die Blättchen gegen die Influenz einer etwaigen Polarisationsladung des Isolators[3]). Der an diesem befestigte Blättchenträger *T*, eine flache Messingstange, setzt sich nach oben in eine kugelförmige Verdickung fort, in deren konische Bohrung ein Stift mit Klemmschraube oder auch (wie in der Fig.) eine

---

[1]) F. Exner, Wien. Ber. **95**, 1084, 1887.
[2]) J. Elster u. H. Geitel, Physik. ZS. **1**, 11, 1899; **4**, 137, 1902.
[3]) s. auch E. Hochheim, Physik. ZS. **10**, 51, 1909 u. A. S. Russell, Phil. Mag. **19**, 278, 1910.

isolierte Ladesonde *Z* eingesetzt wird. Bei Nichtgebrauch wird die obere Öffnung durch einen Deckel verschlossen. Die etwa 3 mm breiten Aluminiumblättchen *b* werden mit einem Tropfen Gummilösung an der oberen ebenen Verdickung von *T* befestigt. Beim Transport werden die Schutzbacken *PP* mittels der in den Zylindern *AA* geführten Stangen *S* bis an einen Anschlag des Blättchenträgers herangeschoben. Sie verhindern so eine größere Bewegung der Blättchen, ohne sie doch direkt zu berühren. Der Isolationsverlust beträgt in 24 Stunden höchstens $^1/_5$ der Anfangsladung. Damit sich der Bernstein bei feuchtem Wetter nicht mit einer Haut vonkondensierter Flüssigkeit überzieht, muß die Luft im Innern getrocknet werden. Zu diesem Zweck setzt man an das seitliche Ansatzrohr *N* ein kleines Glasgefäß mit einem Stück metallischen Natriums. Dieses Prinzip der Trocknung[1]) werden wir bei allen Elektrometern wieder finden.

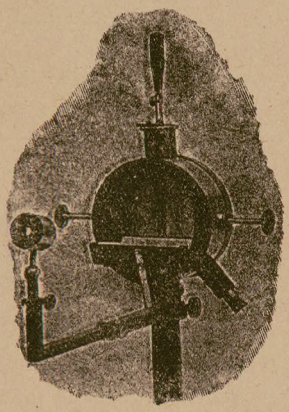


Fig. 6.

Die Spreizung der Blättchen erfolgt durch Abstoßung von dem feststehenden Blättchenträger. Das Exnersche Elektroskop gehört demnach zur Klasse der Elektrometer mit einem beweglichen und einem feststehenden Teile, nur daß hier gewissermaßen zwei solcher Anordnungen symmetrisch zueinander gestellt sind, wodurch die doppelte Empfindlichkeit erzielt wird[2]). Die Ablesung der Spreizung erfolgte ursprünglich an einer auf das vordere Fenster geklebten Skala. Wegen der durch den Abstand zwischen Blättchen und Skala verursachten Parallaxe waren die Beobachtungen aber ziemlich ungenau. Um diesen Fehler zu vermeiden, projizieren Elster und Geitel die Skala durch Spiegelung an den Ort der Blättchen. Dazu wird die Innenseite des vorderen Fensters bis zur Linie *s* versilbert. Die von einem beweglichen Halter getragene Skala wird so aufgestellt, daß ihr oberer Rand *M* ebensoweit vor dem Spiegel liegt wie die Vorderkante der Blättchen dahinter. Ihr hier entstehendes Bild wird durch die in horizontaler und vertikaler Richtung verschiebbare Lupe *L* beobachtet[3]). Die äußere Form des Instrumentes zeigt Fig. 6.

---

[1]) Das auch zum Trocknen vorgeschlagene Kalziumkarbid scheint keinen Eingang in die Praxis gefunden zu haben.

[2]) Einen ähnlichen Vorschlag macht Benoist (C. R. **23**, 171, 1896). Er verwendet statt des starren Blättchenträgers und der zwei Blättchen drei Stück, von denen das mittlere stets vertikal bleibt und als Lot dient. Gegenüber der um 9 Jahre älteren Konstruktion von Exner bedeutet dieser Vorschlag keine Verbesserung, da die drei Blättchen leicht der Beschädigung durch Aneinanderhaften ausgesetzt sind.

[3]) Bei dieser Konstruktion besteht der Übelstand, daß bei kleinen Bewegungen des Auges verschieden entfernte Punkte der Blättchen mit dem Spiegelrande zusammenfallen, während die Skalenteile äquidistant bleiben, wodurch Ablesefehler entstehen. Deshalb schlugen L. u. A. Boltzmann (Physik. ZS. **6**, 2, 1905) vor, den Rändern der Skala und der Spiegelbelegung die Form eines Kreisbogens zu geben, dessen Zentrum in gleicher Höhe mit der Durchschnittslinie der Blättchenebene liegen sollte, während die Skalenstriche nach diesem Punkte hin konvergierten. Dieser Vorschlag ist aber wohl nie praktisch ausgeführt worden.

Die Kapazität des Elster- und Geitelschen Elektrometers beträgt 5 bis 10 cm, die mittlere Empfindlichkeit (die natürlich von der Blättchendicke abhängt) etwa 7 V/Skt. Die Instrumente sind erst von rund 40 V ab zu benutzen; ihr Meßbereich erstreckt sich über 30 Skt., also etwa bis 250 V. Die Eichkurve eines Instrumentes ist in Fig. 7 und Tabelle I wiedergegeben.

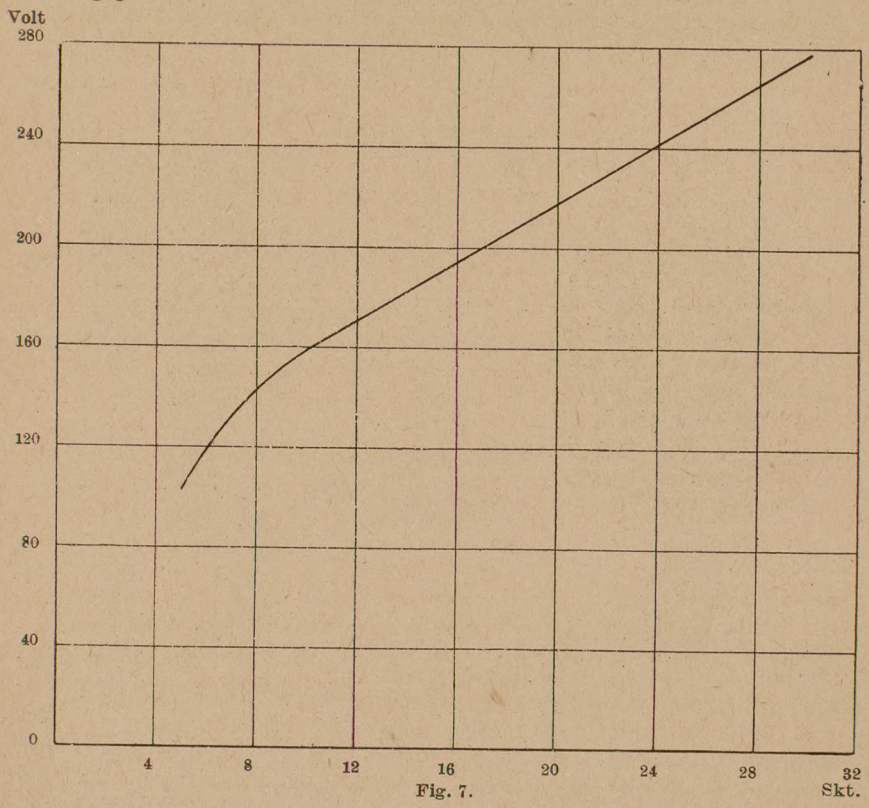


Fig. 7.

Tabelle I.

Skt.	5	10	15	20	25	30
Volt	101	159	189	219	248	278
Diff.	58	30	30	29	30	

Wie man sieht, verläuft die Eichkurve mit Ausnahme des Teiles für die ersten 10 Skt. linear.

Für spezielle Zwecke hat das Elektrometer von Elster und Geitel gewisse Umänderungen erfahren. So hat Schering[1]) das zylindrische Ge-

[1]) H. Schering, Diss., Göttingen 1904.
Von Schering rührt auch das Verfahren her, die Isolatoren mit tiefen schmalen Nuten zu versehen, um ihre Oberfläche zu vergrößern (Physik. ZS. 5, 451, 1904).

häuse durch ein trapezförmiges ersetzt (Fig. 8), um das Luftvolumen und damit auch den Ladungsverlust durch die von der durchdringenden Strahlung gebildeten Ionen auf etwa die Hälfte zu verkleinern. Die Kapazität beträgt in dieser Ausführung nur 2,8 cm. Wegen der schwierigen Herstellung wird aber diese Form kaum verwendet.

Um das Elektrometer direkt als Zerstreuungsraum, namentlich bei der Untersuchung der aus der Atmosphäre auf einem geladenen Draht nieder-

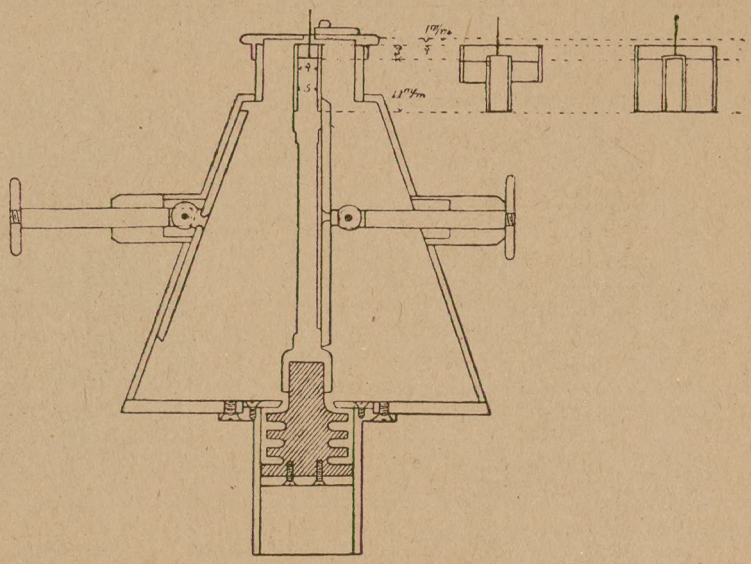


Fig. 8.

geschlagenen radioaktiven Substanzen (*Ra A* und *Th A*) benutzen zu können, verwendet Gerdien[1]) ein parallelpipedisches Gehäuse (Fig. 9) von 8 × 10 cm² Grundfläche und 10 cm Höhe. Ein viereckiger Rahmen, auf welchen der exponiert gewesene Draht aufgewickelt wird, wird von oben durch den aufklappbaren Deckel eingesetzt. Damit dies möglich ist, sind die Schubstangen für die Schutzbacken nach unten verlegt. Die Empfindlichkeit wird durch die Einführung des Rahmens mit dem Drahte etwas erhöht, doch ist die neue Eichkurve gegen die des gewöhnlichen Elektrometers nur parallel verschoben.

Da der Meßbereich der Blättchenelektrometer bei der Messung des Potentialgefälles nicht immer ausreicht und die Mitführung eines zweiten unempfindlicheren Instrumentes, zumal bei Messungen im Ballon, mit Schwierigkeiten verknüpft ist, konstruierte Gerdien[2]) ein Elektrometer mit zwei Meßbereichen (Fig. 10). An dem 10 cm hohen Blättchenträger sind unten zwei Blättchen aus dünner Aluminiumfolie angebracht, deren

---

[1]) H. Gerdien, Physik. ZS. 6, 433, 1904.
[2]) H. Gerdien, Gött. Nachr. 1904, S. 277.

Länge so bemessen ist, daß sie niemals anschlagen können. Darüber befinden sich zwei dickere und etwas längere Blättchen. Die Meßbereiche betragen 40 bis 300 bezw. 280 bis 800 V, was in den meisten Fällen ausreichend ist. Die Isolierung erfolgt bei diesem Instrument von oben durch genuteten Ebonit. Es stände aber nichts dem im Wege, sie in ähnlicher Weise wie bei dem Elster- und Geitelschen Elektrometer zu verbessern.

Natürlich lassen sich die Blättchenelektrometer auch als Registrierinstrumente verwenden. Bei der Konstruktion von Le Cadet[1]) werden die Blättchen von hinten durch ein nahezu paralleles Lichtbündel beleuchtet

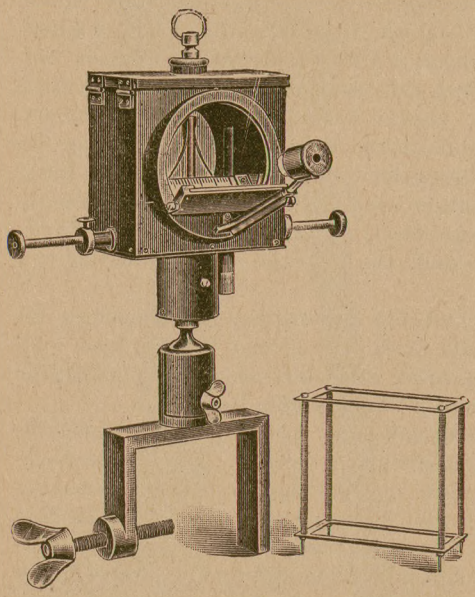


Fig. 9.

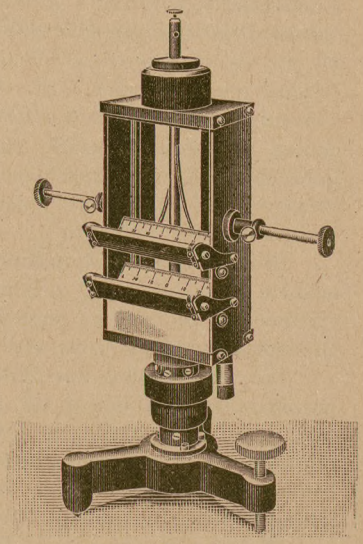


Fig. 10.

und mittels einer Linse durch einen horizontalen Spalt von 0,2 mm Breite auf eine horizontale Trommel projiziert, die sich mit einer Geschwindigkeit von 15 mm/h dreht.

Durch Verlegung der Bernsteinisolation in das Innere des Elektrometers und die Anbringung der Natriumtrocknung ist auch das Braunsche Elektrometer von Elster und Geitel verbessert worden. Wegen seines großen Meßbereiches, der sich bis 1500, 4000 oder 10 000 V erstreckt, kann man es vorteilhaft zur Messung sehr großer Potentialgefälle verwenden, wie sie bei Gewittern und Niederschlägen auftreten[2]). Eine namentlich für

---

[1]) G. Le Cadet, C. R. **134**, 745, 1902.

[2]) Der Meßbereich des Braunschen Elektrometers läßt sich wesentlich, auf 10 bis 100 000 V erhöhen, wenn man das Elektrometer in ein Druckgefäß setzt, da dadurch trotz kleinerer Dimensionen Strahlungsverluste und die Möglichkeit von Funkenentladungen vermieden werden. Die Empfindlichkeit ist innerhalb weiter Grenzen vom Druck unabhängig (C. E. Guye und A. Tscherniarsky, Arch. sc. phys. et nat. (4) **35**, 593, 1913).

Vorlesungszwecke sehr brauchbare und empfindliche Form erhält man nach Bräuer[1]), wenn man das bewegliche Aluminiumblech durch einen dünnen versilberten Glasfaden von 54 mm Länge ersetzt. Die etwas oberhalb seines Mittelpunktes angekittete Achse, welche gleichfalls aus einem dünnen Glasfaden besteht, ruht in einer Gabel aus vergoldetem Messingdraht, der durch Bernstein isoliert ist. Bei dem geringen Gewicht des beweglichen Systems von 0,1 bis 0,3 mg erhält man eine Empfindlichkeit von 2 bis 3 V/Skt. Die Kapazität beträgt 4 cm.

Etwa dieselbe Empfindlichkeit erhält man, wenn man die bei der Originalkonstruktion in Spitzen gelagerte Achse durch ein feines Metallbändchen oder -draht ersetzt. So benutzt Haga[2]) ein 27 mm langes Silberbändchen von 170 × 7 μ, an welches die aus einem 0,05 mm dicken Aluminiumblättchen geschnittene Nadel, die durch eine Längsfurche versteift ist, mit einem Tröpfchen Schellack angekittet wird, das durch Goldbronze leitend gemacht wird. Die Empfindlichkeit wird durch Änderung des Schwerpunktabstandes (mittels Abschneidens oder Beschwerung) vom Drehpunkt geändert. Zu große Ausschläge werden durch zwei im Gehäuse angebrachte federnde Anschläge verhindert, die zum Schutz gegen Entladung mit Glasröhrchen überzogen sind. Das Instrument ist namentlich zur Demonstration gedacht.

Die mangelnde Empfindlichkeit des Braunschen Elektrometers für größere Ausschläge (bei welchen die Skalenteile kleiner werden) kann man erhöhen, wenn man an derselben Achse zwei oder mehrere (n) bewegliche Blättchen anbringt[3]); sie wird dann $n^{3/2}$ mal größer[4]).

Für die Messung des Potentialgefälles ist die Elster- und Geitelsche parallaxenfreie Ablesung im allgemeinen ausreichend. Bei der Beobachtung von Elektrizitätszerstreuungen und Sättigungsströmen schwacher radioaktiver Substanzen würde aber die Ablesung zu ungenau werden. Man beobachtet in diesem Falle den Ausschlag bezw. die Abnahme des Ausschlages besser mit einem Mikroskop mit Okularmikrometer, wie z. B. bei dem Elektrometer von Curie (Fig. 11)[5]). Wegen des beschränkten Gesichtsfeldes kann man naturgemäß nur ein Blättchen und auch dieses nur innerhalb eines kleinen Intervalles beobachten, das man zweckmäßig in dem linearen Teile der Eichkurve wählt. Wegen des Fortfallens des zweiten Blättchens kann man das Luftvolumen auf die Hälfte verkleinern.

Das von Schmidt bei seinem Apparat[6]) zur Untersuchung von Quellwässern benutzte Elektrometer (Fig. 12) weist gegenüber dem Curieschen einige Verbesserungen auf. Eine Schutzbacke erleichtert wie bei dem Elster-

---

[1]) P. Bräuer, ZS. f. physik. u. chem. Unt. **27**, 232, 1914.
[2]) H. Haga, Physik. ZS. **18**, 275, 1917.
[3]) E. Békefy, ZS. f. Instrkd. **18**, 151, 1917.
[4]) Nur der Vollständigkeit halber sei hier das Vorlesungs-Elektroskop von J. A. Fleming (Electrician **75**, 286, 1915) erwähnt, bei welchem ein Aluminiumblech mittels zweier leitender Fäden an einem breiten Messingstreifen aufgehängt ist, und das bis 10 000 oder 20 000 V brauchbar ist.
[5]) P. Curie, Radioaktivität, Bd. 1, S. 77. — Der in der Figur rechts sichtbare Kondensator dient zur Aufnahme der radioaktiven Substanz und wird durch eine der unten stehenden Schutzkappen metallisch abgeschirmt.
[6]) H. W. Schmidt, Physik. ZS. **6** 561, 1905.

und Geitelschen Instrument den Transport. Ferner sind Elektrometer *E* und Mikroskop fest miteinander verbunden. Beobachtet wird der Schnittpunkt des Blättchens mit einem horizontalen Strich in der Okularskala. Wegen der mit dem Elektrometer fest verbundenen (uns hier nicht interessierenden) Ionisierungskammer *Z* kann die Ladung des Elektrometers nicht in der üblichen Weise, von oben her, erfolgen; sie geschieht deshalb mit einem die Vorderwand durchsetzenden gebogenen Messingdraht[1]).

Bei der mikroskopischen Ablesung machen sich nun aber auch sehr kleine Unregelmäßigkeiten des Blättchenrandes störend bemerkbar; schon bei

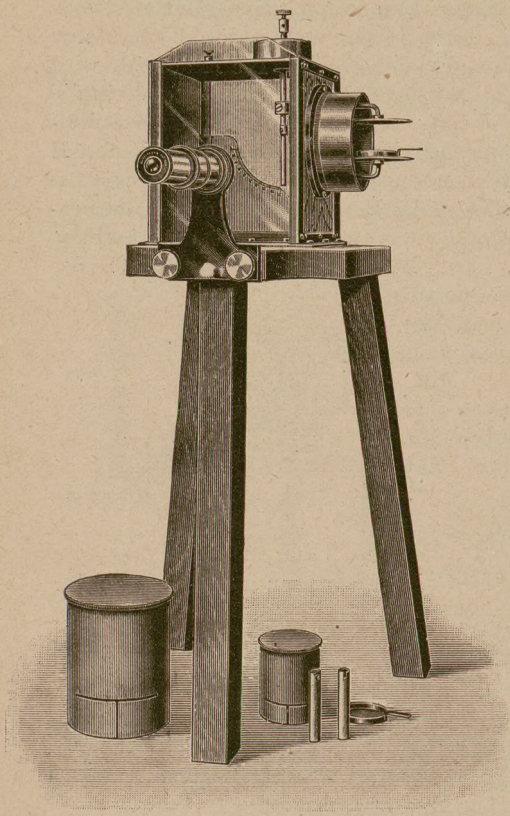


Fig. 11.

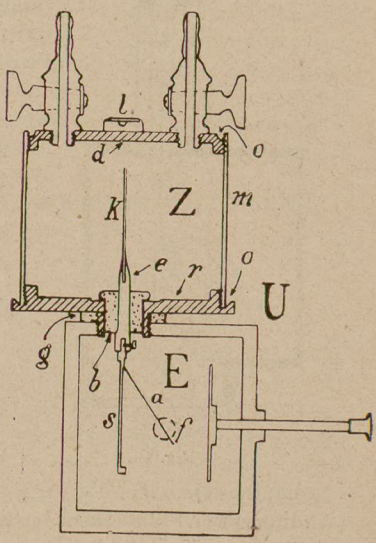


Fig. 12.

vierzigfacher Vergrößerung erscheint der Rand gut geschnittener Blättchen wellenförmig. Um an dem Rande eine zur Ablesung geeignete scharfe Marke zu erhalten, schneidet man nach Kurz[2]) aus dem Blättchen an der Stelle, welche durch das Gesichtsfeld des Mikroskopes hindurchgeht, einen Kreisabschnitt von 5 bis 6 mm Sehnenlänge und 1 mm Höhe aus und klebt

[1]) Ähnliche Instrumente benutzen auch C. Chéveneau und E. Laborde (Journ. de Phys. **8**, 161, 1909) bei ihrem Apparat für radioaktive Messungen und C. T. R. Wilson bei seinem Kompensationselektrometer (Proc. Cambr. Phil. Soc. **13**, 184, 363, 1906).

[2]) K. Kurz, Physik. ZS. **7**, 375, 1906.

mit einer winzigen Spur Siegellack einen 6 bis 7 mm langen und 4 μ dicken Quarzfaden über den Ausschnitt. Da jener leicht in Schwingungen gerät, muß das Instrument erschütterungsfrei aufgestellt werden.

Das einfache Mikroelektrometer mit Goldblatt von Wilson[1]) zeichnet sich durch die Art seiner Isolierung aus. Der Metalldraht *B* (Fig. 13), welcher das 1 mm breite und 25 mm lange Goldblatt *A* abstößt, wird von dem in das Quarzrohr *D* eingekitteten Metallstück *C* getragen. *D* ist wieder in das Messingrohr *E* und dieses in den Ebonitstopfen *F* eingekittet, dessen Isolation durch oben und unten eingegossene Schwefelringe verbessert ist. Die Ladesonde wird durch den Messingstab gebildet, der oben in die Klemme *J* endet und unten den an einer Spiralfeder hängenden Draht *G* trägt. Die Feder *H* drückt die Sonde nach oben; beim Niederdrücken kommt *G* in sanfte Berührung mit dem Blättchenträger. Durch einen Haken läßt sich diese Stellung fixieren. Die Beobachtung erfolgt durch das Fenster mittels eines an dem Elektrometerstativ befestigten Mikroskopes (oder nach der Elster- und Geitelschen Spiegelmethode). Da dieses Elektrometer hauptsächlich zur Untersuchung radioaktiver Substanzen bestimmt ist, ist es unten durch ein dünnes Papierblättchen *K* verschlossen, welches die Strahlen hindurchgehen läßt und gleichzeitig einen elektrostatischen Schutz gewährt.

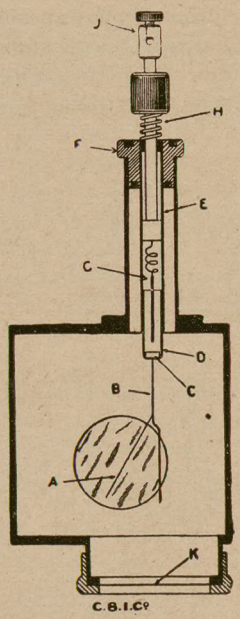


Fig. 13.

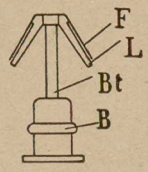


Fig. 14.

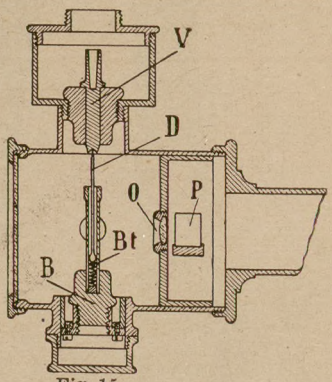


Fig. 15.

Die Versuche von Kurz, das Blättchen durch einen dünnen versilberten Quarzfaden zu ersetzen, hatten zu keinem Ergebnis geführt, da dieser sich durchbog und bei der Bewegung nicht in der Objektebene des Mikroskopes blieb. Diese Schwierigkeit überwand Wiechert[2]), wenigstens zum größten Teil, dadurch, daß er verhältnismäßig kurze, durch Kathodenzerstäubung versilberte oder platinierte Quarzfäden[3]) *F* nahm, welche im ungeladenen Zustande nicht senkrecht nach unten hingen, sondern

[1]) Katalog der Cambridge Scientific Instrument Co.
[2]) Prospekt der Firma Spindler & Hoyer, Göttingen.
[3]) A. Bestelmeyer, ZS. f. Instrkd. **25**, 339, 1905.

auf einem dachförmigen Blättchenträger *Bt* auflagen (Fig. 14 u. 15). Dieser wird von dem Bernsteinstopfen *B* getragen, der in einem Ansatzrohr des zylindrischen Gehäuses befestigt ist. Durch einen zweiten Bernsteinstopfen *V* in dem oberen Ansatzrohr geht ein in eine konische Bohrung endender Draht *D*, der durch eine Feder gegen den Blättchenträger *Bt* gedrückt wird. Es soll dadurch erreicht werden, daß dieser durch das Einsetzen der Ladesonde oder eines Zerstreuungskörpers nicht gelockert wird; ferner ist der Innenraum vollkommen dicht abgeschlossen. Dem steht aber der Nachteil gegenüber, daß die Zahl der Isolationsstellen verdoppelt ist. Zwei weitere Ansatzröhren H_I und H_{II} (Fig. 16) dienen zur Aufnahme von Kalziumchlorid zur Trocknung und von Bleiazetat zum Schutz der versilberten Fäden.

Eine eigenartige Konstruktion weist die Ablesevorrichtung auf. Das Mikroskop *A* besitzt nämlich zwei Objektive *O* und O_I und unmittelbar hinter diesen zwei parallelpipedische Glasprismen *P* und P_I, die so schräg gestellt sind, daß die von den Objektiven entworfenen Fadenbilder sich

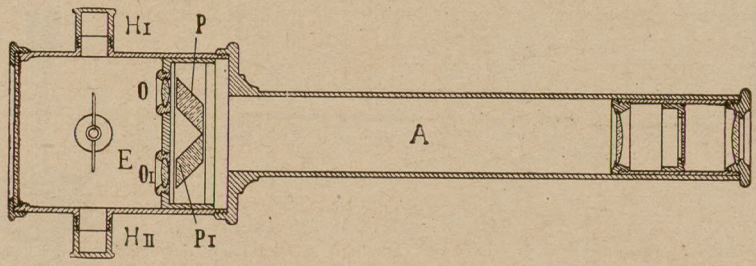


Fig. 16.

kreuzen. Beobachtet wird die Lage ihres Schnittpunktes auf der senkrecht stehenden Mikrometerskala, bei welcher 1 cm in 100 Teile geteilt ist. Es ist also für beide Fäden nur e i n e Ablesung nötig.

Wegen ihrer geringen Länge und ihres kleinen Gewichtes besitzen die Fäden eine solche Steifheit, daß das Elektrometer unempfindlich gegen Neigungen ist und unbedenklich auf den Kopf gestellt werden kann. Die Kapazität beträgt 6,8 cm, der Meßbereich 100, 200, 300 oder 400 V, je nach der Fadendicke. Der Verlauf der Empfindlichkeit ergibt sich aus der Eichkurve (Fig. 17) und der Tabelle II.

T a b e l l e II.

Skt.	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Volt	30	47	57	65	73	79	85	90	95	100
Diff.	30	17	10	8	8	6	6	5	5	5

Die Kurve verläuft also erst von etwa 50 Skt. an linear; dort beträgt die Empfindlichkeit $^1/_2$ V/Skt. Das Gewicht des Elektrometers, dessen äußere Ansicht Fig. 18 zeigt, beträgt ohne Stativ 400 g.

Durch den Ersatz der Aluminiumblättchen durch Quarzfäden ist eine unangenehme Eigenschaft der Blättchenelektrometer vermieden worden,

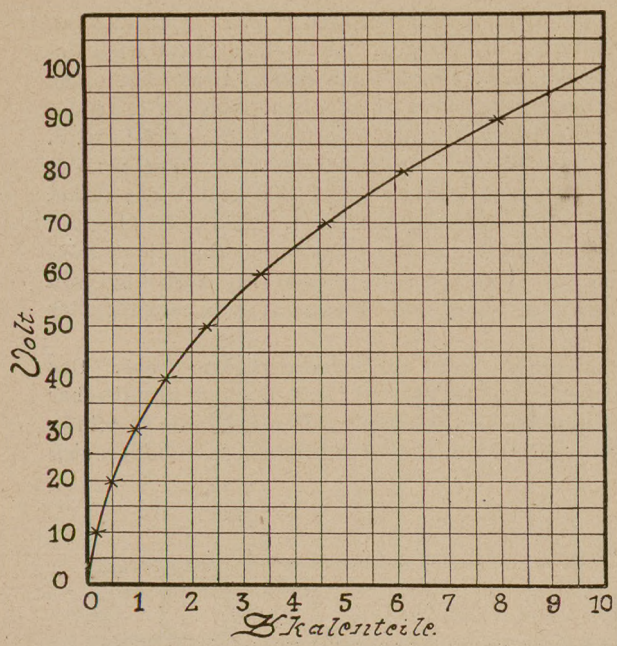


Fig. 17.

die von Ebert[1]) als Cri-cri bezeichnet wurde. Sie äußert sich darin, daß die Blättchen infolge kleiner Brüche und Falten eine gewisse Steifigkeit besitzen, welche die Spreizung nach einem geringen Sinken der Spannung noch aufrecht erhält. Infolgedessen erfolgt der Rückgang der Blättchen, auch bei kontinuierlicher Spannungsabnahme, nicht immer gleichmäßig, sondern an einzelnen Stellen ruckweise.

Durch die Übertragung der an ihrem Blättchenelektrometer angebrachten Verbesserungen auf das Behrens-Hankelsche Elektrometer und ferner durch Verwendung eines metallisierten Quarz- oder Spinnfadens bauten Elster und Geitel[2]) jenes Instrument zu einem hochempfindlichen Elektrometer von geringer Kapazität um.

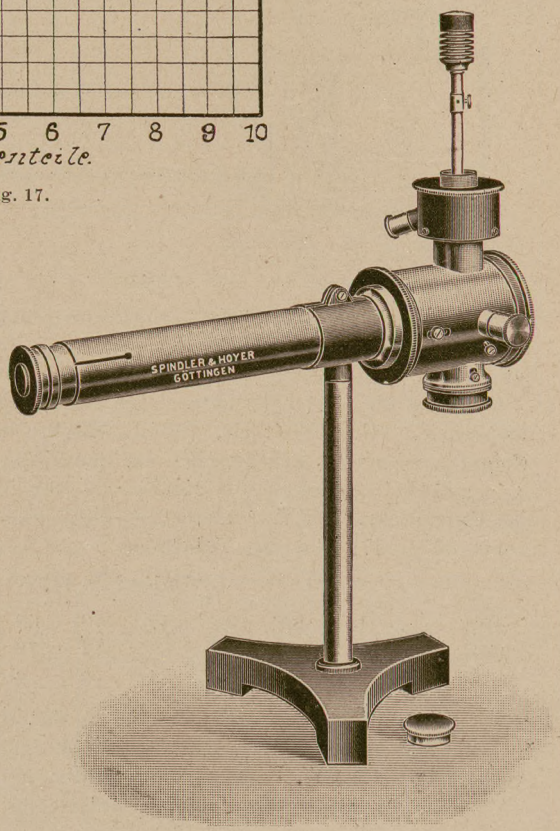


Fig. 18.

[1]) H. Ebert, Physik. S Z. **6**, 641, 1905.

[2]) J. Elster und H. Geitel, Physik. ZS. **10**, 664, 1909.

Ein parallelpipedisches Gehäuse aus Aluminiumblech (Fig. 19 u. 20) ist oben durch die Bernsteinplatte B verschlossen. An dem diese durchsetzenden Messingstab ist der Quarzfaden F von $^1/_{1000}$ mm Dicke befestigt; er hängt in dem zwischen den beiden prismatischen Metallbacken S_1 und S_2 erzeugten Felde, welche an die beiden Pole einer Zambonisäule oder einer geeigneten Batterie angeschlossen werden. Damit der Faden sich möglichst in der Objektebene des Beobachtungsmikroskopes bewegt, befindet sich sein unteres Drittel in dem geerdeten Schutzzylinder R. Ferner ist seine Bewegung bis zu einem gewissen Grade beschränkt durch den lose angekitteten Spinnfaden a, der zugleich als Arretierung wirkt, wodurch das Instrument auch transportfähig ist. Der Faden F ist nach unten hin dadurch gut isoliert, daß sein unteres Ende frei von dem Metallbelag ist. Über den oberen Teil des Elektrometers wird der Schutzzylinder H gestülpt. Die Anschlußsonde wird durch eine obere (Z_1) oder durch eine seitliche Öffnung (Z_2) eingeführt. Die Erdung erfolgt durch den mit Platinspitze versehenen Stift C, der sich durch Spannen der Spiralfeder durch die Mutter M sanft gegen die Ladesonde anlegen läßt.

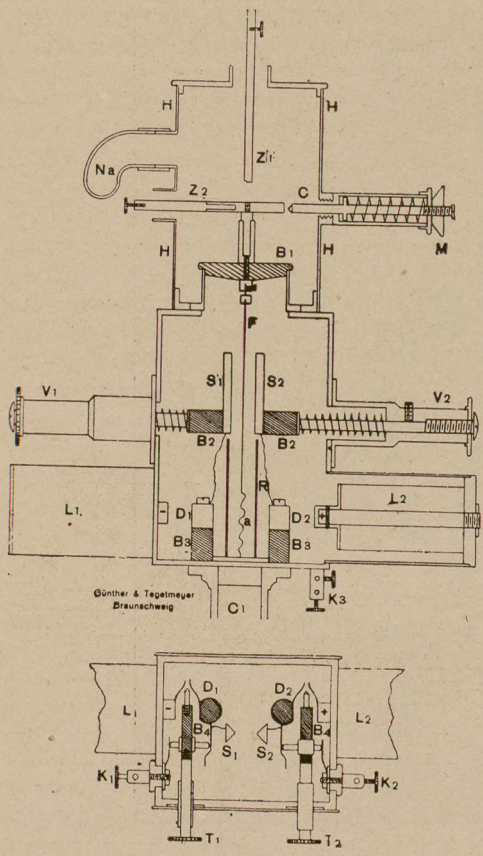


Fig. 19.

Der Abstand der beiden durch den Bernstein B_2 isolierten Schneiden läßt sich durch die Mikrometerschrauben V_1 und V_2 verändern; durch zwei Drähte stehen sie ferner in Verbindung mit den gleichfalls durch Bernstein (B_3) isolierten Metallklötzen D_1 und D_2. Werden die Schieber T_1 und T_2 ganz hineingeschoben, so verbinden ihre stiftförmigen, isolierten Enden die an D_1 und D_2 befestigten Federn mit zwei anderen Federn, die mit den in den seitlichen Ansatzrohren L_1 und L_2 untergebrachten Zambonisänlen in Verbindung stehen, und laden damit die Schneiden auf etwa $\pm$ 150 V. Beim Herausziehen der Schieber werden diese Verbindungen unterbrochen und dafür durch einen anderen isolierten Stift die Federn S_1 und S_2 mit den beiden gut isolierten Klemmen K_1 und K_2 in Kontakt gebracht, an welche

Bibliotek Główna Politechniki Gdańskiej

eine Batterie angeschlossen wird. Auf diese Weise kann man eventuell auch den Faden mit einer der Schneiden verbinden [1]).

Das Beobachtungsmikroskop besitzt eine 60 fache Vergrößerung; seine Okularskala ist in 160 Teile geteilt. Zum ersten Aufsuchen des Fadens läßt sich die Vergrößerung durch Herausschrauben eines Zwischenstückes be-

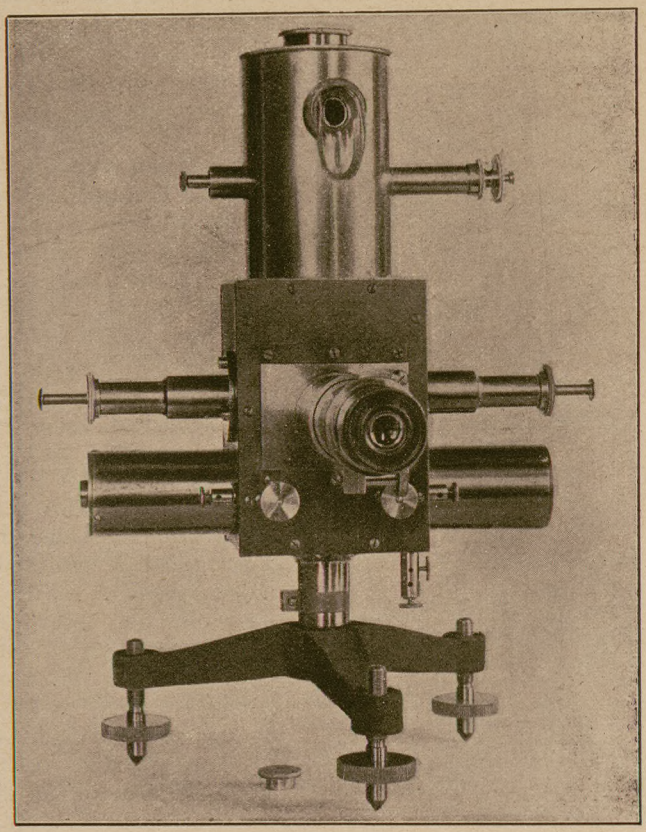


Fig. 20.

trächtlich herabsetzen. Bei sehr weit entfernten Schneiden beträgt die Empfindlichkeit 2 V/Skt. und ist über den ganzen Meßbereich (± 30 V) konstant. Durch Annäherung der Schneiden läßt sich die Empfindlichkeit bis auf 0,003 V/Skt. steigern. Bei noch weiterer Annäherung würde die Gleichgewichtslage labil werden, der Faden bei der geringsten Ladung aus dem Gesichtsfelde verschwinden und auch nach der Erdung nicht wieder in seine Nullage zurückkehren. Für kleine Empfindlichkeiten kann man

[1]) Näheres über diese Schaltung s. beim Wulfschen Einfaden-Elektrometer.

nach beiden Seiten symmetrische Ausschläge durch entsprechende Verstellung der Schneiden erreichen. Wegen der geringen Fadenmasse und der Luftdämpfung ist die Bewegung aperiodisch. Die Kapazität des Elster- und Geitelschen Einfadenelektrometers beträgt 2 cm.

Zu der Klasse der Hankelschen gehört im Grunde auch das Wilsonsche[1]) Kippelektrometer (Fig. 21), bei welchem dem an einem Messingdraht aufgehängten Goldblättchen *L* eine geladene Platte *P* gegenübergestellt wird. Bei horizontal stehender Platte würde sich das Goldblatt im labilen Gleichgewicht befinden. Durch Neigung des ganzen Elektrometers um einen Winkel, welcher von der Potentialdifferenz und dem Abstand zwischen *P* und *L* abhängt, kann man es erreichen, daß das Blättchen über den ganzen Meßbereich in stabiler Lage bleibt (Fig. 22, Kurve I und II); bei zu geringer Neigung würde die Lage des Blättchens bei mittleren Ausschlägen labil werden (Kurve III). Die größte Empfindlichkeit, bei welcher der Meßbereich natur gemäß nur klein ist, erhält man, wenn man sich dem Grenzfalle des Labilwerdens möglichst nähert (etwa Kurve II). Von hier aus kann man die Empfindlichkeit in weiten Grenzen verringern.

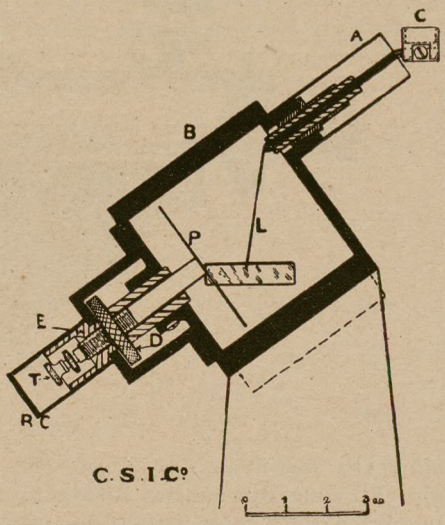


Fig. 21.

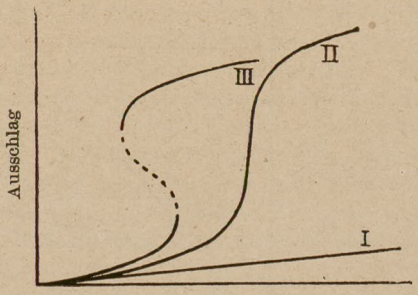


Fig. 22.

Das Kippelektrometer (Fig. 21 u. 23) besteht aus dem auf einer Grundplatte montierten viereckigen Metallgehäuse *B* von 40 × 40 × 30 mm. Der das Blättchen *L* tragende Draht ist durch ein Quarzrohr isoliert und führt durch das Schutzrohr *A* zu dem mit Chlorkalziumlösung[2]) gefüllten Näpfchen *C*, in das die Ladesonde eingesteckt wird. Das Blättchen *L* ist 2,9 bis 3,4 cm lang und etwa 1 mm breit. Der Träger der Platte *P* ist durch Ebonit isoliert und

---

[1]) C. T. R. Wilson, Proc. Cambr. Phil. Soc. **12**, 135, 1903.
G. W. C. Kaye, Proc. Phys. Soc. of London, **23**, 209, 1910.
[2]) Bei Füllung des Näpfchens C mit Quecksilber hatten sich Störungen ergeben

kann mit Hilfe der mit dem Ebonitknopf *D* versehenen Schraube dem Goldblatt genähert oder von ihm entfernt werden. Die Ladebatterie von etwa 200 V wird an die Klemme *T* angeschlossen, über die, um eine zufällige

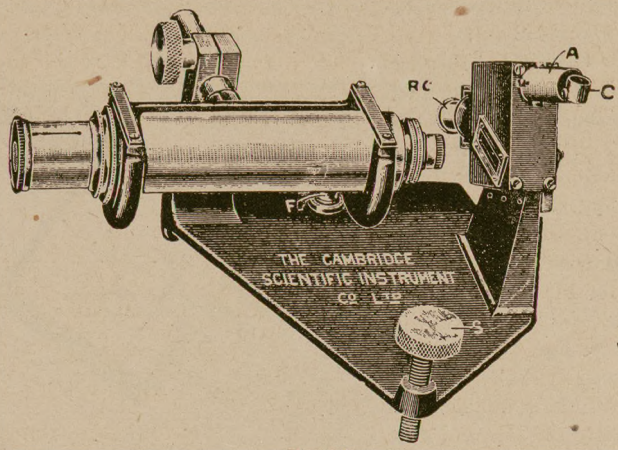


Fig. 23.

Erdung zu verhüten, das Ebonitrohr *E* geschoben wird. Die Metallkappe *RC* bildet den äußeren Abschluß. Die Messung des Ausschlages erfolgt durch ein Fenster mittels des auf derselben Grundplatte montierten

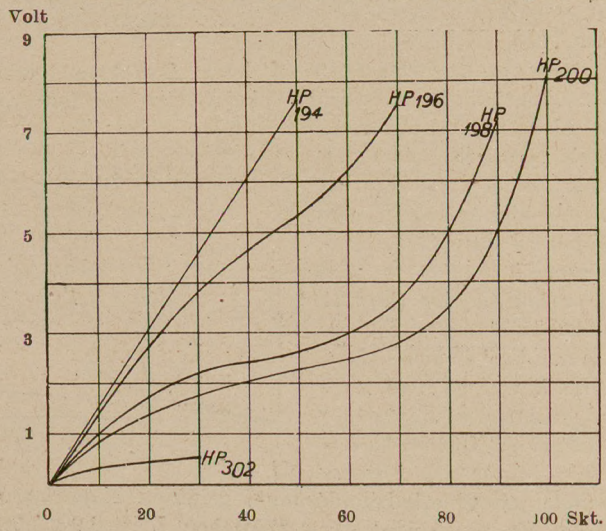


Fig. 24.

Mikroskopes, das durch eine Schraube seitlich verschoben werden kann, um das Blättchen an der gewünschten Stelle der Eichkurve beobachten zu können. Der erforderliche Kippwinkel wird mit Hilfe der die Grund-

platte neigenden Schraube *S* eingestellt. Die Empfindlichkeit ist am größten bei geringer Neigung; sie wächst zunächst mit der Größe des an die Platte *P* gelegten Hilfspotentials bis zu einem Maximum, jenseits dessen das Blättchen labil wird. In Fig. 24 und Tabelle III ist der Verlauf der Empfindlichkeit für verschiedene Hilfspotentiale (*HP*) dargestellt, wobei das an das Blättchen gelegte Potential in willkürlichen Einheiten gemessen ist.

Tabelle III.

HP	Skt.	10	20	30	40	50	60	70
		80	90	100				
194	V	1,6	3,1	4,6	6,1	7,6		
	Diff.	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5		
196	V	1,4	2,7	3,8	4,6	5,3	6,2	7,5
	Diff.	1,4	1,3	1,1	0,8	0,7	0,9	1,3
198	V	1,1	1,7	2,2	2,4	2,6	3,0	3,6
		5,0	7,2					
	Diff.	1,1	0,6	0,5	0,2	0,2	0,4	0,6
		1,4	2,2					
200	V	0,8	1,4	1,7	2,0	2,3	2,5	2,8
		3,5	5,0	8,1				
	Diff.	0,8	0,6	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3
		0,7	1,5	3,1				
302	V	0,3	0,4	0,5.	Von 30 bis 130 Skt. ab labil; von 130 Skt. ab wieder stabil.			
	Diff.	0,3	0,1	0,1				

Man ersieht aus der vorstehenden Tabelle, daß die Eichkurve nur bei geringer Empfindlichkeit linear verläuft und daß ferner Erhöhung des Hilfspotentials um wenige Volt die Empfindlichkeit sehr stark steigert. Es muß deshalb das Hilfspotential sehr gut konstant gehalten werden, zumal bei einer Änderung desselben sich auch der Nullpunkt verschiebt. Die Empfindlichkeit läßt sich durch geeignete Wahl des Kippwinkels und des Hilfspotentials bis auf 0,0025 V/Skt. treiben. Da die Kapazität nur 2 cm beträgt, so können mit dem Kippelektrometer sehr kleine Elektrizitätsmengen gemessen werden. Störend wirken dabei Nullpunktswanderungen und Luftströmungen, wie sie durch die Beleuchtungslampe veranlaßt werden[1]). Transportfähig ist das Elektrometer nur im geladenen Zustande[2]).

Ein ähnliches Elektrometer ist von Zeleny[3]) angegeben, bei welchem gleichfalls einem Goldblättchen *G* (Fig. 25)[4]) eine über die Klemme *K* mit einer Batterie verbundene Platte *P* gegenübersteht. Das Eigenartige ist hierbei, daß man nicht den Ausschlag, sondern die Zeit beobachtet, welche das Blättchen nach Abstoßung von *P* zum allmählichen Verlust seiner

[1]) H. W. Farwell, Sill. Journ. **37**, 319, 1914.
[2]) Über das auf ähnlichen Überlegungen beruhende Elektrometer von Folmer s. weiter unten.
[3]) Zeleny, Phys. Rev. **32**, 581, 1911.
[4]) Aus Z. S. f. Instrkd. **36**, 102, 1916.

Ladung bis zur Wiederanziehung benötigt. Es dient also nur zur Messung von Ionisierungen, wozu die zu prüfende Substanz auf die obere horizontale Platte gebracht wird. Ein etwaiges Ankleben wird durch Bedecken von P mit chinesischer Tusche und vor allem dadurch vermieden, daß das Blättchen der Platte seine scharfe Kante zuwendet. Dazu wird jenes, nachdem es mit zwei Einschnitten versehen ist, um 90° gedreht. Die hierbei auftretenden Schwierigkeiten hat Horton[1]) dadurch vermieden, daß er das Blättchen an einem kleinen Rädchen A von 1 cm Durchmesser

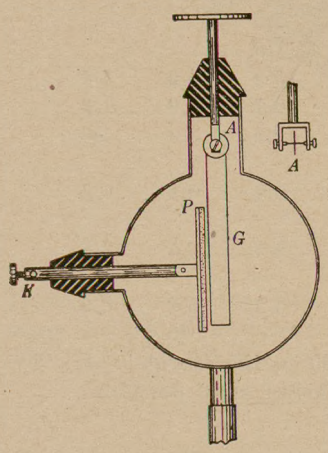


Fig. 25.

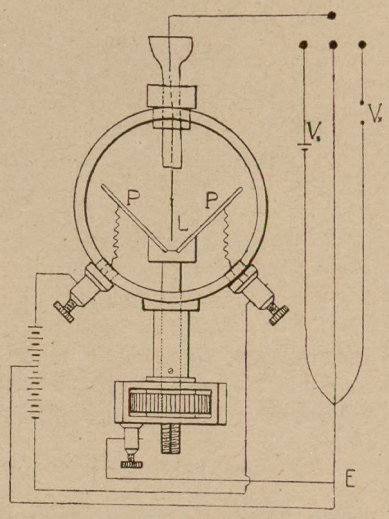


Fig. 26.

aus dünnem Aluminiumblech befestigte, dessen Achse (ein Stück einer Nähnadel) zwischen Schrauben gelagert ist. Ferner wird noch die Platte P mit einer 1,5 mm starken Kohleplatte bedeckt.

Das Kipprinzip verwendet Hubbard[2]), um das Hankelsche Elektrometer zu einem Nullpunktinstrument zu machen (Fig. 26). Das Elektrometergehäuse wird mittels einer Tangentialschraube solange um eine horizontale Achse gedreht, bis das infolge einer zugeführten Ladung ausgeschlagene Blättchen wieder in seiner ursprünglichen Stellung zwischen den beiden auf entgegengesetztes Potential geladenen Platten P einsteht, was mit Hilfe eines mit dem Elektrometer fest verbundenen Mikroskopes beobachtet wird. Da somit das elektrische Feld stets proportional dem an das Blättchen gelegten Potential V ist, und da ferner die Resultante aus elektrischer und Schwerkraft stets in die Blattebene fällt, so gilt zwischen V und dem Kippwinkel φ die Beziehung: $V = k \cdot \sin \varphi$; man könnte das Instrument deshalb als Sinuselektrometer bezeichnen. Der Proportionalitätsfaktor k hängt von dem an die Platten gelegten Hilfspotential, von den

[1]) F. Horton, Phil. Mag. **30**, 381 1915.
[2]) J. C. Hubbard, Phys. Rev. **33**, 358, 1912.

Dimensionen des Blättchens und seinem Abstand von den Platten ab, der durch die Schraube T eingestellt wird. Als Maß für die Empfindlichkeit diene die folgende Angabe: Abstand Platten-Blättchen 14 mm; Hilfspotential $\pm$ 50 V; für $V = 5$ V war der Kippwinkel $\varphi = 1° \; 36{,}6'$. Um größere Empfindlichkeit zu erzielen, müssen die Platten auf höheres Potential geladen und dem Blättchen mehr genähert werden. Damit sich das Blättchen L hierbei nicht gegen eine der Platten anlegt, sind dieselben nicht parallel zu L, sondern geneigt dazu angeordnet. Der Faktor k ist dann zwar nicht völlig konstant, doch bleiben seine Änderungen im allgemeinen unter 1%. Wegen der Nullmethode ist die (nicht näher bekannte) Kapazität des Elektrometers von dem Ausschlag völlig unabhängig [1] [2]).

Die bisher besprochenen Instrumente sind — von zwei Ausnahmen abgesehen — Blättchenelektrometer. Die den früheren Konstruktionen gegenüber erzielten Fortschritte liegen im wesentlichen in der verbesserten Isolation durch Einführung von Bernstein bezw. Quarz und seiner Anbringung an gut geschützter Stelle und weiterhin in dem möglichst vollkommenen Schutz durch Metallgehäuse gegen elektrostatische Störungen. Ferner wurde die Ablesegenauigkeit und damit die Empfindlichkeit durch Benutzung von Mikroskop und Okularmikrometer bedeutend vergrößert. Nachdem es gelungen war, Quarzfäden durch Kathodenzerstäubung leitend zu machen, boten diese ein gutes Material für die beweglichen Teile der Elektrometer, da sie frei von den Cri-cri-erscheinungen der Blättchen sind. Ihre guten Eigenschaften — große Steifigkeit bei geringem Gewicht — traten schon bei dem Wiechertschen und bei dem Einfadenelektrometer entgegen; beide hängen aber die Fäden frei auf (benutzen also als Gegenkraft die Schwere) und unterliegen damit allen Störungen durch Luftströmungen im Innern, wie sie bei jeder ungleichmäßigen Erwärmung auftreten. Davon wird man unabhängig, wenn man die Fäden nicht frei aufhängt, sondern sie elastisch befestigt. Insofern bedeuten die Instrumente, bei welchen die Gegenkraft durch die Elastizität des Fadens geliefert wird, einen Fortschritt über die bisher geschilderten Elektrometer hinaus.

b) Gegenkraft: die Biegungselastizität. Die älteste der hierzu gehörigen Konstruktionen rührt von Wulf [3]) her. Ein viereckiges Magnaliumgehäuse (Fig. 27u. 28) von 75 × 65 × 105 mm trägt in seiner oberen Fläche die Bernsteinplatte B. Der diese durchsetzende Messingstift endet in ein etwa 2 cm langes Röhrchen, welches zur Aufnahme der Ladesonde L oder eines Zerstreuungsstiftes dient. An seinem unteren Ende sind zwei metallisierte Quarzfäden F von 6 cm Länge und 0,002 bis 0,01 mm Durchmesser befestigt, deren untere Enden zusammengekittet

---

[1]) Der Vollständigkeit halber sei das Elektrometer von A. Guillet und M. Aubert (Journ. de phys. **2**, 990, 1912) erwähnt, bei welchem die Anziehung zwischen einer ebenen Platte und einer leichten metallenen Hohlkugel gemessen wird. Diese ist mit einem Gegengewicht (welches zugleich als Luftdämpfung ausgebildet ist) an einem Rädchen aufgehängt, dessen Achse von einem (meßbar) zu tordierenden Draht gebildet wird. Die Ablesung erfolgt mit Hilfe eines Hohlspiegels an einer gebogenen transparenten Skala.

[2]) Über Elektrometer mit interferentieller Messung der Verschiebung s. weiter unten.

[3]) Th. Wulf. L'Electromètre bifilaire. Louvain, 1910. — Physik. ZS. **8**, 246, 527, 780, 1907; **10**, 251, 1909.

sind. Bei Ladung baucht sich ihre Mitte infolge der Abstoßung aus. Die hierdurch erzeugte elastische Gegenkraft ist aber nur sehr gering, so daß die Fäden nicht parallel zueinander bleiben und auch wohl die Nullage nicht wieder einnehmen würden. Um das zu vermeiden, war bei der ursprünglichen Konstruktion ein kleines Stanniolgewicht unten angehängt, wovon aber bald abgegangen wurde[1]). Um nämlich das Instrument transportfähig zu machen, ging durch ein Loch in dem Stanniolgewicht ein horizontaler am Gehäuse befestigter Quarzfaden frei hindurch, gegen welchen sich das Gewicht bei Neigung des Elektrometers anlegte. Durch die hierbei auftretenden Reibungen lud sich aber der Quarzfaden, was zu Störungen Veranlassung gab. Es wurden deshalb die Quarzfäden *F* an den durch den Bernstein *J* isolierten, vollkommen elastischen Quarzbügel *Q* angekittet, dessen Elastizität nunmehr die Gegenkraft bildet. Bei der Spreizung bleiben dadurch die mittleren Teile der Fäden *F* gradlinig und parallel zueinander.

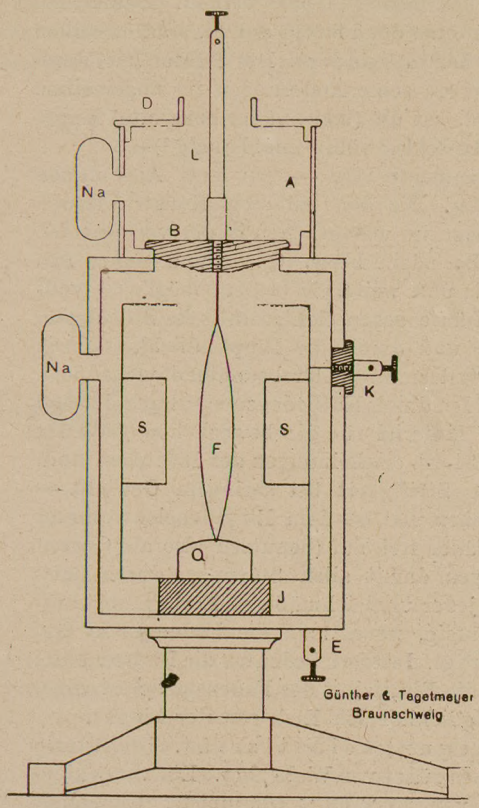


Fig. 27.

Bei Temperaturänderungen würden sich wegen der verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten von Quarz und Magnalium der Ausschlag und auch die Empfindlichkeit ändern. Deshalb ist bei den neueren Instrumenten der Quarzbügel *Q* nicht mehr unten am Gehäuse, sondern an einem von oben herabkommenden Invarstabe befestigt. Dadurch wird der Ausschlag von der Temperatur unabhängig. Infolge der elastischen Befestigung der Quarzfäden ist das Elektrometer auch unempfindlich gegen kleine Neigungen; ebenso wird es durch Erschütterungen und Stöße nicht wesentlich beeinflußt, so daß es selbst unter den schwierigsten Verhältnissen transportiert werden kann.

Die Beobachtung des Ausschlages erfolgt mit Hilfe eines Mikroskopes mit Okularmikrometer, das in einem an der vorderen Gehäusewand

[1]) In dieser ersten Konstruktion leisteten also die elektrischen Kräfte Arbeit gegen die Schwerkraft.

geführten Schlitten ruht; mittels einer Mikrometerschraube wird dieser so bewegt, daß die Fäden symmetrisch zum Nullpunkt der Skala erscheinen (die im allgemeinen 160 Skt. enthält). Die Vergrößerung ist gewöhnlich 80 fach. Will man die Empfindlichkeit des Elektrometers in gewissen Grenzen ändern können, so nimmt man ein Mikroskop mit auszieh-

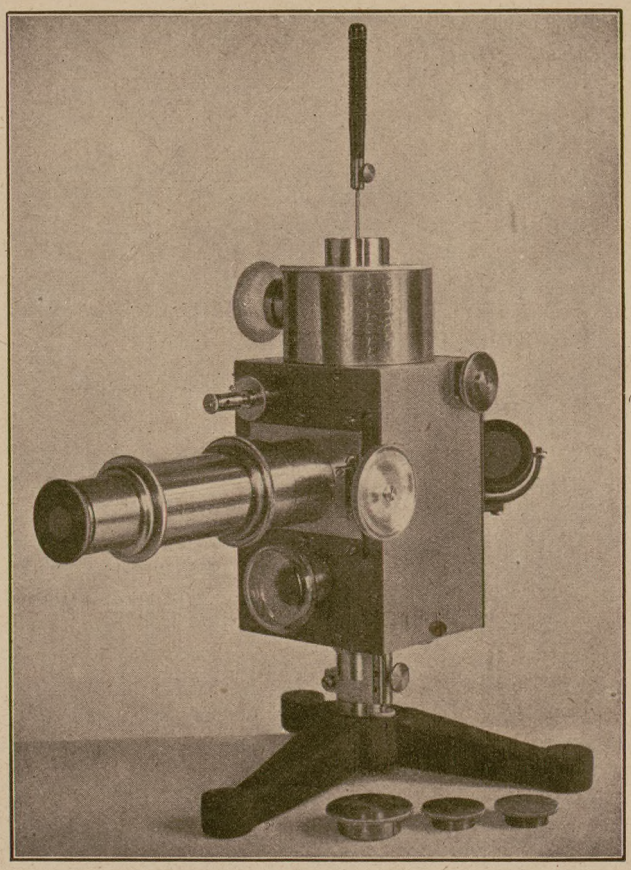


Fig. 28.

barem Tubus; die Vergrößerung läßt sich dann von 70 bis 100 variieren. Die Beleuchtung erfolgt durch einen nach allen Seiten beweglichen Spiegel, der das Licht durch ein kleines in der Rückwand angebrachtes Fenster wirft.

Damit die Fäden bei der Spreizung in der Objektebene des Mikroskopes bleiben, sind ihnen zwei, gewöhnlich mit dem geerdeten Gehäuse verbundene Drahtbügel *S* gegenübergestellt, die gleichzeitig eine Steigerung der Empfindlichkeit bedingen und auch bewirken, daß die

Fadenbewegung durch schwache Luftströmungen nicht gestört wird. Der Abstand der Schneiden ist so groß gewählt, daß die Fäden niemals anschlagen können. Sollten die beiden Fäden nicht gleichzeitig scharf im Gesichtsfelde erscheinen, so schwenkt man die Fadenebene. Das geschieht durch Drehen des in Fig. 28 oben rechts sichtbaren gekordelten Knopfes, welcher mit einer Schneckenspindel in ein ringförmiges Schneckenrad eingreift, in das der Bernstein *B* eingekittet ist. Bei feuchtem Wetter wird

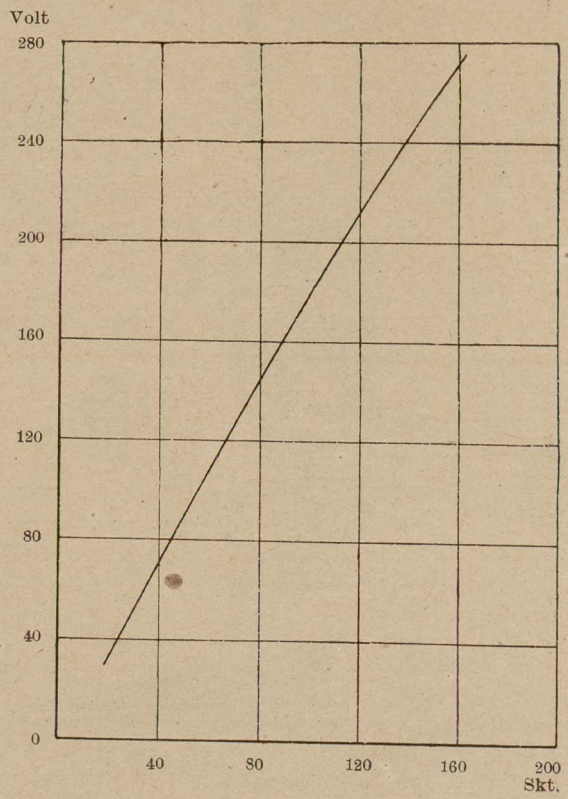


Fig. 29.

auf das Instrument die Schutzkappe *A* gesteckt und ihr Raum sowie das Innere des Elektrometers durch metallisches Natrium getrocknet, das in die Glasgefäße *Na* gebracht wird.

Durch die Wahl der Fadendicke hat man es in der Hand, den Meßbereich innerhalb weiter Grenzen zu wählen; bei den schwächsten Fäden beträgt dieser 40 V; somit ist die größte Empfindlichkeit 0,25 V/Skt. Die obere Grenze liegt bei 1300 bis 1400 V und ist nur durch die Ausstrahlung beschränkt. Für luftelektrische und radioaktive Messungen wählt man im allgemeinen einen Meßbereich von 100 bis 300 V. Die Eichkurve ist,

abgesehen von den ersten 10 Skt., fast gradlinig; die Empfindlichkeit wächst nur wenig mit wachsendem Ausschlag, wie aus Fig. 29 und Tabelle IV folgt.

Tabelle IV.

Skt.	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	110	120	130	140	150	160			
Volt	32	52	72	90	108	126	143	160	177
	194	210	226	242	258	274			
Diff.	20	20	18	18	18	17	17	17	17
	16	16	16	16	16				

Bei den ersten Instrumenten stellte sich heraus, daß die Empfindlichkeit im Lauf der Zeit nicht konstant blieb und sich namentlich durch Erschütterungen änderte. Es rührt dies daher, daß sich die Fäden allmählich (wahrscheinlich an den Kittstellen) etwas verziehen. Die Instrumente werden deshalb vorher künstlich gealtert, wodurch diese unangenehmen Erscheinungen stark verringert sind.

Die Kapazität beträgt ohne Haube und Ladesonde 1,7 cm, die der 6 cm langen Fäden allein 0,4 cm. Die Änderungen der Kapazität mit dem Ausschlag sind hier viel kleiner als bei den Blättchenelektrometern, da sich bei diesen die Enden der Blättchen um mehrere Zentimeter, bei jenem dagegen nur die Fadenmitten um 2 bis 3 mm bewegen. Bei vollem Ausschlag der Fäden (160 Skt.) wächst die Kapazität noch nicht um 3%; bei Änderung des Ausschlages von 60 auf 160 Skt. beträgt diese Änderung nur etwa 1%. Das Instrument wiegt ohne Dreifuß 800 g.

Ein Nachteil aller Elektrometer ohne äußeres Feld liegt darin, daß man das Vorzeichen der Ladung nicht ohne weiteres erkennen kann. Das läßt sich aber bei dem Wulfschen Elektrometer durch eine einfache Umänderung erreichen. Man umgibt nämlich die Fäden mit einem isolierten, allseitig geschlossenen Blechzylinder, dem sog. Hilfskonduktor (wie er schon in Fig. 27 angegeben ist), welcher nur oben eine kleine Öffnung für den Durchtritt des Fadenträgers und seitlich zwei kleine Fenster für die Ablesung besitzt. Ladet man den Hilfskonduktor durch Anlegen eines Batteriepoles an die vom Gehäuse isolierte Klemme K, so zeigen die geerdeten Fäden einen Ausschlag, da sie durch Influenz entgegengesetzt geladen sind. Da der Hilfskonduktor die Fäden praktisch ganz umschließt, ergibt dieser Ausschlag mit Hilfe der gewöhnlichen Eichkurve das an denselben gelegte Potential (V'). Legt man jetzt an die Fäden ein zur Ladung des Hilfskonduktors entgegengesetztes Potential V (das kleiner als V' sein muß), so vergrößert sich der Ausschlag; bei gleichen Vorzeichen beider Ladungen würde er zurückgehen. Demnach gilt die Beziehung

$$v = V' \pm V,$$

falls v das zu dem abgelesenen Ausschlag aus der Eichkurve entnommene Potential ist. Eine Neueichung des Elektrometers ist also nicht notwendig. Zur Messung des zeitlichen Abfalles des Potentials braucht das Potential

des Hilfskonduktors nicht bekannt zu sein. Wird er nicht gebraucht, so wird er durch Hineinschieben einer an der Klemme *K* befindlichen Hülse mit dem Gehäuse leitend verbunden und dadurch geerdet Damit das Objektiv des Mikroskopes nicht störend einwirkt, ist es von dem Tubus durch Ebonit isoliert und durch einen elastischen Draht mit dem Hilfskonduktor verbunden.

Der Hilfskonduktor ist aber nicht nur von Vorteil bei der Bestimmung des Vorzeichens der Ladung, sondern er gestattet auch, wie leicht ersichtlich, den Ausschlag immer in den empfindlichen Teil der Eichkurve zu legen und ferner auch den Meßbereich des Elektrometers zu vergrößern, was namentlich zur Erzielung von Sättigungsstrom bei radioaktiven Messungen

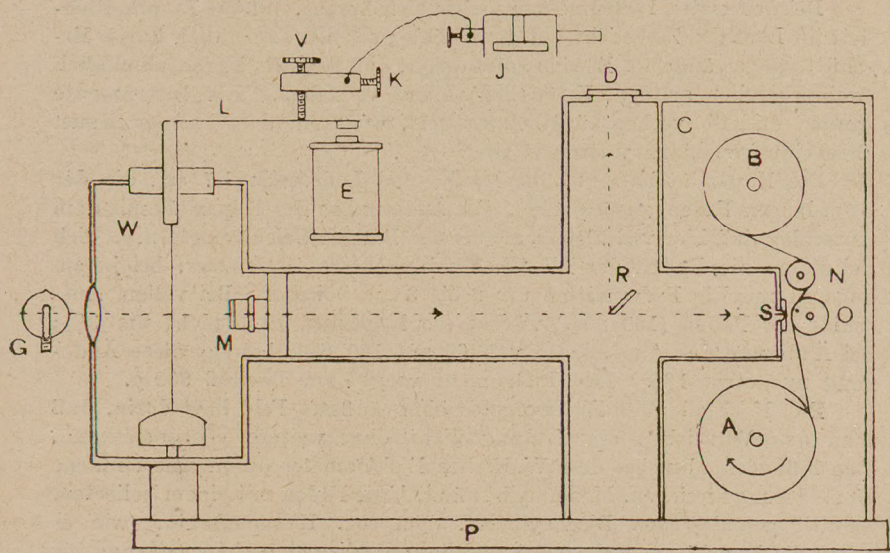


Fig. 30.

von Vorteil ist. Bei einem Elektrometer mit einer mittleren Empfindlichkeit von 1 V/Skt. würden in der Nähe des Nullpunktes erst 5 V einen Ausschlag von 1 Skt. hervorrufen. Legt man nun aber an den Hilfskonduktor ein Potential, das etwa dem halben Meßbereich (*M*) entspricht, so befinden sich die geerdeten Fäden in dem empfindlichen Teile der Skala; ladet man anderseits den Hilfskonduktor auf das Potential *M*, so rücken die geerdeten Fäden an das Ende derselben. Werden sie dann auf allmählich wachsende Potentiale geladen, so verringert sich der Ausschlag, wird beim Potential $+ M$ gleich Null und nimmt bei einem bis zu $2 \cdot M$ weiter wachsenden Potential wieder zu. Dadurch wird also der Meßbereich verdoppelt, ohne daß die Empfindlichkeit verringert ist. Durch die Anbringung des Hilfskonduktors wächst die Kapazität von 1,7 auf 2,3 cm (mit aufgesetzter Ladesonde sind die Werte 2,5bezw. 3,3 cm).

Das Wulfsche Elektrometer ist speziell auch als Registrierapparat[1]) ausgebildet. Um von allen Erschütterungen unabhängig zu sein, sind das Elektrometer und die photographische Registriereinrichtung auf einer gemeinsamen Gußplatte *P* vereinigt (Fig. 30). Das Teleskopsystem *M* entwirft von den durch die Lichtquelle *G* (4 V-Osramlampe) und eine Linse erleuchteten Fäden durch den horizontalen und in seiner Weite regulierbaren

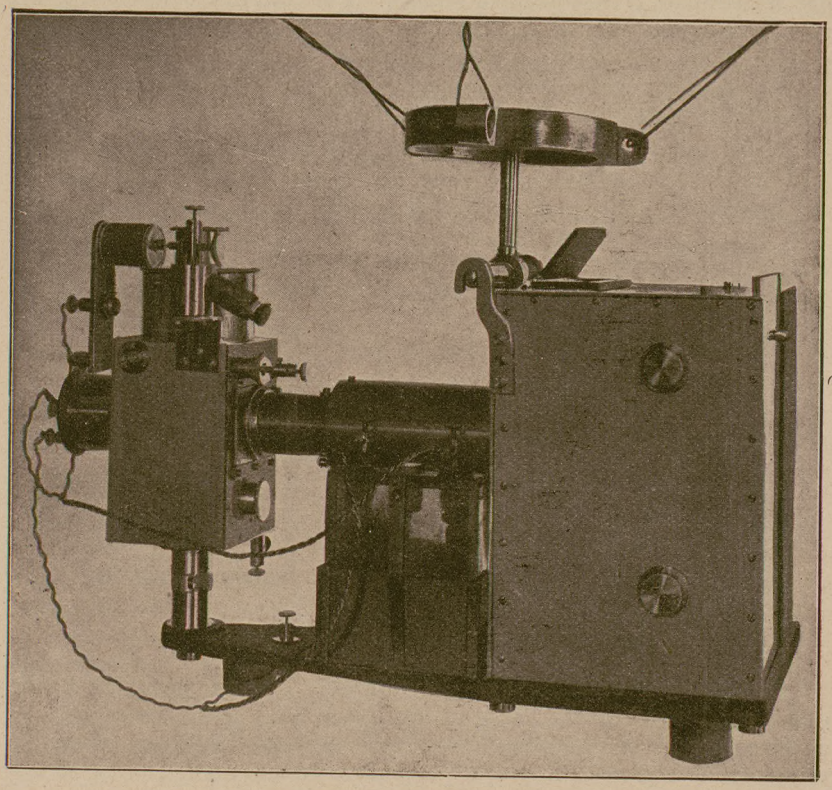


Fig. 31.

Spalt *S* ein Bild auf das photographische Papier, das von der Rolle *B* über die Leitrollen *N* und *O* auf die Walze *A* aufgewickelt wird. Letztere wird durch ein Uhrwerk mit einer Woche Laufzeit betätigt; dieses schließt ferner alle volle Stunden einen Kontakt, wodurch der Stromkreis des Elektromagneten *E* geschlossen wird; derselbe zieht die Feder *L* an, welche sonst das Elektrometer über die Regulierschraube *V* mit der Klemme *K* verbindet, mit welcher der Kollektor *J* in Verbindung steht, und erdet dadurch das Elektrometer, ohne jedoch den Kollektor zu entladen. Auf diese Weise geben die Zeitmarken zugleich den Nullpunkt des Elektrometers an.

[1]) Th. Wulf, L'Electromètre bifilaire, S. 70 u. 73. Physik. ZS 11, 1090, 1910.

Die Hälfte des Lichtbündels wird durch den unter 45° geneigten Spiegel *R* nach oben auf die Mattscheibe *D* geworfen, welche zur Beobachtung der Ausschläge und zur Kontrolle der Scharfeinstellung der Fäden dient. Um eine bequeme Ausmessung der Kurven zu ermöglichen, befindet sich dicht vor dem photographischen Papier eine transparente mm-Skala, deren Striche mit abgebildet werden. Ihre Teilung stimmt mit der auf der Mattscheibe *D* angebrachten überein. Um auch das Vorzeichen jederzeit ersehen zu können, benutzt man ein Elektrometer mit Hilfskonduktor, an den man ein Potential vom halben Meßbereich legt. Fig. 31 zeigt die vollständige Ansicht eines solchen Registrierapparates, der zwecks Benutzung im Ballon in Kardanringen aufgehängt ist.

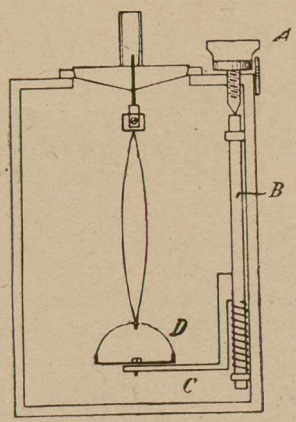


Fig. 32.

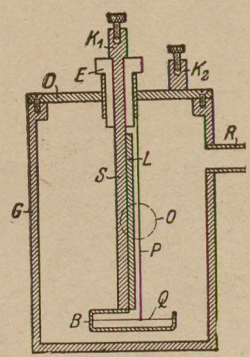


Fig. 33.

Mit wenigen Umänderungen kann dieser Apparat auch als Oszillograph zur Untersuchung von Wechselströmen u. ä. benutzt werden, wozu er wegen der kleinen schwingenden Massen, fehlender Selbstinduktion und verschwindend kleiner Kapazität besonders geeignet ist. Da der Metallbelag der Quarzfäden bei den Schwingungen allmählich zerstäubt, benutzt man hier Wollastondrähte. Um die zur genauen Registrierung notwendige aperiodische Dämpfung zu erzielen, wird das Gehäuse zum Teil mit Öl gefüllt. Als Hilfskonduktor dient das Gehäuse selbst, das zu dem Zweck von der Grundplatte durch Ebonit isoliert ist. Die Spannung der Fäden läßt sich variieren mit Hilfe der Schraube *A* mit geteiltem Kopf (Fig. 32), welche durch Vermittlung einer vertikalen Stange *B* an den den elastischen Quarzbügel *D* tragenden Hebel *C* angreift. Wegen dieser elastischen Übertragung der Spannung ist ein Zerreißen der Fäden fast ausgeschlossen. Die Registrierung erfolgt in ähnlicher Weise wie bei dem oben beschriebenen Apparat, nur werden hier die Zeitmarken durch Abblenden des Lichtbündels mittels eines rotierenden Rades oder einer Stimmgabel gegeben.

Auch als Vibrationselektrometer in der Wheatstoneschen Brücke kann man das Wulfsche Elektrometer benutzen[1]) und erhält damit bei geeigneter Schaltung eine größere Empfindlichkeit als mit dem Telephon. Greinacher hat das Instrumet hierfür besonders abgeändert und befestigt das herausnehmbare System in dem Deckel *D* (Fig. 33)[2]) des viereckigen Gehäuses *G*. Das System wird aus der Messingstange *S* mit der Vertikalleiste *L* gebildet, welcher der Wollastondraht *P* mit 1 mm Abstand gegenübersteht, der durch den isolierten im Bügel *B* quergespannten Quarzfaden *Q* gerade gezogen wird. Die Wechselspannung wird durch Vermittlung der Klemmen K_1 und K_2 an *S* und das Gehäuse gelegt. Die Beobachtung der Fadenschwingungen geschieht durch das Fenster *O* mittels eines Ablesemikroskopes von solcher Vergrößerung, daß der Faden $^1/_2$ bis 1 mm breit erscheint. Durch *R* kann das Gehäuse zur Verminderung der Luftdämpfung evakuiert werden. Das Instrument kann übrigens auch als Indikator für elektrische und magnetische Wechselfelder dienen.

Das Prinzip des elastisch gespannten Quarzfadens hat Wulf[3]) auch bei der Konstruktion seines Einfadenelektrometers verwendet, das sich äußerlich an das von Elster und Geitel anschließt. Da der Faden *F* (Fig. 34) durch den Quarzbügel *Q* gespannt wird, ist das Instrument ohne weiteres transportfähig, unempfindlich gegen harte Stöße und im allgemeinen auch gegen Neigung, nur bei sehr lockerer Fadenspannung würde sich diese bemerkbar machen. Die Fadenspannung wird ähnlich wie bei dem Oszillographen durch die Schraube *F* und die Stange *R* reguliert; Anschläge begrenzen eine zu weit gehende Spannung oder Entspannung. Dem Faden gegenüber stehen zwei durch Bernstein (E_1 und E_2) isolierte Schneiden S_1 und S_2, deren Abstand sich durch die Mikrometerschrauben *C* von fast völliger Berührung bis zu 2 cm regulieren läßt. Sie stehen in Verbindung mit den vom Gehäuse isolierten Klemmen *B*, an die die Ladebatterie angeschlossen wird. Fig. 35 zeigt die äußere Ansicht des Elektrometers.

Die elastische Befestigung des unteren Fadenendes ist auf die Empfindlichkeit fast ohne Einfluß, sie hat aber den Vorteil, ein zu leichtes Labilwerden des Fadens zu verhüten, wodurch der Meßbereich erhöht wird. Man kann deshalb das Mikroskop, wenn der Faden am Ende der Skala angekommen ist, verschieben, bis er wieder auf Null steht, und jetzt höhere Potentiale anlegen. Dieses Nachrücken des Mikroskopes kann eventuell bis zu dreimal vorgenommen werden. Die elastische Befestigung verhindert ferner ein Reißen des Fadens, falls dieser bei sehr lockerer Spannung an die Schneiden anspringen sollte. Er ist übrigens durch schwaches Anspannen des Fadens und Zurückziehen der Schneiden sofort wieder frei zu bekommen, ohne daß es nötig ist, das Elektrometer zu öffnen. Die Empfindlichkeit hängt in weiten Grenzen ab von Fadenspannung und -durchmesser, Schneiden-

---

[1]) H. Greinacher, Physik. ZS. **13**, 388, 433, 1912; ETZ **34**, 1485, 1913; Arch. sc. phys. et nat. **35**, 394, 1913; Arch. f. Elektrotechnik **1**, 471, 1913; „E. u. M." Wien, **32**, 415, 1914.

[2]) Aus E. T. Z. **34**, 1486, 1913

[3]) K. Bergwitz, Physik. ZS. **13**, 28, 1912. Th. Wulf, Physik. ZS. **15**, 240, 1914.

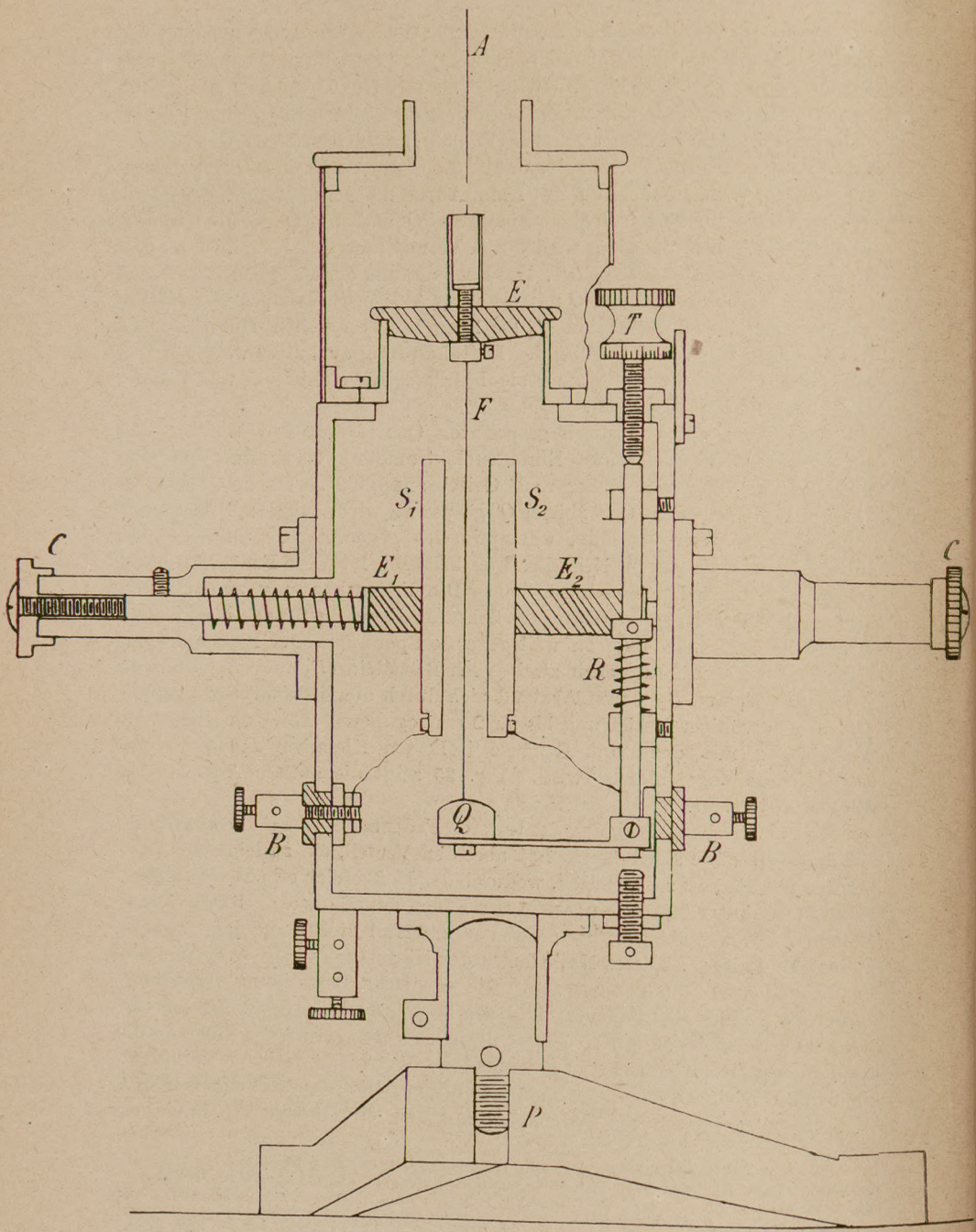


Fig. 34.

abstand, Größe des an die Schneiden gelegten Hilfspotentials und der Schaltung, die man ähnlich wie beim Quadrantelektrometer je nach der Höhe des zu messenden Potentials wählt. Die Zahl der verschiedenen Schaltungsmöglichkeiten erhöht sich hier noch durch die Veränderlichkeit des Schneidenabstandes.

Ohne Hilfspotential würden folgende Schaltungen möglich sein:

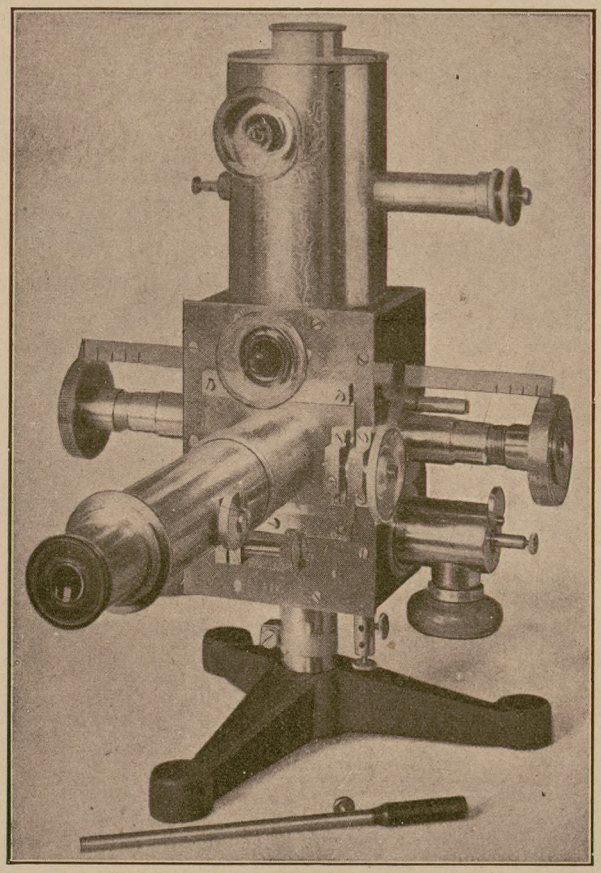


Fig. 35.

1. Faden F und Schneide S_1 verbunden, Schneide S_2 geerdet. Gesuchtes Potential an F und S_1 (entsprechend der Doppelschaltung des Quadrantelektrometers). Diese Schaltung bezeichnet Wulf als Kombinationsschaltung; sie ist besonders zur Messung kleiner Potentiale geeignet[1]).

[1]) Handelt es sich um die Messung von Potentialdifferenzen (z. B. Messung des atmosphärischen Potentialgefälles mittels zweier Kollektoren), so ändert man die Schal-

2. Die Schneide S_2 wird so weit zurückgezogen, daß nur die Abstoßung zwischen den miteinander verbundenen F und S_1 wirkt (Abstoßschaltung).
3. Das gesuchte Potential wird an F gelegt und S_1 geerdet (oder umgekehrt); S_2 wird gleichfalls geerdet oder weit zurückgeschraubt.

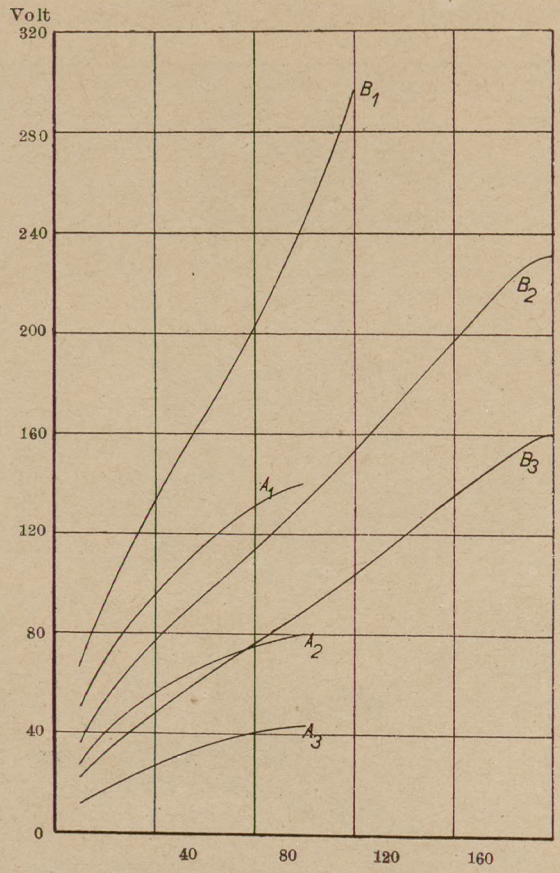


Fig. 36.

Da die Fadenanziehung durch die auf S_1 influierte Elektrizität erfolgt, spricht man von Influenzschaltung; sie eignet sich zur Messung hoher Potentiale. Bei großem Abstand der Influenzschneide S_1 (etwa 10 mm) und mäßiger Fadenspannung wird der Faden überhaupt nicht labil und der Meßbereich nach oben hin somit nur durch die bei etwa 1400 V einsetzende Ausstrahlung begrenzt. Da die Schneide eine größere Kapazität hat als der Faden, legt man das zu messende Potential besser an diesen.

tung zweckmäßig dahin ab, daß man das größere Potential an F und S_1, das kleinere an S_2 legt.

Tabelle V.

Skt.	10	20	30	40	50	60	70	80
	90	100	110	120	130	140	150	160
	170	180	190	200				
A_1 Volt	50	70	84	96	106	116	124	131
	137	140 labil						
Diff.	50	20	14	12	10	10	8	7
	6	3						
A_2 Volt	27	40	48	56	62	67	71	75
	78	80 labil						
Diff.	27	13	8	8	6	5	4	4
	3	2						
A_3 Volt	12	19	23	27	31	35	38	41
	43	44 labil						
Diff.	12	7	4	4	4	4	3	3
	2	1						
B_1 Volt	66	94	113	132	150	167	184	203
	223	245	270	295				
Diff.	66	28	19	19	18	17	17	19
	20	22	25	25				
B_2 Volt	35	52	65	76	86	96	105	114
	123	133	143	153	164	175	186	197
	208	219	228	231				
Diff.	35	17	13	11	10	10	9	9
	9	10	10	10	11	11	11	11
	11	11	9	3				
B_3 Volt	22	32	40	48	55	62	69	76
	83	90	97	104	112	120	128	136
	143	15	157	160				
Diff.	22	10	8	8	7	7	7	7
	7	7	7	7	8	8	8	8
	7	7	7	3				

Während bei der Influenzschaltung die Empfindlichkeit mit wachsendem Ausschlag zunimmt, bis der Faden in eine labile Stellung kommt, nimmt sie bei der Abstoßschaltung ab. Bei der Kombinationsschaltung ist es dagegen durch geeignete Wahl des Schneidenabstandes möglich, der Eichkurve über einen großen Bereich einen fast gradlinigen Verlauf zu geben, wie sich aus Fig. 36 und Tabelle V ergibt, welche für einen Abstand von 2 mm für die Abstoßschneide S_1 und von 3 bezw. 5 mm für die Influenzschneide S_2 (in der Fig. und der Tabelle mit A bezw. B bezeichnet) sowie für drei verschiedene Fadenspannungen gelten (diese sind durch die zu A und B zugefügten Indizes unterschieden, und zwar bezeichnet 1 die stärkste, 3 die schwächste Fadenspannung). Die linearen Teile der Eichkurve sind durch fetten Druck der betreffenden Zahlen hervorgehoben; erst wenn der

Faden den Schneiden zu nahe kommt, bleibt der Verlauf der Eichkurve nicht mehr gradlinig.

Die Empfindlichkeit läßt sich vergrößern bis maximal auf den mit dem Elster- und Geitelschen Einfadenelektrometer erreichten Wert (0,003 V/Skt.), wenn man an eine oder an beide Schneiden ein Hilfspotential anlegt. Im allgemeinen wird man diese Methode zur Erhöhung der Empfindlichkeit der der Verkleinerung des Schneidenabstandes vorziehen. Im einzelnen ergeben sich mit Hilfspotential die folgenden Schaltungsmöglichkeiten:

1. Beide Schneiden im gleichen Abstande und auf entgegengesetzt gleiches Potential geladen; das gesuchte Potential wird an F gelegt. Diese Schaltung entspricht der Nadelschaltung des Quadrantelektrometers und ist somit als Fadenschaltung zu bezeichnen. Bei dieser kann man auch das Vorzeichen der Ladung aus der Ausschlagsrichtung erkennen und ferner die Empfindlichkeit durch Kommutieren der Hilfsladung verdoppeln (diese Schaltung ist identisch mit der des Hankelschen Elektrometers).
2. Entsprechend der Quadrantenschaltung des Quadrantelektrometers kann man das gesuchte Potential an S_2, das (große) Hilfspotential an F legen und S_1 erden; beim Einfadenelektrometer würde man sinngemäß in diesem Falle von Schneidenschaltung sprechen.
3. Ein empfindliches Nullpunktsinstrument erhält man schließlich, wenn man die Schneide S_2 ladet und F und S_1 erdet.

Die Kapazität ist je nach der Schaltung verschieden; sie beträgt im Minimum (bei der Influenzschaltung) 2 cm.

Auch das Einfadenelektrometer ist natürlich als Registrierinstrument und Oszillograph zu benutzen; im letzteren Falle muß man aus den oben angegebenen Gründen wieder einen Platinfaden (von 3 bis 6 μ Dicke) wählen; noch bessere Ergebnisse wird man mit Aluminiumdraht erhalten, der jetzt bis zu 4 μ Durchmesser herab hergestellt wird, da wegen seiner etwa 10 mal kleineren Masse seine Schwingungsdauer kleiner und seine Dämpfung größer ist. Derartige Instrumente haben sich in Verbindung mit einem Detektor gut zur Registrierung funkentelegraphischer Zeitsignale bewährt[1]), wobei eine Genauigkeit von 0,01 s erreicht wurde.

Die vorzüglichen Eigenschaften des Einthovenschen Saitengalvanometers — mikroskopische Beobachtung der Ablenkung einer stromdurchflossenen Saite in einem starken Magnetfelde — legten es nahe, dieses Prinzip auf die Konstruktion eines Saitenelektrometers zu übertragen, eine Idee, die fast gleichzeitig von Edelmann[2]), Cremer[3]) und Lutz[4]) ausgesprochen wurde. Aus der Zusammenarbeit der verschiedenen Erfinder gingen das hauptsächlich für elektromedizinische Zwecke bestimmte Cremer-Edelmannsche[5]) und das anderseits für luftelektrische und radio-

---

[1]) Th. Wulf, Physik. ZS. **15**, 611, 1914.
[2]) M. Th. Edelmann, Physik. ZS. **7**, 115, 1908
[3]) Cremer, Münch. Mediz. Wochenschrift, Nr. 1, 1907.
[4]) C. W. Lutz, Sitzber. d. Bayr. Akad. **37**, 60, 1907. Physik. ZS. **9**, 100, 642, 1908.
[5]) Eine Abbildung desselben findet sich in H. Scholl und W. Voege, Helios 1911, Nr. 21, 22, und 25.

aktive Messungen konstruierte Lutz-Edelmannsche Saitenelektrometer hervor; dieses letztere soll hier näher beschrieben werden.

Das Elektrometer (Fig. 37 u. 38) ist ganz aus Messing gebaut. Die runden Grund- und Deckplatten *G* und *D* sind durch die beiden Vierkantsäulen *Tr* und *Tl* miteinander verbunden. In die Deckplatte ist, durch den Bernstein *Bo* isoliert, der Draht *So* mit der Anschlußklemme einge-

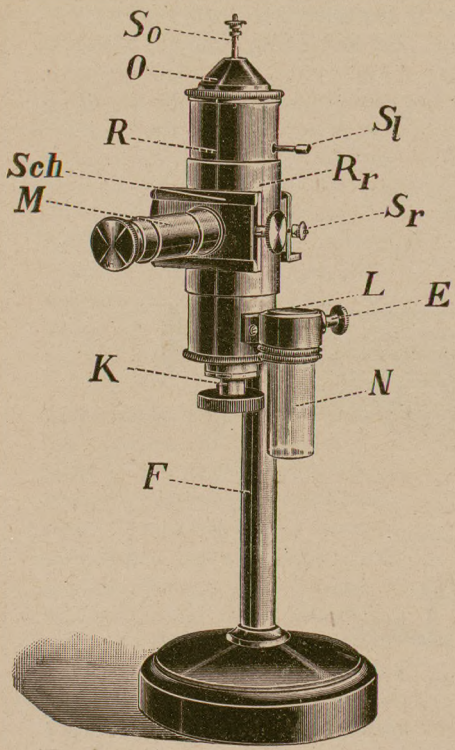


Fig. 37.

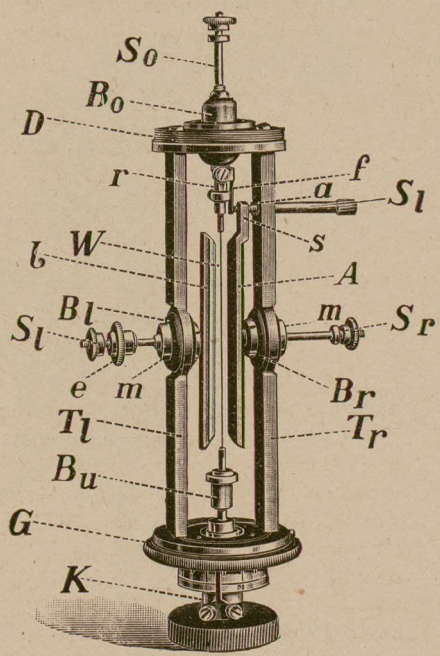


Fig. 38.

lassen. Durch die Spannschraube *K* mit Trommelteilung und Index kann ein zweiter Bernsteinstopfen *Bu* mikrometrisch verschoben werden, um der an *So* und *Bu* befestigten Saite, einem Platindraht von 1 bis 2 μ Durchmesser, verschiedene Spannungen geben zu können. Der Unterschied gegen das Wulfsche Einfadenelektrometer liegt also darin, daß bei dem Saitenelektrometer das untere Ende des Fadens starr befestigt ist und sich nicht heben kann. Die Gegenkraft wird also hier ausschließlich durch die bei der Durchbiegung auftretende elastische Kraft gebildet. Damit die Saitenspannung trotz der verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten von Platin und Messing unabhängig von der Temperatur bleibt, ist eine Kompensationseinrichtung vorgesehen. Die unteren Hälften der Träger *Tr* und *Tl*, welche aus geschlitztem Messingrohr bestehen, sind auf zwei in der

Grundplatte befestigte Invarstangen aufgesteckt und werden an diesen nach Aufsuchen der günstigsten Stellung durch Schellen befestigt. Dadurch ist es erreicht, daß bei Änderungen bis zu 25° die Saitenspannung von der Temperatur unabhängig ist.

Der Saite gegenüber stehen die beiden polierten und vernickelten Schneiden *A* und *J*, deren Zuführungssonden durch die Bernsteine *Bl* und *Br* von den Trägern isoliert sind. Der Querschnitt der Schneiden ist keilförmig gewählt worden, da bei diesem die Fadenbewegung am besten in einer Ebene bleibt. Die Abstoßschneide *A* trägt oben einen Schraubstift *a*, der sich mit Hilfe des den Träger *Tr* frei durchsetzenden Schlüssels *Sl* bis

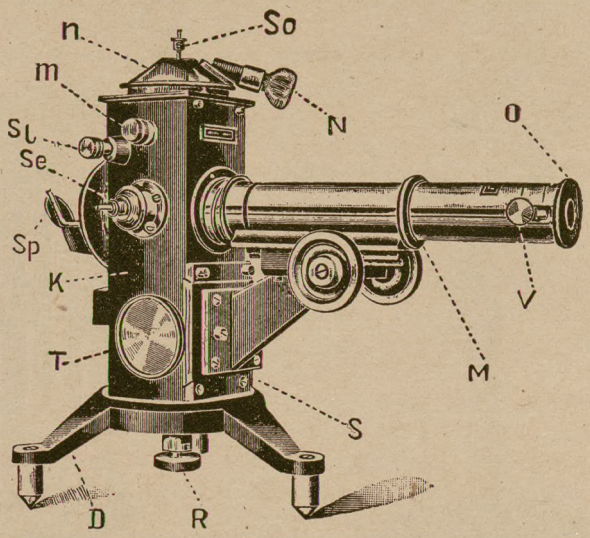


Fig. 39.

zur Berührung mit der an dem oberen Saitenträger befestigten Feder *f* heranschieben läßt und so Schneide und Saite in sanfte Berührung miteinander bringt. Der Schlüssel kann nach Gebrauch abgezogen werden. Die Influenzschneide *J* kann durch Hineindrehen der Mutter *m* mit dem Gehäuse verbunden und damit geerdet werden. Da der Einfluß des Schneidenabstandes auf Empfindlichkeit und Meßbereich weit hinter dem der Saitenspannung zurückbleibt, wird jener im allgemeinen konstant gehalten, doch kann man ihn eventuell nach Lösen der Muttern ändern. Am günstigsten hat sich für *A* ein Abstand von 2,0 mm, für *J* ein solcher von 2,3 mm von der Saite erwiesen.

Der ganze innere Teil wird in ein aufrechtstehendes zylindrisches Gehäuse *R* mit aufgeschraubtem konischen Deckel *O* eingeschoben. Ein stärkeres mit dem Gehäuse verlötetes Rohr *Rr* trägt den Schlitten *Sch* für das Mikroskop *M* von 78 facher Vergrößerung, dessen Okularskala in 80 Teile geteilt ist. Durch die rechts an dem Schlitten sichtbare Schraube

wird ihr Nullpunkt auf die Saite eingestellt. Die Beleuchtung erfolgt mittels eines verstellbaren Spiegels durch ein Fenster in der Rückwand. Selbstverständlich ist auch Natriumtrocknung (bei *N*) vorgesehen; damit diese auch auf den oberen Bernstein *Bo* wirkt, ist in der Deckplatte *D* ein Lochkranz angebracht.

Bei der ersten Konstruktion gingen die Sonden *So*, *Sr* und *Sl* frei durch entsprechende Öffnungen im Gehäuse hindurch. In diese blies aber der Wind bei Beobachtungen im Freien hinein und bewirkte eine Ablenkung der Saite. Deshalb wurde das Gehäuse später mit seitlichen langen Ansatzrohren versehen und auf die Sonden Deckel aufgesetzt, welche durch Muttern so bewegt wurden, daß sie über die Rohrstutzen übergriffen, ohne sie jedoch zu berühren, so daß nur $^1/_2$ mm breite Schlitze blieben.

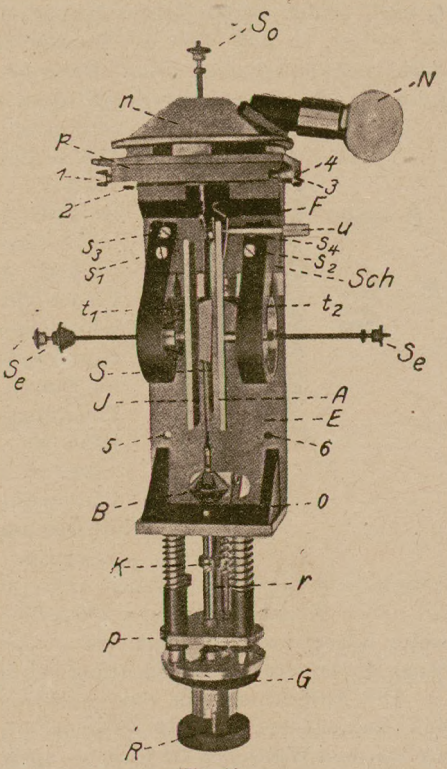


Fig. 40.

Da sich aber beim Einziehen neuer Saiten große Schwierigkeiten ergaben, so ist das Instrument in den letzten Jahren einer Umkonstruktion unterzogen worden[1]). Es besteht jetzt aus zwei vollständig selbständigen Konstruktionsteilen, dem Gehäuse *K* (Fig. 39) und dem Einsatz *E* (Fig. 40). *E* ist eine massive viereckige Platte, deren umgebogene obere und untere Enden in den Ecken versteift sind. Der Einsatz liegt an der Rückwand des Gehäuses an und wird hier durch sechs Schrauben gehalten. Die Saite ist ähnlich wie früher befestigt; die Oberfläche der von allen Seiten frei zugänglichen Bernsteinisolatoren ist aber wesentlich vergrößert. Die obere Zuführungssonde *So* und der Spannkopf *R*, dessen Bewegung durch zwei Anschläge begrenzt ist, gehen frei durch das Gehäuse hindurch. Die Temperaturkompensation aus Invar und Messingrohr ist in die Führung des unteren Isolators *B* verlegt. Die Empfindlichkeit ist jetzt zwischen $-15°$ und $+30°$ von der Temperatur unabhängig.

Die Schneiden sind nicht mehr wie früher starr mit dem Einsatz verbunden, sondern auf einen Schlitten *Sch* gesetzt, der durch die Schraube

---

[1]) C. W. Lutz, Physik. ZS. **13**, S. 954, 1912.

Sl von außen verstellt werden kann, um eventuell symmetrische Ausschläge nach beiden Seiten zu erzielen; dabei bleibt ihr gegenseitiger Abstand konstant (etwa 5 mm). In der richtigen Lage wird der Schlitten durch eine in der Rückwand befindliche Schraube fixiert. Eine Beschädigung der Saite ist dabei ausgeschlossen, da die Bewegung des Schlittens durch die Seitenwände des Gehäuses beschränkt ist. Nach Lösen der Befestigungsschrauben S_3 und S_4 lassen sich die Schneidenträger t_1 und t_2 nach beiden Seiten herausklappen; dadurch wird die Saite vollkommen frei gelegt, so daß man die Transportbüchse (Fig. 41) mit einer neuen Saite leicht einschieben kann. Diese besteht aus dem geschlitzten Messingrohr *E*, das, durch zwei Spiralfedern *g* in dem Schutzrohr *a* gehalten, in diesem transportiert und aufbewahrt wird. Die Büchse wird mit der darin befindlichen Saite *F* in das Elektrometer gesetzt, wo diese festgeschraubt wird; die Büchse kann nach Losschrauben leicht herausgezogen werden. Die Träger t_1 und t_2 werden dann wieder vorgeklappt und mit Hilfe der Zugschrauben s_3 und s_4 sowie der Druckschrauben s_1 und s_2 so lange verstellt, bis das Saitenbild im ganzen Gesichtsfelde scharf bleibt. Die Zuleitungssonden *Se* zu den Schneiden sind jetzt als Stecksonden ausgebildet. Beim Arbeiten im Freien werden durchbohrte Bernsteinplättchen darauf geschoben, welche die Öffnungen der seitlichen Rohrstutzen verschließen. Das sehr solid am Gehäuse befestigte und durch Zahnstange und Trieb einstellbare Mikroskop hat bei der neuen Konstruktion eine 290 fache Vergrößerung. Das Okularmikrometer besitzt zwei Teilungen von — 50 bis + 50 und von 0 bis 100, von denen die erstere zur Beobachtung bei Schaltungen mit Hilfsladung dient.

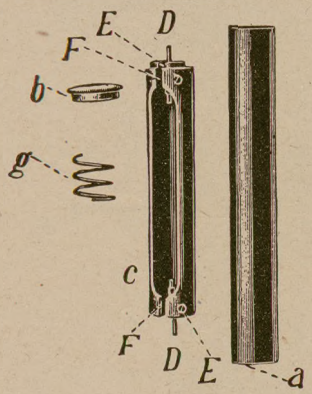


Fig. 41.

Die Außenmasse des Saitenelektrometers sind 20 × 50 × 220 mm; sein Gewicht beträgt mit Zubehör 2,7 kg. Die Saitenbewegungen sind wie bei dem Wulfschen Instrument aperiodisch gedämpft; es ist gleichfalls unempfindlich gegen Erschütterungen.

Die verschiedenen Schaltungsmöglichkeiten sind bereits beim Wulfschen Einfadenelektrometer besprochen. Bei der Doppelschaltung[1]) (s. S. 37, I, 1; gesuchtes Potential an *F* und *A*, *J* geerdet) ist der Meßbereich je nach der Saitenspannung 2 bis 130, 2 bis 270 oder 10 bis 420 V. Bei noch größeren Spannungen würde die Saite durch die elektrischen Kräfte zerrissen werden; bei zu kleinen Spannungen würde das Instrument dagegen nicht mehr unabhängig von der Neigung und die Bewegung auch

[1]) Man kann mit dieser Schaltung auch Potentialdifferenzen messen und legt dann das kleinere Potential an *J*. Um dieselbe Eichkurve wie sonst zu erhalten, genügt es aber nicht, der Saite die frühere Spannung zu geben; vielmehr muß man diese so regulieren, daß man beim Anlegen eines bekannten Potentials an die Saite wieder denselben Ausschlag wie bei der gewöhnlichen Schaltung erhält.

nicht mehr aperiodisch gedämpft sein; ferner ließe sich keine konstante Nullpunktslage mehr erzielen. Der Verlauf der Eichkurve für mittlere Spannung ergibt sich aus Fig. 42, Kurve I, und Tabelle VI.

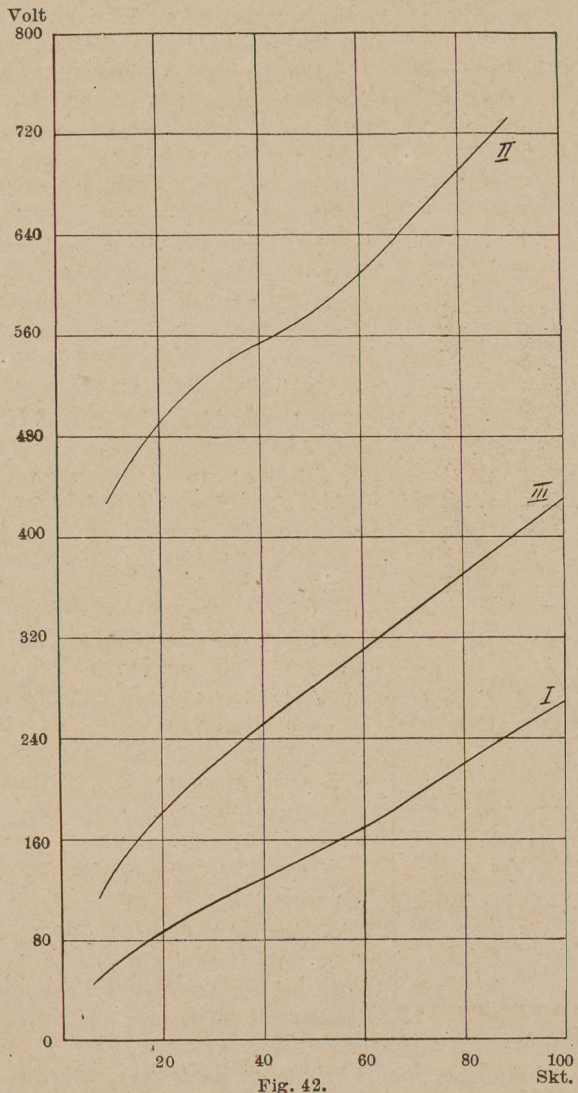


Fig. 42.

Tabelle VI.

Skt.	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Volt	60	85	110	130	150	170	195	220	245	270
Diff.	60	25	25	20	20	20	25	25	25	25

Die Kapazität beträgt 4,7 cm ohne und 5,7 cm mit Deckel und Sonde; die größte Empfindlichkeit ist etwa 1,3 V/Skt.

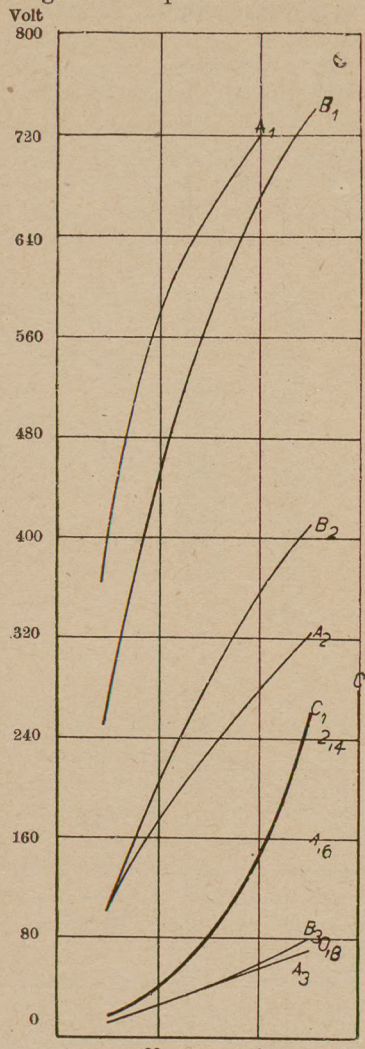


Fig. 43.

Bei Influenzschaltung (S. 38 I, 3; gesuchtes Potential an F; A und J geerdet) ist das Elektrometer wesentlich unempfindlicher. Je nach dem Schneidenabstand gestattet sie Messungen von 100 bis 750 V; der größte Meßbereich erstreckt sich von 400 bis 750 V. Noch höhere Potentiale würden zu starke Saitenspannungen erfordern. Bei weitgehender Entspannung wächst zwar die Empfindlichkeit, doch wird dann die Form der Eichkurve ungünstig; deshalb ist es besser, die Empfindlichkeit durch Näherheranrücken von J an die Saite zu erhöhen. Vom Anfang abgesehen, verläuft die Eichkurve fast ebenso wie bei größerem Abstande (s. Fig. 42, Kurve II und III und Tabelle VII, welche für einen Abstand von 3 bezw. 1 mm zwischen F und J gelten). Falls nicht große Unempfindlichkeit gegen Erschütterungen und Neigungen gefordert wird, wendet man bei Potentialen unter 400 V besser die Doppelschaltung an.

Tabelle VII.

Abst. mm		Skt.	10	20	30	40	50	60	70
			80	90	100				
3	Volt		430	490	530	555	580	610	650
			690	730					
	Diff.		430	60	40	25	25	30	40
			40	40					
1		Skt.	130	180	220	250	280	310	340
			370	400	430				
	Diff.		130	50	40	30	30	30	30
			30	30	30				

Die Kapazität hat den Wert 2,3 cm ohne und 3,3 cm mit Deckel und Sonde, beim Durchlaufen des ganzen Meßbereiches ändert sich dieselbe um 0,007 cm; die größte Empfindlichkeit beträgt 2,5 V/Skt.

Bei den Schaltungen mit Hilfsbatterie kann man natürlich wesentlich größere Empfindlichkeiten erzielen. Je nach Fadenspannung und Hilfspotential kann man Potentiale von 0,01 bis 750 V messen und 0,001 V noch schätzen.

Für die Saitenschaltung (S. 40, II, 1; gesuchtes Potential an F, entgegengesetzt gleiche Hilfspotentiale an A und J) sind die Eichkurven (A, B,

C in Fig. 43 und Tabelle VIII für die Hilfspotentiale ± 4, ± 10 und ± 50 V für starke, mittlere und schwache Spannung [durch die Indizes 1, 2, 3 unterschieden] wiedergegeben.

Tabelle VIII.

	Skt.	10	20	30	40	50
A_1	Volt	405	580	660	720	
	Diff.	405	175	80	60	
A_2	Volt	100	180	230	280	325
	Diff.	100	80	50	50	45
A_3	Volt	10	25	40	55	70
	Diff.	10	15	15	15	15
B_1	Volt	270	455	580	670	740
	Diff.	270	185	125	90	70
B_2	Volt	100	200	290	350	410
	Diff.	100	100	90	60	60
B_3	Volt	10	25	40	60	80
	Diff.	10	15	15	20	20
C_1	Volt	0,18	0,41	0,81	1,51	2,61
	Diff.	0,18	0,23	0,40	0,70	1,10

Bei einer zwischen 2 und 3 liegenden Spannung (Meßbereich 0,3 bis 147 V) verläuft die Eichkurve gradlinig, was namentlich bei Registrierungen von Vorteil ist. Eine entsprechnde Saitenspannung läßt sich für jedes Hilfspotential finden. Der Proportionalitätsfaktor ist um so kleiner, je stärker der Faden gespannt ist.

Die Empfindlichkeit wächst also mit wachsendem Hilfspotential zunächst langsam, dann schneller an. Bei großem Hilfspotential kann man Spannungen von 0,001 bis 0,06 V messen; dabei muß die Saite soweit entspannt werden, daß sie gerade außerhalb der labilen Lage ist. Bei dieser großen Empfindlichkeit machen sich alle äußeren Störungen stark bemerkbar, das Elektrometer muß deshalb durch einen geerdeten Blechschirm geschützt werden. Unter diesen besonderen Vorsichtsmaßregeln kann man die Hilfsladung bis auf ± 100 V steigern und dann Potentiale von 0,0006 bis 0,5 V messen; die Eichkurve steigt aber noch steiler an als bei ± 50 V.

Die Kapazität beträgt bei der Saitenschaltung 2,3 ohne und 3,3 cm mit Deckel und Sonde.

Die Schneidenschaltung (S. 440, II, 2; gesuchtes Potential an J; F geerdet; Hilfspotential an A) ist etwa ebenso empfindlich wie die Saitenschaltung, aber nicht so empfehlenswert zur Messung kleiner Elektrizitätsmengen, da die Kapazität der Influenzschneide mit ihrer Zuführungssonde größer als die der Saite ist.

Für Schulzwecke hat Lutz sein Saitenelektrometer so umgeändert, daß es bei Aufrechterhaltung aller Vorzüge des Saitenprinzipes in der Handhabung fast so einfach wie die üblichen Blättchenelektrometer wird[1]).

[1]) C. W. Lutz, Physik. ZS. 17, S. 619, 1916.

Er hat dazu vor allem auf die Beweglichkeit der Schneiden verzichtet. Die eine Schneide *Sch* (Fig. 44) ist direkt an dem Boden des Gehäuses befestigt und daher ständig mit diesem geerdet, die andere Schneide wird von der Bügelstange *B* gebildet, die ständig mit der Saite *S* (einem Platinfaden von 2,5 Dicke und 45 mm Länge) verbunden ist. Das Instrument ist also nur in der Doppelschaltung zu benutzen, (auf besonderen Wunsch wird das Instrument auch mit isolierter Schneide geliefert, so daß es dann auch in der Differentialschaltung zu verwenden ist). Zur Isolation der Bügelstange und der Saite dient polierter geschmolzener Quarz. Im übrigen entspricht die Konstruktion sonst völlig der neueren des Saitenelektrometers, es läßt sich also das eigentliche Elektroskop aus dem Gehäuse herausziehen; auch die Temperaturkompensation ist ähnlich wie bei diesem bewirkt. Zum Schutz gegen Wärmestrahlung sind das Gehäuse *G* und der Deckel *D* doppelwandig ausgeführt und vernickelt. Dagegen ist aus Gründen der Vereinfachung auf den äußeren Spannkopf zur Regulierung der Saitenspannung verzichtet. Diese läßt sich indessen, wenn gewünscht, um kleine Beträge dadurch ändern, daß man eine mitgegebene Schraubenmutter mit Teilung nach Herausnahme des Einsatzes auf den unteren Befestigungsstift *St* der Saite aufsteckt und nach Lockerung der Schraube 3 durch Drehung der Mutter um 1 bis 2 kleine Trommelteile die Saite spannt. Das Entspannen erfolgt durch Hineindrücken der etwas zurückgedrehten Mutter.

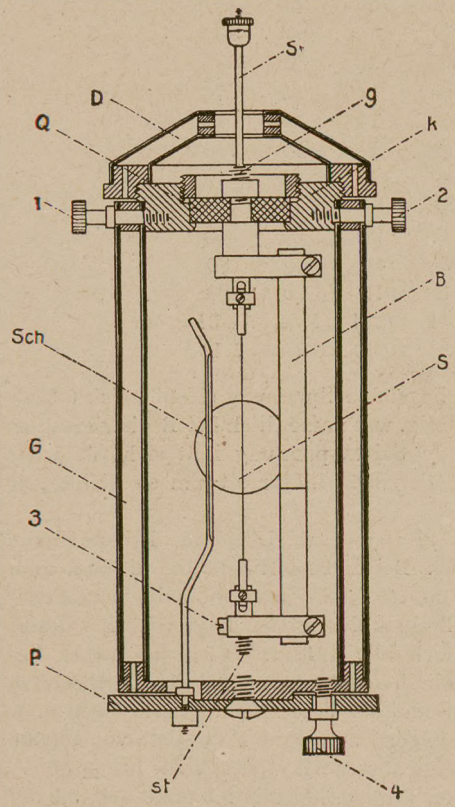


Fig. 44.

Damit das Saitenbild immer scharf erscheint, läßt sich die Schneide *Sch* von außen bei geladenem Elektroskop mittels der Platte *P* nach vorwärts oder rückwärts drehen und in der richtigen Lage durch die Schraube 4 festklemmen. Die Zuleitung erfolgt wie üblich durch eine Stecksonde, doch lassen sich auch größere Teile auf das 4 mm-Gewinde *g* des Bügels *B* aufschrauben.

Der Meßbereich beträgt, je nach der Saitenspannung, 4 bis 98, 7 bis 305 oder 16 bis 970 V. Die Abmessungen des Elektroskopes ohne Fuß

sind: Durchmesser 50 mm, Höhe mit Deckel 120 mm, Gewicht 760 g. Die Kapazität ohne Deckel und Sonde beträgt 6 cm.

Nach Untersuchungen von Jaeger[1]) kann das Saitenelektrometer genau wie das Quadrantenelektrometer benutzt werden (es bietet aber diesem gegenüber den Vorteil kleinerer Kapazität); auch die hierfür aufgestellte Theorie ist für das Saitenelektrometer ohne weiteres anwendbar.

Daß das Saitenelektrometer sich auch ausgezeichnet zur Registrierung eignet, ist nach dem Geschilderten wohl selbstverständlich. Die äußere Einrichtung eines solchen Apparates zeigt Fig. 45. Er ist im prinzipiellen Aufbau mitdem früher geschilderten identisch. Zur Beobachtung des Ausschlages dient hier das schräge Rohr *B*. Durch eine Anordnung ähnlich

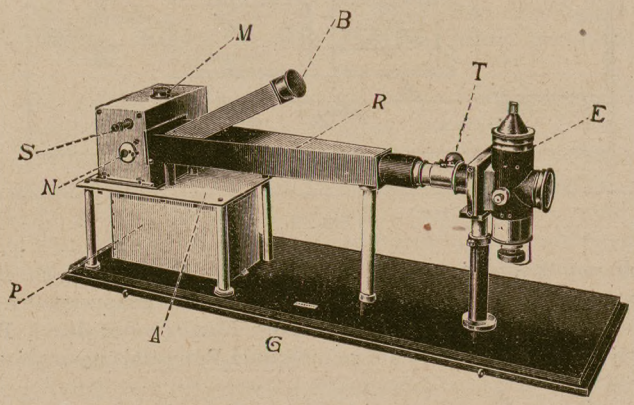


Fig. 45.

der bei den Kodakapparaten getroffenen ist die Beschickung bei Tageslicht möglich.

Ein ganz ähnliches Saitenelektrometer, das sich nur in konstruktiven Einzelheiten von dem Lutzschen unterscheidet, ist von Laby[2]) angegeben. Bei diesem wird das Mikroskop nicht vom Elektrometer getragen, sondern beide sind auf einer gemeinsamen Grundplatte montiert. Die Saite wird nicht direkt durch eine Mikrometerschraube gespannt, sondern diese greift an einen Hebel an, der durch einen im Gehäuse befindlichen Schlitz herausragt; dadurch ist ein luftdichter Abschluß des Gehäuses unmöglich. Die Schneiden sind in einem festen Abstande von 10 mm angebracht. Falls man größere Empfindlichkeit erzielen will, muß man das Gehäuse öffnen und auf die Schneiden Messingstücke aufschrauben, wodurch der Abstand auf 4 mm verkleinert wird. Die Saite, ein 3 μ dicker Quarzfaden, ist durch geschmolzenen Quarz vom Gehäuse isoliert. Alles in allem kann man die Labysche Konstruktion nicht als eine Verbesserung bezeichnen.

Speziell für den Gebrauch in bemannten und unbemannten Ballons hat Villard[3]) ein Registrierelektrometer konstruiert, das man in gewissem

[1]) R. Jaeger, ZS. f. Instrkd. **37**, 5, 1917.
[2]) T. H. Laby, Proc. Cambr. Phil. Soc. **15**, 106, 1909
[3]) P. Villard, Le Radium **8**, 469, 1911; C. R. **153**, 315, 1911.

Sinne auch als Einfadenelektrometer bezeichnen kann. In dem Felde der beiden feststehenden von dem Messinggehäuse *A* bei *g* isolierten rechteckigen Platten *P* (Fig. 46), die über die Flüssigkeitswiderstände *r* und die Klemmen *d* mit den beiden Polen einer Batterie verbunden werden, kann sich ein U-förmiger Kohlefaden (aus einer Glühlampe) bewegen. Dieser ist an der

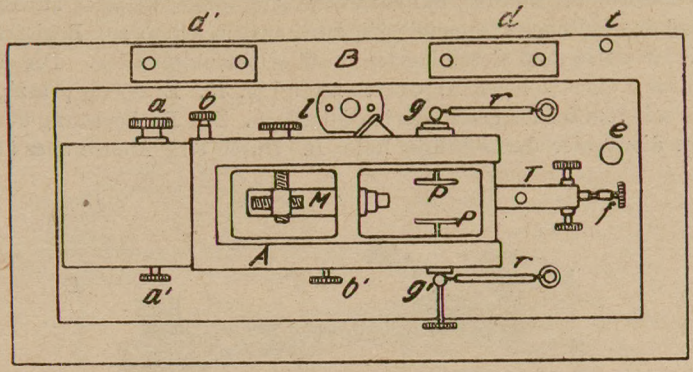


Fig. 46.

verschiebbaren Stange *f* befestigt, die in dem Rohr *T* durch Bernstein isoliert ist. Mit Hilfe von vier Schrauben wird er genau symmetrisch zu den Platten *P* gestellt. Von *f* führt eine Litze zu der durch Bernstein isolierten Klemme *e*, an welche das zu messende Potential angeschlossen wird.

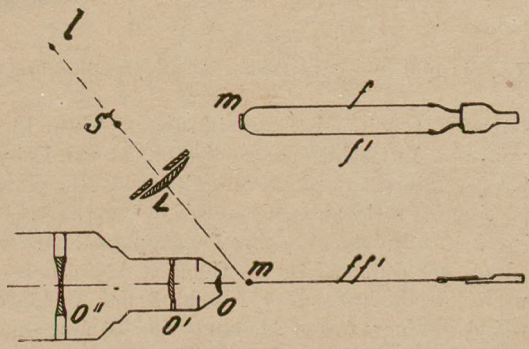


Fig. 46a.

Das freie Ende des Fadens trägt an dem gekrümmten Ende einen mit Wachs befestigten kleinen Zylinderspiegel *m* (Fig. 46a), der aus einem etwa 1 mm langen Stück eines innen versilberten Kapillarrohres von $^1/_{10}$ bis $^2/_{10}$ mm Durchmesser besteht, das nur wenige Hundertstel mg wiegt. Dieser Spiegel wird durch eine kleine in der Höhe verstellbare 2 V-Glühlampe *l* beleuchtet, deren Anschlußklemmen bei *d'* liegen. Das Licht der Lampe fällt durch den 3 mm breiten Spalt und die Kondensorlinse *L*

auf den Zylinderspiegel *m* und wird von diesem in das Projektionsmikroskop *M* von 15facher Vergrößerung reflektiert, das auf der Registriertrommel (in dem linken Kasten) ein Bild durch einen $^1/_{20}$ mm breiten Spalt hindurch in Gestalt eines feinen Punktes entwirft. Das Mikroskop wird durch die Schraube *b'* so eingestellt, daß seine Achse in der Verlängerung des Fadens liegt, damit das Bild bei der im allgemeinen 2 *mm* nicht übersteigenden Fadenbewegung scharf bleibt. Die Bewegung der Trommel wird durch den Knopf *b* ausgelöst und durch den Knopf *a* angehalten. Die Auslösung kann eventuell automatisch durch ein Uhrwerk geschehen; die Arretierung erfolgt dann nach einer ganzen Umdrehung durch einen Anschlag. Die durch einen Schieber zu verschließende Öffnung bei *l* dient zur visuellen Beobachtung. Im Ballon wird über das Messinggehäuse, das oben durch einen Schiebedeckel geschlossen wird, ein Holzkasten *B* geschoben.

Die sehr elastischen Kohlefäden besitzen nur ein geringes Trägheitsmoment und sind durch ihre U-Form gegen Bewegungen in der Vertikalen versteift. Von nicht zu weit gehenden Neigungen ist das Instrument unabhängig, da die Gegenkraft rein elastisch ist. Bei Fäden aus einer 110 V-Lampe von 10 Normalkerzen, welche man in der Flamme so abbrennt, daß sie von der Basis nach dem Bügel hin immer dünner werden, kann man bei 120 V Hilfsladung eine Empfindlichkeit von 0,2 V/Skt. erhalten. Wegen ihrer großen Zerbrechlichkeit kann man aber diese Fäden nur im Laboratorium gebrauchen. Im Ballon nimmt man dickere Fäden und begnügt sich mit einer Empfindlichkeit von 2 V/Skt. Aperiodische Dämpfung erzielt man bei diesen dadurch, daß man nahe der Biegung des Fadens ein Stückchen Aluminiumfolie aufklebt und dadurch die Luftdämpfung vergrößert. Durch die Länge der Folie kann man auch die Empfindlichkeit etwas variieren. Mit kürzeren Fäden und größerem Plattenabstand kann man Potentiale bis zu 2000 V registrieren.

Bei der dem Villardschen Elektrometer im gewissen Sinne ähnlichen Konstruktion von Eccles[1]) wird ein versilberter Glasfaden oder dünner Metalldraht an seinem unteren Ende isoliert festgeklemmt. Seinem oberen Ende wird eine vom Gehäuse isolierte Elektrode möglichst weit genähert. Die bei der Ladung erfolgende Bewegung des oberen Fadenendes wird mit einem Mikroskop beobachtet. Die Empfindlichkeit beträgt mit einem dünnen Draht aus Phosphorbronze $^1/_{100}$ V/Skt.

Wegen ihrer großen Empfindlichkeit und kleinen Kapazität sind die Elektrometer mit elastischer Gegenkraft besonders auch zur Messung kleiner Elektrizitätsmengen und schwacher Ströme sehr geeignet. Da sie außerdem leicht transportfähig sind, haben sie sich in den letzten Jahren immer mehr eingebürgert. Das gilt im besonderen Maße für die Einfadenelektrometer, da diese noch den weiteren Vorteil aufweisen, daß man durch entsprechende Wahl der Schaltung fast jede gewünschte Empfindlichkeit und Meßbereich herstellen kann.

---

[1]) W. H. Eccles, Electrician **72**, 1044, 1914.

c) Gegenkraft: die Torsionselastizität. Der typische Vertreter dieser Klasse von Elektrometern ist das in der Einleitung beschriebene Thomson-Mascartsche Quadrantelektrometer. Die ersten Verbesserungen, welche hieran vorgesehen wurden, ließen seine klassische Grundform ungeändert und beschränkten sich im wesentlichen auf die Verbesserung der Isolation durch Bernstein und die Anbringung der Natriumtrocknung.

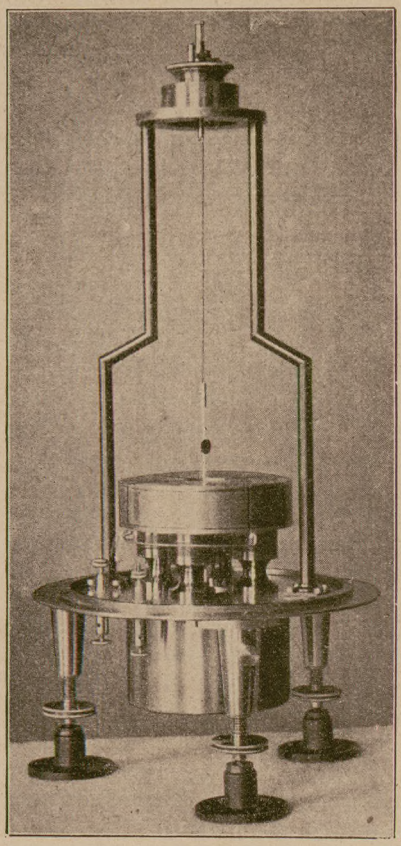


Fig. 47.

Elster und Geitel[1]) erstrebten bei ihrer Konstruktion ein Instrument, das leicht aufgebaut und bei welchem die freie Einstellung der Nadel durch Torsion der Aufhängung sowie die Dämpfung und die Trocknung des Innenraumes unabhängig voneinander reguliert werden konnten (was bei der früheren Schwefelsäuredämpfung nicht möglich war). Die Quadranten (Fig. 47) sind deshalb nicht fest an der Grundplatte befestigt, sondern ruhen mit je drei Stiften auf vier horizontalen, gut isolierten Trägern in entsprechenden Vertiefungen derselben auf. Dadurch ist ein leichtes Abnehmen und Wiederaufsetzen an derselben Stelle gewährleistet. An der Grundplatte sind ferner zwei kräftige Messingsäulen festgeschraubt, die in einer entsprechenden Vorrichtung den Torsionskopf tragen, der in dickes Ebonit eingelassen ist, damit er auch im geladenen Zustand gedreht werden kann. Die Nadel hat die gewöhnliche Lemniskatenform und hängt an einem Platindraht von $^1/_{20}$ mm Durchmesser[2]). Zur Erzielung guter Einstellung ist an der Nadel ein kleiner Magnet angebracht. Mit der Nadel fest in einigem Abstand verbunden ist eine kreisförmige Dämpferscheibe, welche in ein Glas mit Paraffinöl eintaucht; dieses steht in einem weiteren Gefäß mit abgeschliffenem Rand, das von unten an die Grundplatte herangeschoben wird. Die Dämpfung wird durch Zusatz von Petroleum reguliert. Das ganze Instrument wird natürlich durch einen Metallmantel nach außen elektrostatisch geschützt, der nur ein Fenster zur Beobachtung

[1]) J. Elster und H. Geitel, Ann. d. Phys. **64**, 680, 1890.
[2]) Ev. läßt sich auch bifilare Aufhängung anbringen.

mit Fernrohr, Spiegel und Skala enthält. Der Schutzmantel greift mit seinem abgedrehten Rand in eine ringförmige Nut der Grundplatte ein. Er trägt oben einen gut isolierten federnden Stift, durch welchen der Nadel die Ladung zugeführt wird, sowie einen seitlichen Ansatz zur Natriumtrocknung. Die Zuleitung zu den Quadranten erfolgt von unten durch

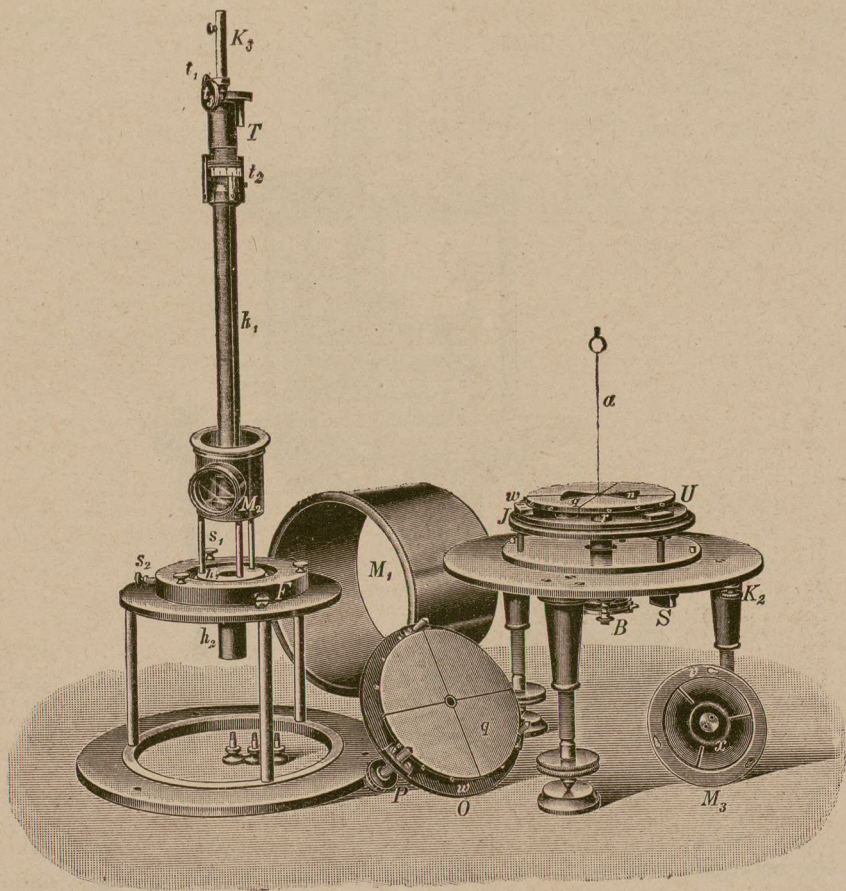


Fig. 48.

Durchbohrungen der Isolatoren hindurch. Die Empfindlichkeit beträgt im allgemeinen 0,005 V/Skt. (die sich wie auch alle folgenden Angaben auf 2 m Skalenabstand bezieht). Falls man die Nadel aus der symmetrischen Höhenstellung herausbringt und sie den unteren Quadrantenplatten möglichst nähert, kann die Empfindlichkeit bis auf 0,001 V/Skt. gesteigert werden, doch sind dann die Ausschläge nicht mehr symmetrisch. Zur Messung größerer Potentiale, z. B. bei der Bestimmung des atmosphärischen Poten-

tialgefälles, entfernt man die Quadranten ganz und benutzt nur die Quadrantenträger[1]).

Ein anderes leicht transportables und justierbares Quadrantelektrometer ist von Gerdien[2]) angegeben. Bei diesem ist die Nadel in der Mitte eines Platindrahtes angelötet, welcher zwischen den beiden Enden eines

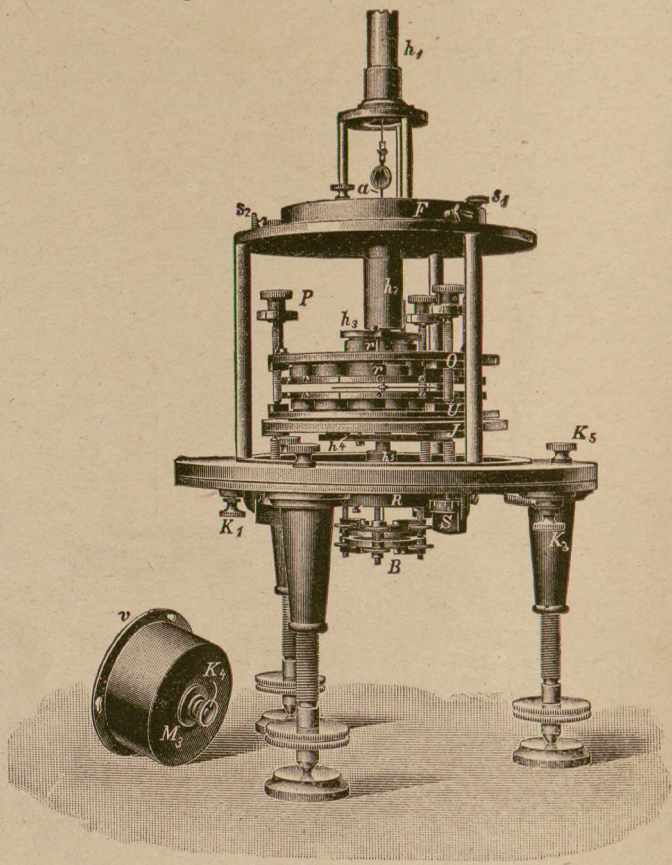


Fig. 49.

Messingbügels ausgespannt ist. Die Nadel ist teilweise so umgebogen, daß eine kleine vertikale Fläche entsteht, welche den Spiegel trägt und auch zur Vergrößerung der Luftdämpfung beiträgt. An den Platindraht ist ferner ein kleiner Magnet angekittet; durch Verschiebung eines äußeren Magneten läßt sich die Nadel so leicht in die symmetrische Stellung bringen und ferner die Empfindlichkeit variieren. Die Quadrantenschachteln sind vorn und hinten ausgespart, um den Durchblick auf den Spiegel und den

---

[1]) Ein ähnliches von Ebert konstruiertes Elektrometer wird weiter unten bei den Registrierinstrumenten besprochen.

[2]) Katalog von Spindler und Hoyer, Göttingen.

Durchtritt des Messingbügels zu ermöglichen. Sie sind an dem Deckel des Gehäuses isoliert befestigt.

Auch das von Schultze[1]) beschriebene Quadrantelektrometer, das hauptsächlich für dynamische Messungen bestimmt war, wird für manche elektrostatische Präzisionsmessungen von Vorteil sein und sei deshalb hier kurz beschrieben. Durch die Grundplatte (Fig. 48 u. 49)[2] gehen drei

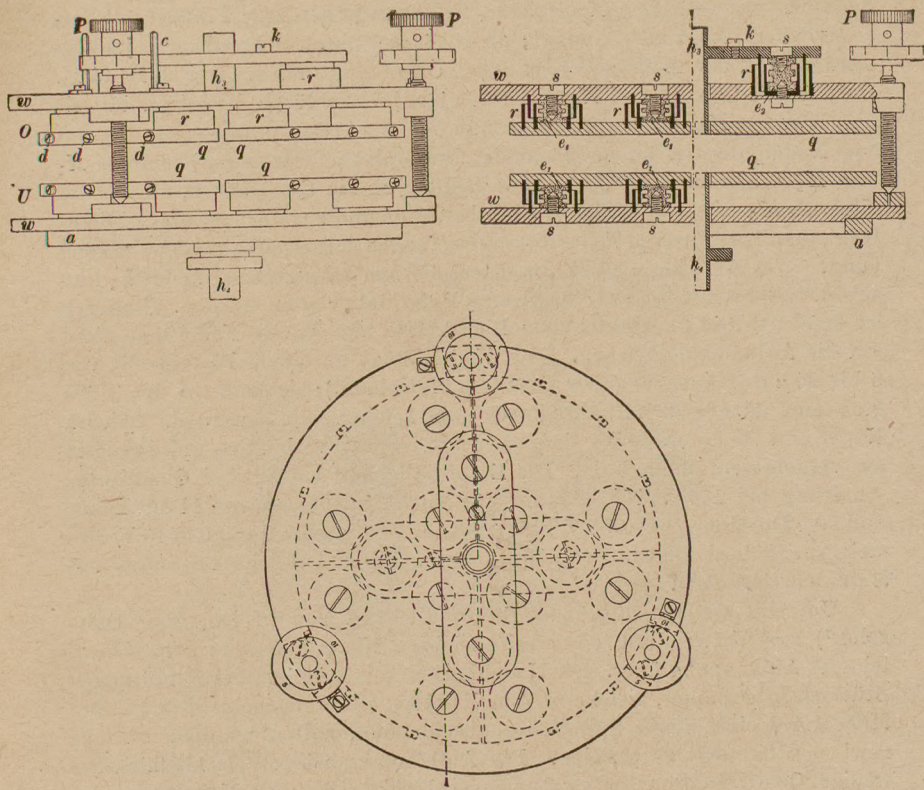


Fig. 50.

Schrauben S (mit geteilten Köpfen) von 0,8 mm Ganghöhe hindurch und gestatten eine genaue Einstellung des Ringes J von 8 cm innerem Durchmesser, der mit den Schrauben durch eine Art Kugelgelenk verbunden ist. In die Ausdrehung von J wird das Quadrantensystem mittels des mit ihm verbundenen Ringes a (Fig. 50)[2]) so eingesetzt, daß die Verlängerung seines einen Schlitzes durch eine der drei Schrauben S geht. Die Quadranten bestehen aus den eben abgeschliffenen und vergoldeten Platten q, welche an den Trägerplatten w befestigt und von ihnen durch die Ebonitklötze e

[1]) H. Schultze, ZS. f. Instrkd. **27**, 65, 1907; die Abhandlung enthält auch wichtige Angaben über den Aufbau und den Gebrauch des Instrumentes.
[2]) Aus ZS. f. Instrkd. **27**, 66, 67, 68, 1907.

isoliert sind, die durch drei kleine Messingröhrchen r abgeschirmt werden. Die beiden Systeme O und U werden durch drei Präzisionsschrauben P von 0,5 mm Ganghöhe in einem bestimmten meßbar, veränderlichen Abstand voneinander gehalten.

Unter der Grundplatte ist isoliert eine Luftdämpfung B angebracht (Fig. 49), welche für sehr empfindliche Systeme allerdings entbehrlich ist; diese besteht aus einer Kreisplatte, welche zwischen zwei Platten mit veränderlichem Abstand schwingt; diese können durch Schrauben so justiert werden, daß der Aufhängedraht ihre Öffnungen immer frei durchsetzt. Darüber wird der Mantel M_3 mit drei Bajonettverschlüssen befestigt. Mittels der Klemme K_4 und der Feder x läßt sich die Dämpfungsvorrichtung auf das Nadelpotential laden. Die an der Grundplatte befestigten Klemmen K_1 und K_2 dienen zur Zuführung der Ladung an die Quadranten, mittels der Klemme K_5 wird das obere Gestell befestigt und zugleich geerdet. Dieses trägt den Torsionskopf T, der durch eine Tangentialschraube gedreht werden kann. Die Aufhängung ist von den isolierten Schutzrohren h_1 bis h_5 umgeben, welche mit ihr auf das gleiche Potential geladen werden. Dadurch ist erreicht, daß die elektrischen Richtkräfte nur auf die Nadel und nicht auf die Aufhängung wirken. Die Nadel hängt an einem Platindraht von 5 bis 20 μ Durchmesser (oder an einem Platinband); sie kann in der Höhe grob und mittels der Mikrometerschraube t_2 fein verstellt werden. Spiegel, Nadel und Dämpferscheibe sind starr miteinander verbunden und bestehen aus vergoldetem Magnalium. Die Empfindlichkeit beträgt bei Quadranten schaltung bei 150 V Nadelladung für einen Platinfaden von 11 cm Länge und 20 μ Durchmesser 0,005 V/Skt. und läßt sich maximal auf 0,0015 V/Skt. steigern. Für elektrostatische Messungen müssen sämtliche Isolatoren aus Bernstein bestehen.

Um eine wesentlich größere Empfindlichkeit zu erzielen, ging Dolezalek[1]) zur Verwendung einer sehr leichten Nadel und dementsprechend feinerer Aufhängung über. Die Nadel besteht aus zwei lemniskatenförmigen Stücken Silberpapier, welche an den Rändern zusammengeklebt und in der Mitte durch eine kleine Spiralfeder auseinandergehalten werden, um eine gewisse Steifigkeit zu erzielen. Die Aufhängung wiegt einschließlich des wenige Quadratmillimeter großen Spiegels nur 0,2 g; die Nadelbewegung ist infolge der Luftdämpfung aperiodisch. Zur Aufhängung dienen Quarzfäden von 3 bis 9 μ Durchmesser, die entweder durch Eintauchen in Chlorkalziumlösung oder besser durch Kathodenzerstäubung leitend gemacht sind, oder Wollastondrähte von 5 bis 10 μ Dicke. Die erstere Form ist, besonders im heißen Klima, wenig geeignet; außerdem darf bei dieser das Elektrometer nicht getrocknet werden. Die Fäden sind an kleine Y-Haken angekittet. Bei einer von W. Wien angegebenen Konstruktion wird die Nadel nicht durch den Aufhängefaden, sondern von unten durch einen Platinkontakt geladen, der während der Messung von der Nadel entfernt wird. Die Aufhängung erfolgt in diesem Falle an einem reinen Quarzfaden,

---

[1]) F. Dolezalek, ZS. f. Instrkd. **31**, 345, 1901.

wodurch eine gute Isolation gesichert ist; bei länger dauernden Messungen muß aber immerhin der allmählich erfolgende Ladungsverlust berücksichtigt werden. Die Innenmaße der Quadranten sind 50 mm Durchmesser und 7,5 mm Höhe. Durch Drehen des Torsionskopfes wird die Nadel symmetrisch zu ihnen eingestellt; ihre Höhenlage wird durch die über dem Torsionskopf befindliche Mutter (Fig. 51) reguliert. Durch kleine Drehungen der Fußschrauben läßt es sich erreichen, daß die Ausschläge nach beiden Seiten gleich werden.

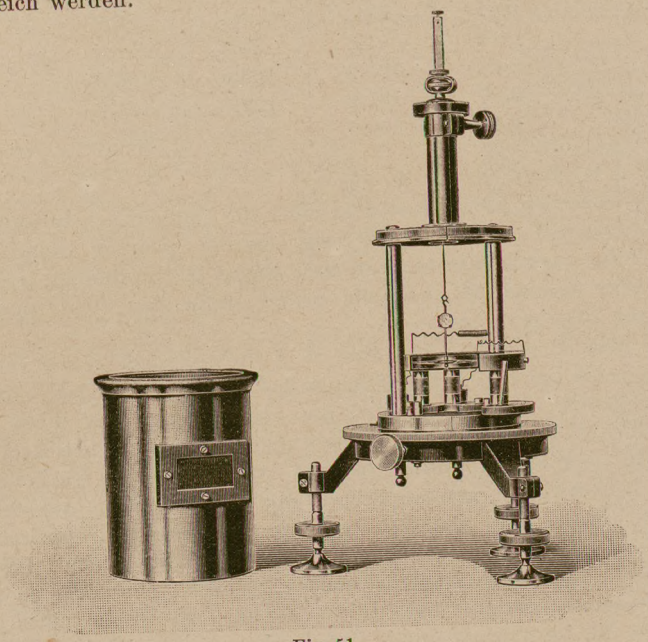


Fig. 51.

Bei einer Nadelladung von 110 V und 60 mm Fadenlänge beträgt die Empfindlichkeit bei einem Quarzfaden von 4 μ Durchmesser $6 \cdot 10^{-5}$ V/mm, bei einem solchen von 9 μ Dicke etwa $4 \cdot 10^{-4}$ V/mm. In diesem Falle ist das Dämpfungsverhältnis gleich 7 und die Schwingungsdauer 18 s; bei dem schwächeren Faden steigt sie auf den schon etwas unbequemen Wert von 60 s. Bei noch geringerem Wert würde die Nadel kriechen; umgekehrt kann man die Schwingungsdauer durch Verwendung dickerer Fäden stark herabsetzen. Bei 0,02 mm Dicke beträgt sie nur noch 3,5 s bei einer Empfindlichkeit von 0,007 V/mm. Angenähert gilt die Beziehung, daß bei 8 μ übersteigenden Durchmessern die Empfindlichkeit umgekehrt proportional der vierten, bei solchen von unter 8 μ Dicke etwa umgekehrt proportional der dritten Potenz des Durchmessers ist. Bei dem 9 μ starken Faden besteht bis zu 200 Skt. ziemlich gute Proportionalität zwischen kommutiertem Ausschlag und angelegtem Potential, wie aus Tabelle IX hervorgeht.

Tabelle IX.

Volt	Kommut. Ausschlag	Auf Bogen reduziert	Berechnet
0,001	2,4	2,4	2,6
0,002	5,2	5,2	5,2
0,004	10,5	10,5	10,4
0,01	26,1	26,1	25,9
0,02	51,8	51,8	51,8
0,04	103,9	103,6	103,6
0,07	181,6	179,7	181,3
0,10	259,9	254,4	259,0

Die Kapazität beträgt 80 cm.

Das Dolezalek-Elektrometer ist auch für Unterseekabelprüfungen verwendet worden[1]). Hier braucht man zuweilen kleinere Empfindlichkeiten. Bei den dazu benutzten stärkeren Fäden ist die Bewegung der Nadel nicht mehr aperiodisch, weshalb Sayers dafür eine elektromagnetische Dämpfung angebaut hat.

Bei jeder Drehwage kann man die Empfindlichkeit n mal vergrößern, wenn man die linearen Dimensionen n mal verkleinert und gleichzeitig die Direktionskraft so abändert, daß die Schwingungsdauer ihren früheren Wert beibehält, da bei kleineren Abmessungen die elektrischen Kräfte besser ausgenutzt werden. Allerdings besteht dann nicht mehr wie bei der klassischen Konstruktion genaue Proportionalität zwischen Ausschlag und Potential (bezw. dem Quadrat des Potentials bei der Doppelschaltung). Auf Grund dieser Überlegungen hat Paschen[2]) ein kleines Instrument konstruiert, das wegen seiner geringen Kapazität besonders zu radioaktiven Messungen geeignet sein dürfte, zumal auch wegen seines geringen Volumens die Ionisierung durch die durchdringende Strahlung stark herabgedrückt ist. Die Quadranten sind hier zylinderförmig gestaltet und besitzen einen inneren Durchmesser von 9 mm bei einer Höhe von 30 mm. Die diagonal gegenüberliegenden Quadranten sind innen verbunden; die äußeren Zuleitungen gehen auch hier durch die Bernsteinisolatoren hindurch. In dem Raume zwischen den Quadranten hängt ein Kupferblättchen (0,01 mm dick, 6 mm breit und 12 mm lang) genau parallel zur Zylinderachse, so daß seine Fläche in die Verbindungslinie der Schlitze der Zylinderquadranten fällt. Das Blättchen wird durch Walzen zwischen Aluminium hergestellt, ausgeglüht und dann zwischen dickem Karton völlig eben gewalzt. Über die Quadranten wird eine innen verkupferte Büchse gestülpt, deren abnehmbarer Deckel ein Rohr mit dem Torsionskopf trägt. Das Kupferblech ist an einem geraden dünnen Kupferdraht genau zentriert, der auch den Spiegel von 5 mg Gewicht trägt, und hängt an einem

[1]) R. M. Sayers, Electrician **64**, 177, 1909.
[2]) F. Paschen, Physik. ZS. **7**, 492, 1906.

Wollastondraht von 5 bis 6 μ Durchmesser und 12 cm Länge; dieser ist an ein Stückchen Kupferdraht angelötet, der vom Torsionskopf durch Bernstein isoliert ist. Außer dem Ablesefenster besitzt das Gehäuse noch ein weiteres Fenster zur Erleichterung der Justierung, die mit Hilfe der Fußschrauben und der Mikrometerschraube am Torsionskopf erfolgt; nach der Justierung wird dieses Fenster durch einen Kupferring geschlossen. Da alle Metallteile aus Kupfer bestehen, bleiben die Kontaktpotentialdifferenzen unter 0,01 V.

Trotz der Abweichung von der durch die Theorie geforderten klassischen Form ist der Ausschlag doch nahezu dem Potential proportional. Die Empfindlichkeit ist bei Doppelschaltung 0,03 V/mm, bei Quadrantenschaltung (40 V Nadelladung) 10^{-4} V/mm; die Kapazität beträgt 8 bezw. 15 cm, die Schwingungsdauer 15 s. Durch weitere Reduzierung aller Abmessungen, dünneren Aufhängefaden und kleineren Spiegelwürde sich die Empfindlichkeit noch weiter steigern lassen.

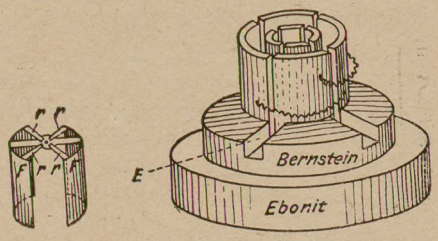


Fig. 52.

Ein ähnliches Elektrometer mit Zylinderquadranten ist von Kleiner[1]) angegeben und dann von Mülly[2]) vervollkommnet worden[3]). Die genau ausgedrehten Quadranten aus vergoldetem Messing sind konzentrisch auf einer Bernsteinplatte angeordnet (Fig. 52)[4]). Die größte Empfindlichkeit ergab sich bei folgenden Dimensionen:

Äußerer Durchmesser der inneren Quadranten	8 mm
Innerer Durchmesser der äußeren Quadranten	12 »
Höhe der Quadranten	12 »
Durchmesser der Nadel	12 »

Diese Maße müssen bis auf 0,1 mm innegehalten werden, um nicht unsymmetrische Ausschläge zu bekommen. Die zylinderförmige Nadel F wird aus 0,05 mm dickem Aluminiumblech gebogen und an einem Platindraht von 3 bis 7 μ Durchmesser aufgehängt; damit sie nicht an die Quadranten herangezogen wird, muß man sie durch einige Zehntel Gramm beschweren. Bei einem Nadelgewicht von 3 g (einschließlich des Spiegels) und einer Fadenlänge von 4,5 cm kann man bei einem 3 μ dicken Faden 30 V, bei einem 5 μ starken 100 V und bei einem solchen von 7 μ Durchmesser bereits 150 V als Hilfspotential anlegen. Mit zunehmender Hilfsladung wächst die Empfindlichkeit rascher, als der direkten Proportionalität entsprechen würde (s. Fig. 53)[4]). Das Elektrometergestell entspricht dem

---

[1]) A. Kleiner, Vierteljahrsschr. d. Naturf. Ges. Zürich, **51**, 226, 1906.
[2]) Ch. Mülly, Physik. ZS. **14**, 237, 1913; Vierteljahrsschr. d. Naturf. Ges Zürich **89**, 96, 1914.
[3]) Das Elektrometer von Kleiner wird zur Erzielung geeigneter Dämpfung evakuiert und ev. mit Wasserstoff gefüllt.
[4]) Aus ZS. f. Instrkd. **33**, 285, 193.

eines Dolezalekelektrometers und ist noch mit zwei Tangentialschrauben zur symmetrischen Einstellung der Nadel versehen. Damit die Nadel bis auf 0,1 mm eingestellt werden kann, muß das Gewinde der Fußschrauben genügend fein sein.

Die Empfindlichkeit beträgt bei einem 5 μ-Faden und 105 V Nadelladung $3 \cdot 10^{-5}$ V/mm bei 10 bis 17 s Schwingungsdauer. Die Bewegung ist aber nicht aperiodisch, sondern die Nadel kommt erst nach drei Schwingungen zur Ruhe. Die Empfindlichkeit läßt sich zeitweise auf das Doppelte steigern, aber nur auf Kosten der sonst guten Konstanz der Ruhelage. Die Kapazität beträgt nur 1 bis 2 cm.

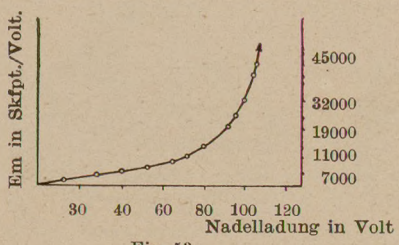


Fig. 53.

Für das Quadrantelektrometer in Nadelschaltung gilt allgemein die Gleichung

$$k_2\, a = k_1\,(V_1 - V_2)\left(N - \frac{V_1 + V_2}{2}\right),$$

wo a der Ausschlag, N das Nadelpotential, V_1 und V_2 die Quadrantenpotentiale, k_2 die Direktionskraft des Aufhängefadens und $k_1 = R^2/\pi \cdot h$ sind (R der Nadelradius, h die Höhe der Quadranten). Der Ausschlag ist also nicht streng der Spannungsdifferenz $V_1 - V_2$ proportional. Den dadurch verursachten Fehler kann man zwar durch Kommutieren der Spannungsdifferenz vermeiden, doch ist dies Verfahren, wie z. B. bei der Messung von Sättigungsströmen, nicht immer angängig. Bei kleinen Nadelladungen werden die beiderseitigen Ausschläge, wie man aus der Formel ersieht, sehr ungleich. Auch für größere Nadelladungen bleibt der Ausschlag nicht proportional N, und man muß dann die Gleichung in der Form ansetzen:

$$k_2\, a = k_1\, N\,(V_1 - V_2) - k_3\, N^2\, a,$$

und es wird die Empfindlichkeit

$$S = \frac{a}{V_1 - V_2} = \frac{k_1\, N}{k_2 + k_3\, N^2}.$$

Ein weiterer Grund dafür ist, daß bei derNadeldrehung um einen bestimmten Winkel eine Kapazitätsänderung auftritt, die eine Funktion des Ausschlages und der Nadelladung ist.

Unter Berücksichtigung dieser wird

$$S = \frac{k_1\, N}{k_2 + k_3\, N^2 + k_4\, N^2/C}.$$

Durch geeignete Wahl der Instrumentenkonstanten k_3 kann man den Nenner sehr klein und damit die Empfindlichkeit sehr groß machen, doch tritt dann der Übelstand auf, daß bei der Erdung des isolierten Quadrantenpaares die Nadel instabil wird.

Nahezu konstante Empfindlichkeit kann man nun nach Compton[1]) erreichen, wenn man die Nadel (die aus platiniertem Glimmer oder aus Platinfolie besteht) um ihre lange Achse ein wenig neigt und gleichzeitig den einen Quadranten etwas hebt oder senkt, was naturgemäß zweckmäßig von außen erfolgen muß. Hierdurch läßt sich die Empfindlichkeit innerhalb beliebig weiter Grenzen verändern. Um die zur Messung kleiner Ladungen nötige geringe Kapazität zu erreichen, wählt man Nadel (Durchmesser 14 bis 9 mm) und Quadranten möglichst klein; dann kann man eine Empfindlichkeit bis $1 \cdot 10^{-5}$ V/mm erreichen.

Die konstante und möglichst große Empfindlichkeit sucht Parson[2]) dadurch zu erzielen, daß er den Spalt zwischen den Quadranten entsprechend einstellt. Zwecks Verringerung der Kapazität bestehen diese aus vier flachen Sektoren (Fig. 54)[3]) aus 0,5 mm starkem Blech von 2,1 cm Außen- und 0,75 cm Innendurchmesser, deren jeder einen Winkel von 70° umfaßt. Sie sind an einer Schere befestigt, welche von außen mit einer Schraube betätigt wird, so daß sich der Abstand zwischen A und B bezw. A' und B' bis auf 2 mm vergrößern läßt. Dabei wird die Nadel in ihrer symmetrischen Lage immer weniger stabil, während gleichzeitig die Empfindlichkeit bis auf $2 \cdot 10^{-5}$ V/mm wächst. Da die Ladung der Nadel durch die Verteilung der elektrischen Kräfte bedingt und völlig unabhängig von der Torsionskraft des Fadens ist (falls diese nicht sehr groß ist), so könnte man auch eine schwimmende Nadel verwenden.

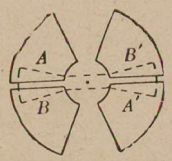


Fig. 54.

Der Aufbau des Elektrometers ist in Fig. 55[4]) dargestellt. In dem zylindrischen Gehäuse von 5 cm Durchmesser und 4,5 cm Höhe mit einem durch den Schirm S elektrostatisch geschützten Fenster von 2 cm² liegen die Sektoren, von denen zwei mittels kurzer Drahtstücken an den Scherenarmen befestigt sind, während die anderen beiden durch die Quarzsäulen Q' von ihnen isoliert werden; ihre Zuleitungen sind durch das Gehäuse in dünnen Quarzröhren nach außen geführt. Die Nadel hängt an einem Torsionskopf, der, um eine konstante Höhenlage (und, falls nötig, eine gute Isolation) zu sichern, von dem Quarzrohr Q getragen wird. Die Ladung erfolgt durch Drehen des

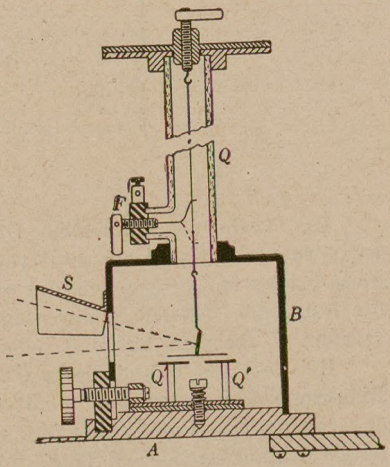


Fig. 55.

[1]) A. H. Compton und R. T. Compton, Phys. Rev. **14**, 85, 1919.
[2]) A. L. Parson, Phys. Rev. **6**, 390, 1915; s. auch G. E. M. Jauncey und G. J. Buchner, Phys. Rev. **8**, 248, 1916.
[3]) Aus ZS. f. Instrkd. **36**, 191, 1916.
[4]) Aus ZS. f. Intrkd. 190, 191, 1916.

kleinen Schlüssels *F*, wodurch sich ein feiner Platindraht gegen das aus Platin bestehende Gehänge (von 17 mg Gewicht) legt, welches den 10 mg wiegenden Spiegel und die 3 mg schwere Nadel aus sehr dünner Aluminiumfolie trägt. Von Bedeutung für gutes Funktionieren ist auch ihre Form, Breite und Krümmung, sowie ihr Abstand von den Sektoren. Am besten bewährt hat sich eine Nadel von 4 mm Breite und 16 mm Länge. Bei Annäherung an die Sektoren wächst die Empfindlichkeit und nimmt die Schwingungsdauer ab, kommt aber auch leicht in das Gebiet der Instabilität. Wegen Unruhe der Nadel kann man die Empfindlichkeit praktisch nur bis $7{,}5 \cdot 10^{-5}$ V/mm steigern. Die Kapazität beträgt 9 cm.

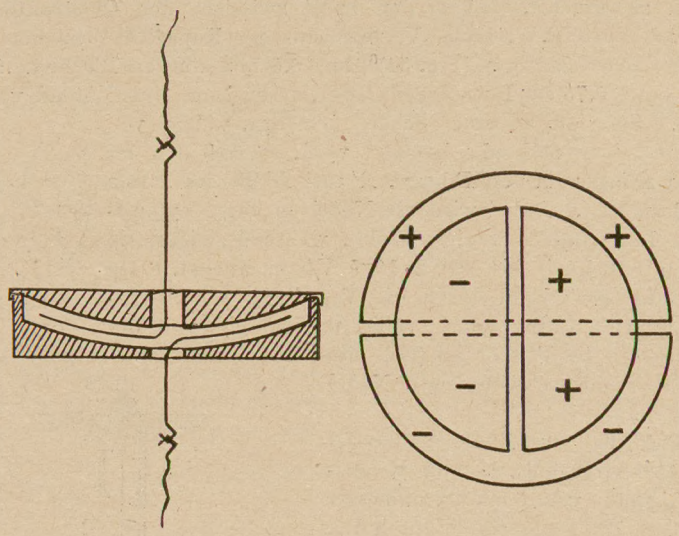


Fig. 56.

Die vorher geschilderten Übelstände lassen sich auch vermeiden, wenn man die Nadel aus zwei voneinander isolierten Teilen herstellt und diese beiden auf entgegengesetzt gleiche Potentiale ladet. Es treten dann die störenden Glieder in der obigen Gleichung zweimal mit entgegengesetztem Vorzeichen auf und heben sich dadurch weg.

Bei dem auf Grund dieser Überlegungen von Dolezalek[1]) angegebenen Binantenelektrometer sind somit die Ausschläge streng proportional zu dem gesuchten Potential. Die vier Quadranten sind durch eine zweiteilige Binantenschachtel (Fig. 56) ersetzt. In dieser bewegt sich die aus zwei durch Bernstein voneinander isolierten Halbkreisen bestehende Nadel aus 0,01 bis 0,02 mm dickem Aluminium, die durch eingedrückte konzentrische Riefen versteift ist. Damit die Nadel bei stärkeren Ladungen nicht anpendeln kann, sind Binanten und Nadel nicht eben, sondern als konzentrische flache Kugelschalen ausgebildet, deren Mittelpunkt im Aufhänge-

[1]) F. Dolezalek, Wied. Ann. **26**, 312. 1901.

punkt der Nadel liegt. Durch diese Form wird die Nadel noch weiter versteift. Die Zuleitung zur einen Nadelhälfte erfolgt von oben durch den Aufhängedraht, die zur anderen von unten durch einen dünnen Faden, der auf die Empfindlichkeit fast ohne Einfluß ist. Der äußere Aufbau ist ähnlich dem des Quadrantelektrometers. Für den Transport wird die Nadel durch Herablassen bis zum Auflegen auf die Binanten arretiert; eine Marke an der Nadel erleichtert das nachherige Wiedereinstellen in der richtigen Höhe.

Daß der gewünschte Zweck, Proportionalität zwischen Ausschlag und Potential einerseits und kontinuierlich zunehmende Empfindlichkeit mit wachsender Nadelladung anderseits erreicht ist, geht aus den Tabellen X und XI hervor.

Tabelle X.

Pot. Differenz a.d. Binanten in Volt	Ausschlag	
	beobachtet	auf Bogen reduz.
0,02	10,20	10,20
0,20	102,16	102,08
0,40	204,80	204,14
0,60	308,06	306,62
0,80	411,77	406,18

Tabelle XI.

Nadelladung in Volt	Ausschlag in mm/Millivolt	
	Binanten-Elektrometer.	Quadrant-Elektrometer.
100	2	2
200	4	3,5
300	5,9	3,7
400	6,8	3,4
500	7,5	3,2
600	8,2	3,0
700	8,7	2,8
800	9,2	
900	9,7	

Bis zu 300 Skt. ist also der Ausschlag streng dem Potential proportional. Die Empfindlichkeit ist ferner bis 300 V dem Nadelpotential N proportional; mit zunehmendem N wächst die Empfindlichkeit, wenn auch langsamer, weiter, bis sie für etwa 1500 V ein Maximum erreicht, während sie beim Quadrantelektrometer schon weit früher wieder abnimmt.

Die Empfindlichkeit beträgt bei einem Platinfaden von 0,01 mm Durchmesser und 10 cm Länge (während die untere Zuleitung durch 3 cm Platin von 0,004 mm Durchmesser erfolgt) bei einer Hilfsladung von

$\pm$ 65 V $2 \cdot 10^{-3}$ V/mm; dabei beträgt die Schwingungsdauer 12 s, und das Dämpfungsverhältnis ist gleich 9. Bei großer Nadelladung läßt sich die Empfindlichkeit bis auf $3 \cdot 10^{-4}$ V/mm steigern. Durch Änderung des Nadelpotentials kann man den Meßbereich über 5 Zehnerpotenzen erstrecken. Mit sehr dünnen Fäden kann man sogar eine Empfindlichkeit von $5 \cdot 10^{-5}$ V/mm erreichen, doch wird dann die Schwingungsdauer unbequem groß.

Durch die Teilung der Nadel in zwei Hälften wird die Empfindlichkeit bei sonst gleichen Verhältnissen doppelt so groß wie beim Qua-

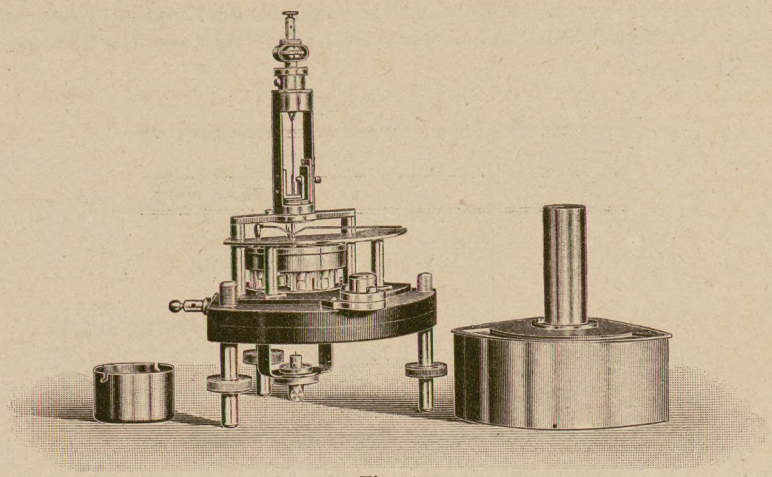


Fig. 57.

drantelektrometer; da aber die Kapazität auch verdoppelt ist, so ist die Ladungsempfindlichkeit dieselbe geblieben.

Wegen der strengen Proportionalität zwischen Ausschlag und Ladung kann man das Binantenelektrometer auch als Zeigerinstrument (Fig. 57) benutzen und an diesem Potentiale wie an den üblichen technischen Voltmetern ablesen. Die Skala darf 100° umfassen, da bis hierher der lineare Zusammenhang zwischen Ausschlag und Potential recht gut erfüllt ist. Die Empfindlichkeit beträgt bei einem 5 cm langen Platinfaden von 0,01 mm Durchmesser und einer Hilfsladung von $\pm$ 100 V 0,13 V/Grad. Durch Erhöhung der Spannung und Verwendung dünnerer Fäden (0,007 mm) läßt sich die Empfindlichkeit bis auf 0,03 V/Grad steigern, doch ist dann die Proportionalität weniger gut. Bei dickeren Fäden läßt sich der Meßbereich bis auf 1600 V erhöhen, so daß das Instrument sehr gut zur Messung des atmosphärischen Potentialgefälles geeignet sein dürfte. Da bei der Doppelschaltung der Ausschlag nahe proportional zum Quadrat der Spannung ist, ist das Instrument auch zur Messung von Wechselstromspannungen und als Wattmeter brauchbar[1]).

[1]) Die Vorteile des Binanten-Elektrometers kann man bis zu gewissem Grade auch beim Quadrantelektrometer erreichen, wenn man zwei voneinander isolierte Nadeln

Durch Kombination des Prinzipes des Quadrantelektrometers mit dem des Hankelschen Elektrometers ist es Hofmann[1]) gelungen, ein Instrument von etwa der gleichen Empfindlichkeit, aber wesentlich kleinerer Kapazität als das Dolezalek-Elektrometer zu bauen. Es besteht im wesentlichen aus zwei durch einen schmalen Schlitz getrennten und sorgfältig eben geschliffenen Scheiben von 18 mm Durchmesser (Fig. 58[2]), die mittels Ebonitsäulen auf einer drehbaren und durch Klemmbacken festzustellenden Grundscheibe ruhen. Ihre Anschlüsse sind gut isoliert und luftdicht zu Klemmen unter der Grundplatte geführt (Fig. 60), wo sich auch die Erdungsklemme für das Gehäuse befindet. In jene sind drei Messingsäulen eingeschraubt, welche oben durch eine zweite Kreisplatte verbunden sind. Zentrisch in dieser sitzt ein dickwandiger, um seine Achse drehbarer und in seiner Längsrichtung verschiebbarer Messingzylinder M (Fig. 59)[2]), in welchem sich der Isolator S aus Bernstein

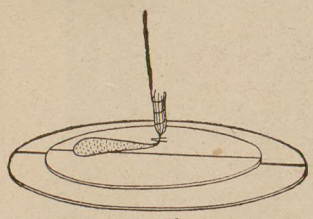


Fig. 58.

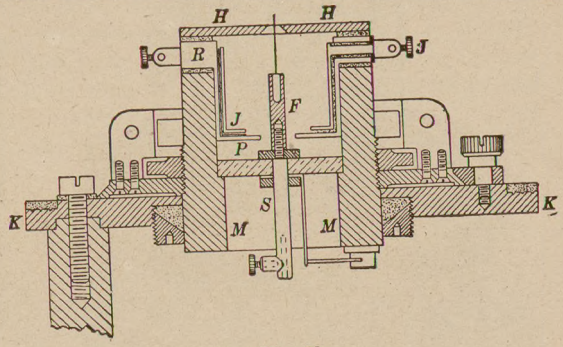


Fig. 59.

oder Quarz befindet; an diesem hängt die Nadel durch Vermittlung eines Messing-, Silber- und Wollastondrahtes. Der Zylinder M ist mit einem Gewinde versehen, in welches eine in 10 Teile geteilte Schraubenmutter eingreift. Dadurch läßt sich der Abstand des Systems von den Duanten meßbar ändern, während die Azimuteinstellung durch eine mit Gradeinteilung versehene Horizontalscheibe erfolgt. Temperaturänderungen sind durch Zwischenstücke aus Invar in den drei Messingsäulen kompensiert. Damit die Gleichheit des Potentiales aller Teile gewährleistet ist, muß der ganze spannungsempfindliche Körper in sich fest verlötet und verschraubt sein und auf völlige Sauberkeit der Metallflächen geachtet werden. Zum Schutz gegen Temperaturschwankungen sind die Duanten oben und unten durch Ebonit isoliert und dann in einem doppelwandigen, dicken Kupfermantel eingeschlossen (den man in Fig. 60 beiseite gerückt sieht). Außer dem Schlitz befindet sich in diesem nur

kreuzweise zueinander stellt und sie auf entgegengesetzt gleiche Potentiale ladet, oder wenn man zwei isolierte an derselben Achse befindliche Nadeln in zwei übereinandergestellten Quadrantenschachteln spielen läßt.

[1]) G. Hofmann, Physik. ZS. **13**, 480, 1029, 1912; Ann. d. Phys. **42**, 1196, 1913; **52**, 665, 1917.

[2]) Aus ZS. f. Instrkd. **39**, 292, 1919.

eine Öffnung zur Beobachtung des Spiegels, die durch ein mit dem Gehäuse verbundenes Drahtgitter abgeschirmt ist, sowie eine obere Öffnung, die sich in zwei Halbrohre fortsetzt, welche den Aufhängedraht umschließen, so daß alle von dem System ausgehenden Kraftlinien auf Leitern enden. Gegen Kontaktpotentiale schützt eine vollständige Platinierung der Dose. Trotzdem traten an den Duanten noch solche von 6, an der Nadel von 16 Millivolt auf. Über die Deckplatte wird der dicht schließende Mantel ge-

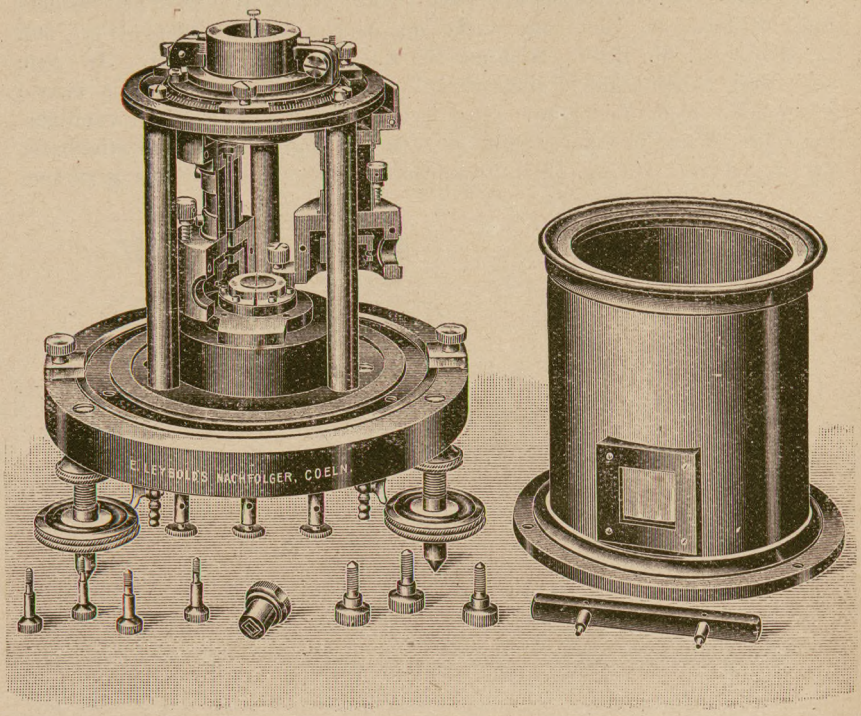


Fig. 60.

schoben und dann mit einem abgeschliffenen Flansch auf der Grundplatte festgeschraubt. Während der Beobachtungen ist ein Vakuum von etwa 1 mm aufrecht zu erhalten, wozu die Grundplatte mit zwei Hähnen versehen ist.

Die möglichst leicht ausgeführte Nadel hat die Form eines Kreissektors (Fig. 58), dessen Spitze in der Drehachse liegt. Sie besteht aus Platin-Iridiumfolie, in die zur Versteifung ein Quadratmuster von Erhöhungen und Vertiefungen eingeprägt ist; aus demselben Grunde ist sie am Rande mit Draht umgeben. Zur Ausbalancierung dienen die angeschweißten X-Haken und ein Körbchen, das aus Folie und feinstem kreuzweise verschweißtem Draht hergestellt ist, in welchem der Spiegel von 2×2 mm² zwangfrei ruht. Das ganze System wiegt etwa 12 mg.

Zum Elektrometer gehört noch eine Influenzierungseinrichtung, welche gestattet, dem System eine genau meßbare Ladung durch Influenz mitzuteilen. Dazu wird auf den Systemhalter S (Fig. 59) ein kleines mit Quecksilber gefülltes Röhrchen F aufgesetzt (das auch zum Anschluß anderer Apparatteile dient), auf welchem die Ladungen durch den auf ein bekanntes Potential geladenen Ring J influiert werden. Die geerdete Ansatzplatte P, Deckplatte H und Ring R bewirken die Abschirmung des Isolators. Zur Bestimmung des Influenzierungskoeffizienten wird auf den Apparat ein sehr präzis gearbeiteter Schutzringkondensator aufgesetzt, dessen Influenzierungskoeffizient sich aus seinen Abmessungen berechnen läßt[1]).

Bei dem Hofmannschen Elektrometer wird das an die Duanten gelegte Hilfspotential nicht nur — wie beim Quadrantenelektrometer — zur Steigerung der elektrischen Kräfte, sondern (wie beim Hankelschen Prinzip) gleichzeitig auch zur Kompensation der Richtkraft der Aufhängung benutzt. Ähnlich wie bei den Einfadenelektrometern kann man es deshalb durch geeignete Wahl des Hilfspotentials erreichen, daß die Eichkurve in einem gewissen Intervall (bis zu 300 Skt.) geradlinig verläuft; bei größerem Hilfspotential wird der Verlauf der Eichkurve S-förmig und unter Umständen im mittleren Teile labil. Zwischen der maximalen Empfindichkeit E_M und dem Hilfspotential V besteht die Beziehung

$$E_M = \frac{a \cdot V}{q - b \cdot V^2},$$

wo a und b Instrumentenkonstanten sind und q eine Größe bedeutet, welche der Direktionskraft proportional ist. Bei kleiner Hilfsladung ist die maximale Empfindlichkeit proportional zu V (hier ist die Skala gleichförmig); mit zunehmendem V wächst aber E_M wegen der elektrischen Astasierung schneller. Zur Veranschaulichung dieses Zusammenhanges diene die Tabelle XII.

Tabelle XII.

V	1,7	4,3	6,3	8,6	10,5
	11,5	12,0	12,7	13,0	13,2
mm/V	29	100	200	320	670
	1300	1640	3600	(7900)	(12 200)

Bei den beiden eingeklammerten Werten sind die Einstellungen nicht mehr konstant. Wegen des kleinen Luftvolumens sind Schwankungen der Ionisierung von großem Einfluß; dadurch können Nullpunktsverschiebungen bis zu einigen Millimetern hervorgerufen werden.

Die größte Empfindlichkeit beträgt etwa $5 \cdot 10^{-5}$ V/mm. Die Kapazität hängt von der Größe der Hilfsladung ab und beträgt im Mittel 5 cm. Man kann mit diesem Instrumente die von einem einzelnen α-Teilchen auf dem Wege von 1 cm erzeugten Ionen nachweisen (sie bewirken einen Ausschlag von etwa 1 mm).

---

[1]) s. auch G. Hofmann, Physik. ZS. **15**, 360, 1914.

Bei den bisher beschriebenen empfindlichen Laboratoriumsinstrumenten wird die Torsion des Aufhängefadens als Gegenkraft benutzt; sie bedürfen deshalb im allgemeinen einer festen Aufstellung. Die Meßtechnik hat nun aber ein entschiedenes Bedürfnis nach empfindlichen elektrostatischen Voltmetern, welche direkt die Spannung abzulesen gestatten und dabei doch so robust gebaut sind, daß sie ohne weiteres transportiert werdenkönnen. Unter Benutzung der von den Drehspulinstrumenten her bekannten Anordnung, die Gegenkraft durch eine oder zwei Spiralfedern zu erzeugen, ist es Szilard[1]) gelungen, ein diesen Wünschen entsprechendes Elektrometer zu bauen.

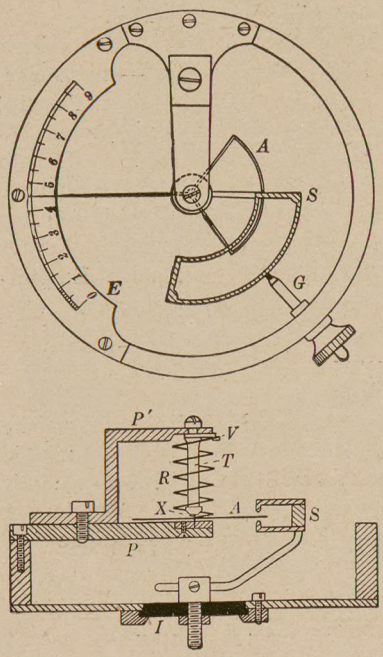


Fig. 61.

Bei seiner ersten Konstruktion besteht die eine Seite der Nadel *A* (Fig. 61)[2] aus einem Kreissektor, die andere aus einem nadelförmigen Teil, der zugleich zur Ablesung des Ausschlages an der Skala *E* dient. Die Nadel wird aus einem Metallband von 0,5 × 0,03 mm hergestellt und hat ein Gewicht von 9 mg. Sie ist an der zwischen zwei Rubinen gelagerten Achse *T* von 0,08 mm Durchmesser befestigt. Eine bestimmte Lage wird ihr durch die Spiralfeder *R* gegeben, die aus einem 0,01 mm dicken und 0,15 mm breiten Metallband besteht und 6 mg wiegt. Der Kreissektor der Nadel kann sich innerhalb der durch den Bernstein *J* isolierten Quadranten *S* bewegen, die durch die Sonde *G* geladen werden. Um die radial wirkenden Zugkräfte auf die Achse aufzuheben, bestehen die Quadranten aus zwei Paar konzentrischer Kreissektoren. Das Ganze ist von einem Metallgehäuse umgeben.

Der Meßbereich erstreckt sich im allgemeinen von 250 bis 1000 V, so daß etwa 1 Skt. 5 V entsprechen. Bei Verwendung mikroskopischer Ablesung wären noch 0,05 V zu beobachten; man kann mit dem Objektiv nahe an die Nadel herangehen — und somit starke Vergrößerung anwenden —, da die Nadel ungeladen ist. Die Kapazität beträgt im Mittel 2 cm.

Bei der neuen Konstruktion (Fig. 62)[3] ist die Dämpfung verbessert

---

[1]) B. Szilard, C. R. **156**, 777, 1913; **157**, 761, 1913. Journ. de Phys. **4**, 222, 1914. Physik. ZS. **15**, 209, 1914.
[2]) Aus ZS. f. Instrkd. **24**, 164, 1914.
[3]) Aus ZS. f. Instrkd. **24**, 162, 1914.

und das Gehäuse kompendiöser gestaltet; allerdings ist dadurch die Kapazität auf 6 cm gestiegen. Das Gehäuse bildet jetzt eine flache Dose von

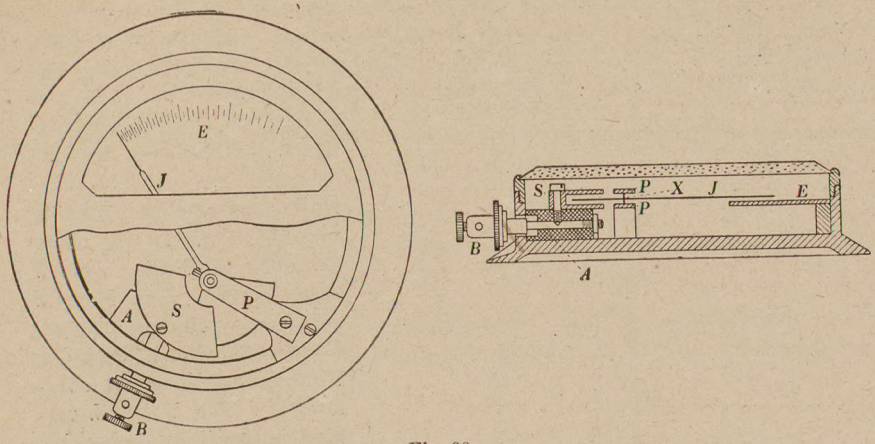
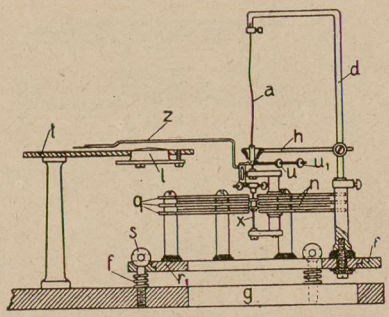


Fig. 62.

10 cm Durchmesser und 2,5 cm Höhe. Der Quadrant *S*, welcher von dem gegen Berührung, Staub, Feuchtigkeit und Licht geschützten Isolator *A* getragen wird, besteht aus zwei Sektoren aus Magnetstahl. Die 55 mm lange Nadel ist ähnlich wie früher gebaut; infolge ihrer Lage im magnetischen Felde von *S* sind ihre Bewegungen gut gedämpft[1]). Die Quadranten werden über die Klemme *B* geladen, während Nadel und Gehäuse geerdet werden. Der Meßbereich der in 90° geteilten Skala erstreckt sich im allgemeinen von 100 bis 200 V, so daß die Empfindlichkeit etwa 1 V/Skt. ist; die Ablesegenauigkeit beträgt 2%. Durch Verwendung stärkerer Spiralfedern läßt sich natürlich der Meßbereich unter Herabsetzung der Empfindlichkeit vergrößern.



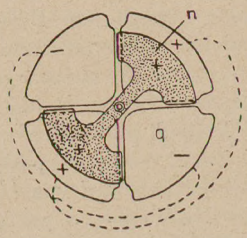


Fig. 63.

Im gewissen Sinne hiermit verwandt ist das Zeiger-Quadrantelektrometer von Hartmann & Braun[2]), welches eine in Spitzen gelagerte

[1]) Szilard hat auch ein Elektrometer angegeben, bei welchem der bewegliche Teil aus einer isolierten Magnetnadel besteht (C. R. **149**, 912, 1909; Le Radium, **6**, 363, 1909; ZS. f. Instrkd. **30**, 261, 1910). Da als Gegenkraft der Erdmagnetismus benutzt wird, weist es all die von den gewöhnlichen Nadelgalvanometern her genügsam bekannten Mißstände auf.

[2]) P. Wüstney, Physik. ZS. **12**, 1251, 1911.

Doppelnadel verwendet und bei 50 V einen Ausschlag von 70° gibt. Auf der Grundplatte g (Fig. 63) kann ein Ring r mittels Schrauben s und Druckfedern f justiert werden. Die Quadrantenflächen q, die in 4 mm Abstand voneinander liegen, ruhen, durch Bernstein isoliert, auf dem in r drehbaren Ringe r_1. Die Doppelnadel n sitzt auf der zweifach gekröpften Achse x, die auch den Zeiger z und das Ausgleichgewicht u_1 trägt, und welche bewirkt, daß der senkrechte Auflagedruck des 0,9 g schweren Systems auf beide Auflagespitzen gleichmäßig verteilt wird. In das obere ausgebohrte Ende von x hängt ein von dem Bügel d getragenes 40 mm langes Kupferbändchen a, das in der Nullpunktstellung mit x verlötet ist. Der Halter h verhindert das Herausheben der Nadel aus dem Lager. Sichere Nullpunktseinstellung wird dadurch erzielt, daß man der Nadel ein kleines Untergewicht erteilt, was durch geringe Verstellung des Ringes r zur Grundplatte erreicht wird.

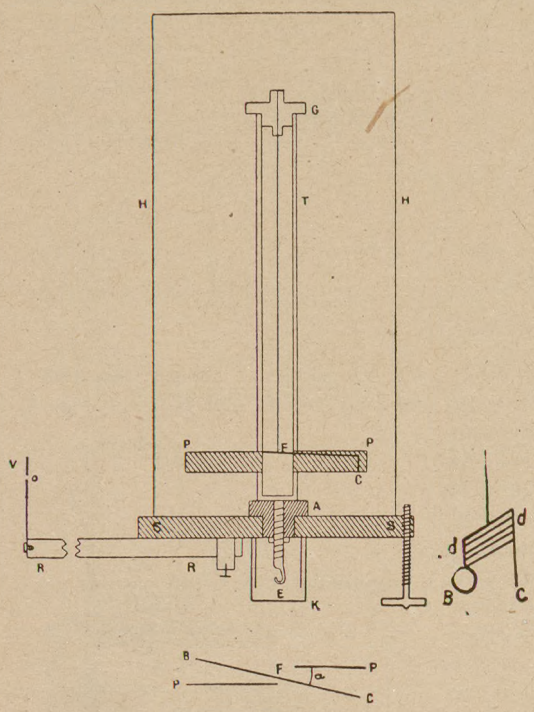


Fig. 64.

Das Prinzip der älteren Blättchenelektrometer — Abstoßung zweier gleichnamig geladener Körper — ist von Crémieu[1]) auf das Torsionselektrometer übertragen. Auf der Grundplatte S (Fig. 64) ruht, isoliert durch den Bernstein A, das Rohr T, welches seitlich zwei gegeneinander etwas versetzte Platten P trägt. Von dem Torsionskopf G hängt an einem 25 cm langen Metallbändchen von 0,01 × 0,1 mm in der Höhe der Platten P die aus Aluminiumdraht gebogene Nadel BC. Ihr eines Ende B ist als Kreis, ihr anderes C als senkrecht stehender Zeiger geformt. Zur Erreichung aperiodischer Luftdämpfung sind zwischen B und C vier Silberdrähte d d von $^1/_{50}$ mm Durchmesser ausgespannt. Die Ablesung der Nadelstellung erfolgt mit Hilfe zweier Lochvisiere v, die von einer an der Grundplatte befestigten Schiene R getragen werden. Nach außen ist das Elektrometer durch die Metallhülle H abgeschirmt. Die Ladung erfolgt von unten durch den Draht E, welcher durch die Kappe K

[1]) V. Crémieu, C. R. **156**, 460, 1913.

geschützt werden kann. Ein Vorteil der Crémieuschen Anordnung ist, daß bei Überspannung weder Kurzschluß, noch Bruchgefahr für die Nadel besteht.

Die Empfindlichkeit hängt außer von dem Aufhängefaden auch von der Anfangstorsion w ab, welche der Faden in Bezug auf die Platten P hat. Über die Empfindlichkeiten und die Kapazität gibt die Tabelle XIII Aufschluß.

Tabelle XIII.

Ausschlag	w	Potent.	Volt/Grad	Kapazität
20	0	114	6	10
60	0	535	22,2	29
20	360	471	12	20
20	720	738	18	30
20	1080	972	24	40

Da die Kapazität sehr veränderlich ist, muß das Instrument zur Messung von Stromstärken durch Vergleich mit einer konstanten Ionisierungsquelle (z. B. Uranoxyd) geeicht werden.

In eigenartiger Weise hat La Rosa[1]) auch das Blättchenelektrometer unter Benutzung der Torsion als Gegenkraft zu einem empfindlichen Instrument umgebaut, das ähnlich wie das Wilsonsche Kippelektrometer (s. S. 23) eine große Änderung der Empfindlichkeit und des Meßbereiches gestattet. Er bringt dazu auf zwei Ebonitsäulen R (Fig. 65) von 6 cm Höhe und 0,4 cm Durchmesser, die noch zwei Bernsteinstücke von 1,5 cm Höhe und 0,2 cm Durchmesser tragen, zwei Aluminiumblättchen K von (zusammen) 7 cm Länge, 0,1 mm Dicke und 0,15 cm Höhe an, welche in der Mitte durch einen feinen Platindraht p verbunden sind. Parallel zu ihnen ist in geringem Abstand ein leichtes Aluminiumblättchen H an einem durch Kathodenzerstäubung leitend gemachten Quarzfaden aufgehängt. Dieser setzt sich nach unten hin in einen stärkeren Quarzfaden von 0,5 mm Dicke und 12 bis 13 cm Länge fort, welcher durch ein Loch in der Grundplatte hindurchgeht und am Ende einen kleinen Spiegel trägt, dessen Ablenkung durch ein Fenster in einer an dieser befestigten Büchse beobachtet wird. Die Grundplatte wird ferner von einer durch einen Ebonitknopf drehbaren Ladesonde durchsetzt. Sie trägt außerdem zwei Messingsäulen M von 28 cm Länge, welche mit den beiden Ebonitsäulen in den Ecken eines Quadrates stehen, dessen

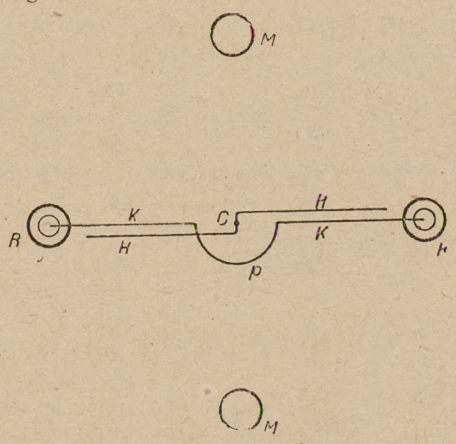


Fig. 65.

[1]) M. La Rosa, N. Cim (1) 5, 50, 1913.

Diagonale nur um 2 mm größer ist als die Länge des beweglichen Blättchens, so daß sie bei größeren Ablenkungen anziehend auf dieses wirken und damit die mit wachsendem Ausschlag kleiner werdende Abstoßung von K sogar überkompensieren. Von dem Torsionskopf geht noch ein mit der Aufhängung verbundener dünner Platindraht zu den festen Blättchen und vermittelt damit die Ladung von H. Der ganze Apparat ist natürlich wieder in ein Metallgehäuse eingeschlossen, das auch evakuiert werden kann. Je nach der Anfangstorsion des Aufhängefadens läßt sich der Meßbereich und auch die Empfindlichkeit innerhalb weiter Grenzen variieren. Bei einer gewissen Lage wird das Blättchen infolge der Influenz der beiden Messingsäulen instabil und hat dann unter Umständen zwei Gleichgewichtslagen.

Über sein Verhalten gibt am besten Tabelle XIVa Aufschluß, welche für die Anfangstorsion $\Theta_0 = 0°$ gilt:

Tabelle XIVa.

V	Θ	$d\Theta/dV$	V	Θ	$d\Theta/dV$	V	Θ	$d\Theta/dV$	V	Θ	$d\Theta/dV$
0	0°0′		48	9°18′		108	29°37′		176	55°8	
		6′			19′			21′			29′
8	0°23′		52	10°33′		116	32°27′		180	57°4′	
		7′			20′			21′			30′
12	0°50′		56	11°50′		124	35°16′		184	59°4′	
		9′			20′			21′			35′
16	1°27′		60	13°9′		132	38°5′		186	60°15′	
		10′			20′			21′			44′
20	2°8′		64	14°28′		140	40°55′		188	61°43′	
		11′			20′			21′			46′
24	2°53′		68	15°48′		148	43°47′		190	63°15′	
		13′			20′			23′			49′
28	3°47′		76	18°31′		156	46°50′		192	64°53	
		14′			20′			23′			52′
32	4°45′		84	21°15′		160	48°25′		194	66°37′	
		15′			21′			24′			
36	5°47		92	24°1′		164	50°1′		195	ca. 89°	
		17′			21′			24′			
40	6°55′		100	26°48′		168	51°39′				
		20′			21′			25′			
44	8°5′					172	53°21′				
		18′						27′			

Aus dieser Tabelle ersieht man, daß die Empfindlichkeit zunächst langsam wächst, dann eine Zeit konstant bleibt und darauf unter dem zunehmenden Einfluß der Anziehung der Messingsäulen wieder wächst, um bei einem Ausschlag von etwa 65° instabil zu werden. Gibt man dem Blättchen eine anfängliche Torsion derart, daß es sich mehr an K anlegt, so ist die Empfindlichkeit zu Anfang viel größer, nimmt darauf aber ab, um späterhin wieder bis zur Instabilität zu wachsen. Der kritische Ausschlag,

bei dem dies eintritt, hängt von der Anfangstorsion ab. Tordiert man dagegen das Blättchen im entgegengesetzten Sinne, so nähert sich der kritische Ausschlag immer mehr dem Wert 90° (s. Tab. XIVb, welche für eine Torsion von $\Theta_0 = 70°$ gilt), die Empfindlichkeit ist dann zu Anfang viel kleiner und wächst darauf bis zu einem Maximum an, um schließlich wieder abzufallen. Man sieht also, wie man die Empfindlichkeit durch geeignete Anfangstorsion beliebig variieren und auch ihre größten Werte an beliebige Stellen der Skala verlegen kann. — Die Kapazität ist für einen bestimmten Ausschlag zu 0,8 cm berechnet.

Tabelle XIVb ($\Theta_0 = 70°$).

V	Θ	$d\Theta/dV$	V	Θ	$d\Theta/dV$
0	0°0′		68	8°14′	
		1′			19′
16	0°23′		76	10°50′	
		5′			25′
28	1°25′		84	14°31′	
		5′			18′
36	2°8′		92	16°58′	
		6′			11′
44	2°58′		100	18°24′	
		10′			4′
52	4°23′		108	18°54′	
		14′			3′
60	6°14′		116	19°20′	
		15′			

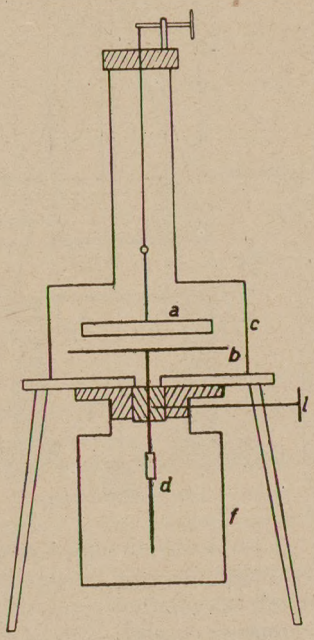


Fig. 66.

Konstruktiv steht diesem Instrument das von Folmer[1]) speziell für radioaktive Messungen angegebene nahe. Es sucht die Empfindlichkeit des Wilsonschen Kippelektrometers (s. S. 23) zu erreichen, wobei aber Ionisierungskammer und Meßraum voneinander getrennt sein sollen. Es besteht aus einer festen Nadel *b* (Fig. 66), die sich nach unten in die innere Elektrode *d* der Ionisierungskammer *f* fortsetzt, und die durch Bernstein isoliert ist, sowie dem ihr in geringem Abstand gegenüberstehenden sehr dünnen Aluminiumstreifen *a*, der an einem Wollastondraht hängt. Die Ladung von *b* erfolgt durch den Ladestab *l*, die von *a* durch den Aufhängefaden. An *a*, das in seiner Ruhelage einen bestimmten Winkel mit *b* bildet, wird ein geeignetes Potential gelegt und dann *a* durch Ladung des Gehäuses *c* in seine Ruhelage zurückgeführt. Bringt man nun in die Ionisierungskammer, deren Gehäuse auf ein solches Potential geladen ist, daß Sättigung erreicht wird, eine radioaktive Substanz, so wird *b* infolge der Ionisierung aufgeladen;

[1]) H. J. Folmer, Hand. XVI med. nat. en. gen. congres, Amsterdam, 171, 1913. Proc. Amsterdam **17**, 659, 1914.

der dementsprechende Ausschlag von *a* (bezw. seine Wanderungsgeschwindigkeit) wird beobachtet. Größere Empfindlichkeiten erhält man bei höherer Ladung von *a*; dies muß auch schon aus dem Grunde geschehen, damit nicht *a* seine Bewegung bei der Aufladung von *b* umkehrt. Die Kapazität beträgt etwa 6 cm.

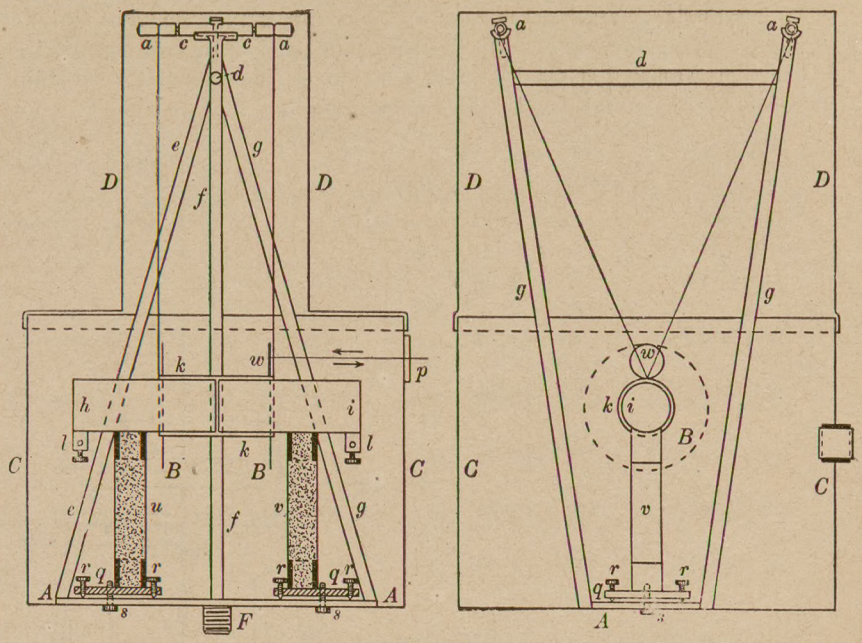


Fig. 67.

Im Anschluß hieran seien einige Elektrometerausführungen mit interferentieller Messung beschrieben[1]), bei welchen die Verschiebung des Spiegels durch entsprechende mikrometrische Einstellung des Interferometerspiegels kompensiert wird. Sie ist zunächst angewandt bei einem Zylinderelektrometer. Bei diesem werden zwei feste Zylinder *h* und *i* (Fig. 67)[2]), die durch zwei Ebonitsäulen *u* und *v* isoliert sind, mittels der Platten *q*, *q* und der Schrauben *r* und *s* zur Messinggrundplatte *A* justiert. Der bewegliche Zylinder *k*, *k* ist mit zwei dünnen Kupferdrähten von 0,7 mm Durchmesser bifilar an den Messingrollen *a*, *a* aufgehängt, welche mittels der Ebonitstangen *c* von dem Gestell aus den Messingröhren *e*, *f*, *g* getragen werden, das durch die Stange *d* versteift ist. Durch Drehen von *a*, *a* wird er zu den festen Zylindern zentriert. Den elektrostatischen Schutz bewirkt das leichte Stanniolgehäuse *CC*, *DD*. Der bewegliche Zylinder *k*, *k* besteht aus dünnem Aluminiumrohr oder besser Goldpapier und trägt zur guten Dämpfung an seinen Enden zwei Glimmer- oder Papierringe *BB*, an deren

[1]) C. Barus, Amer. Journ. of Science **37**, 65, 1914.
[2]) Aus Zs. f. Instrkd. **34**, 314, 316, 1914.

einem der leichte Spiegel w befestigt ist, dessen Verschiebung mittels der durch das Fenster p einfallenden Strahlen interferentiell beobachtet wird. Die erreichte Höchstempfindlichkeit betrug 0,04 V für jeden verschwindenden Interferenzring. Das leichter herzustellende Scheibenelektrometer besteht aus der bifilar aufgehängten Scheibe V_1 (Fig. 68)[1] aus versilbertem Glimmer mit dem sie umgebenden Schutzring V'_1 aus dünnem Kupferblech. Sie hängt symmetrisch zwischen den beiden festen parallelen Kondensatorplatten V_2 und V_3, wobei V_2 mit dem Gehäuse geerdet und V_3 von ihm durch die Ebonitsäule c isoliert ist. Der Interferenzspiegel ist an der V_1 tragenden Achse d mit dem Kork n befestigt. Die Verschiebung ist wie bei dem Zylinderelektrometer proportional V_3. Die größte Empfindlichkeit betrug 0,014 V für jeden verschwindenden Interferenzring.

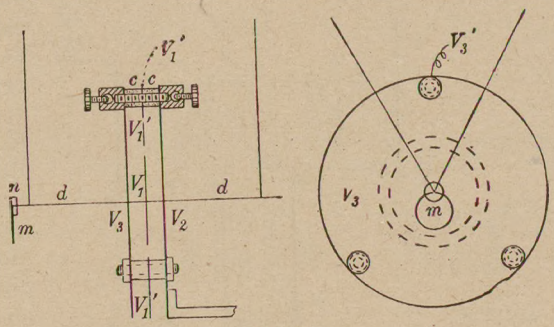


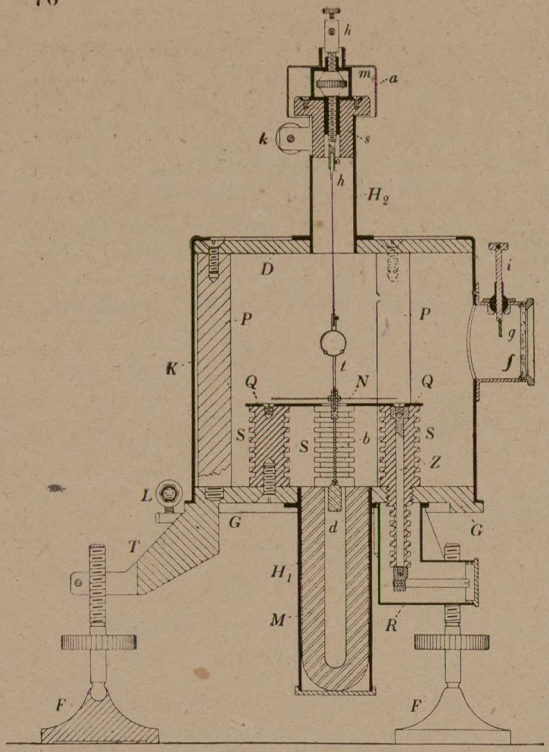
Fig. 68.

Um diese Ablesungsmethode am Quadrantelektrometer zu verwenden, wird an dem Haltedraht des Dämpferflügels parallel zur Nadelachse ein Ebonitzylinder befestigt und auf diesem zwei vertikale Spiegel angebracht, welche mit ihm Winkel von 45° bilden. Erreicht wurde eine Empfindlichkeit von $6 \cdot 10^{-5}$ V/Interferenzring.

Alle Torsionselektrometer mit Spiegelablesung lassen sich selbstverständlich ohne weiteres für photographische Registrierung verwenden. So wurde eine derartige kompendiöse Einrichtung des oben beschriebenen Elster- und Geitelschen Quadrantelektrometers[2]) von diesen Forschern zur Beobachtung des Potentialgefälles bei der Sonnenfinsternis am 30. August 1905 in Palma auf Mallorca benutzt. Ein sehr geeignetes Quadrantelektrometer kleiner Kapazität zur Registrierung der Ionisierung und der Leitfähigkeit der Luft ist von Ebert[3]) bei seinen Untersuchungen benutzt worden. Dieses Instrument zeichnet sich durch gute Isolation, Dämpfung und Stabilität aus. Eine Grundplatte G aus Messingguß (Fig. 69)[4]) ruht auf drei weit ausladenden Trägern T mit Fußschrauben F, über welche nach der Aufstellung ein schwerer Bleiring gelegt wird. Um die Kapazität klein zu halten, bestehen die Quadranten nur aus dicken ebenen, an den Rändern abgerundeten Messingscheiben Q; die diagonal gegenüberliegenden Quadranten sind durch starre Drähte verbunden. Die äußeren Zuführungen erfolgen durch Bohrungen in zwei der vier Isolatoren S aus genutetem

---

[1]) Aus ZS. f. Instrkd. **34**, 314, 316, 1914.
[2]) J. Elster und H. Geitel, Physik. ZS. **7**, 493, 1906.
[3]) H. Ebert, ZS. f. Instrkd. **29**, 169, 1909.
[4]) Aus ZS. f. Instrkd. **29**, 170, 1909.



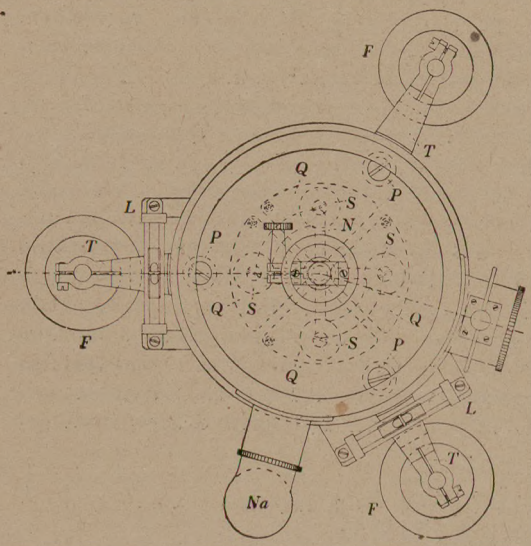


Fig. 69.

Ebonit (oder besser Bernstein); außerhalb verlaufen sie in den Schutzrohren *R*, welche an der Grundplatte *G* befestigt sind und durch Natrium getrocknet werden können. Durch auf *R* aufzusetzende Kappen lassen sich die Zuführungen und damit die Quadranten erden. Drei Säulen *P* tragen den Messinggußdeckel mit der Hülse H_2 und in dieser den durch die Schraube *k* festzuklemmenden Ebonitstopfen *s*. Durch *s* geht eine Schraube hindurch, welche oben eine Anschlußklemme *h* trägt und die durch die Mutter *m* (und eine Nutenführung) gehoben und gesenkt werden kann. Nach der Justierung wird der Isolator *s* durch die Kappe *a* gegen Staub geschützt. Die aus dünnem Aluminiumblech bestehende Nadel ist an dem Aluminiumdraht *t* befestigt. Die eigentliche Aufhängung wird durch einen beiderseits angelöteten Platindraht (bis zu 2,5 μ Durchmesser herab) gebildet[1]). Der an *t* befestigte Spiegel läßt sich durch eine kleine Schraube etwas um eine horizontale Achse neigen. Unterhalb der Nadel hängt der durch den Bernstein *b* von ihr isolierte Hohlzylinder *d* aus Elektrolytkupfer, der durch seine

[1]) Bei Aufhängung an Häkchen ergibt sich keine sichere Ruhelage.

Drehung in dem Felde des in der Hülse H_1 stecken den Hufeisenmagneten M die Dämpfung bewirkt; H_1 wird durch Bajonettverschluß an der Grundplatte befestigt. Nach außen wird das Elektrometer durch den Mantel K abgeschirmt, der mit zwei Rändern über den Deckel und in eine Ausdrehung der Grundplatte eingreift; er enthält eine Natriumkammer und gegenüber dem Spiegel einen Rohransatz mit dem Spiegelglasfenster f. Die Registrierung der Nullinie erfolgt mit Hilfe des Basisspiegels g, der von dem mittels

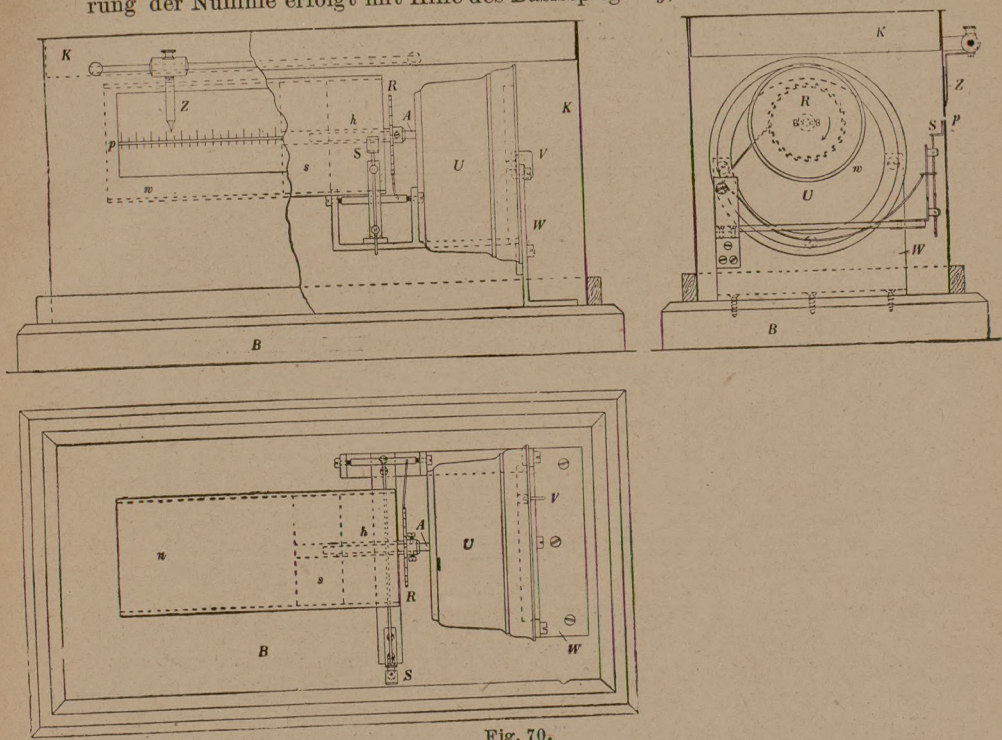


Fig. 70.

Kugelgelenkes beweglichen und in der Höhe verstellbaren Stift i getragen wird. Zum Schutz gegen Temperatur schwankungen wird das Elektrometer durch einen mit Watte ausgefütterten Weißblechzylinder bedeckt, der zugleich die Projektions linse von 6 cm Durchmesser und 172 cm Brennweite enthält. Es entspricht dann eine Drehung von 1′ einer Ablenkung von 1 mm in der Brennebene. Als Lichtquelle dient eine im Brennpunkt aufgestellte kleine Glühlampe.

Die Registriervorrichtung besteht im wesentlichen aus einer amerikanischen Weckeruhr U (Fig. 70)[1]), die mit dem Winkel W an die kräftige Eichenplatte B angeschraubt ist. Auf die sich in 24 Stunden einmal umdrehende verlängerte Achse A wird eine federnde Messinghülse mit

[1]) Aus ZS. f. Instkrd. **29**, 175, 1909.

einer Holzscheibe und einer Pappwalze von 18 cm Länge und 24 cm Umfang gesteckt. Das photographische Papier wird darauf mit zwei Messingklammern festgehalten. Das mit 24 Zähnen versehene Steigrad *R* erteilt dem Schieber *S* mittels einer Hebelübersetzung einen stündlichen Hub von 3 mm. Bei jeder vollen Stunde gleitet der Hubhebel von dem betreffenden Zahn ab, worauf der Schieber *S* wieder herabfällt und so die Zeitmarken gibt. Diese Registriereinrichtung wird von dem innen geschwärzten Bleehkasten *K* überdeckt, der auf der Vorderseite in Höhe der Trommelachse einen 18 cm langen Spalt trägt. Vor dem Spalt befindet sich

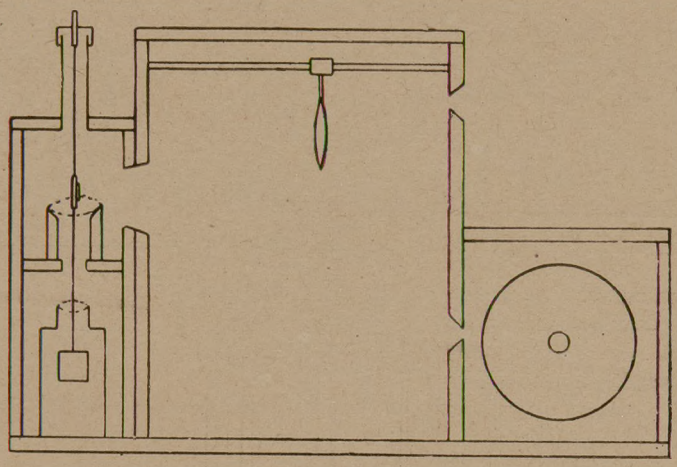


Fig. 71.

eine Skala und der festklemmbare Zeiger *Z* zur direkten Beobachtung[1]).

Die Empfindlichkeit hängt von der Nadelladung, dem Fadendurchmesser und dem Abstand der Nadel von den Quadranten ab und läßt sich bis auf 0,003 V/mm (auf der Registrierwalze gemessen) steigern. Die Kapazität beträgt bei mittlerer Empfindlichkeit 18 cm, die Schwingungsdauer 24 bis 32 s, das Dämpfungsverhältnis ist gleich 4.

Speziell zur Registrierung schnellverlaufender Schwankungen des Potentialgefälles, wie sie durch Aufwirbelung von Staub durch den Wind oder beim Ausströmen von Dampf (etwa aus vorüberfahrenden Lokomotiven) auftreten, hat Rudge[2]) ein Registrier-Quadrantelektrometer angegeben. Die Quadranten bestehen aus vier Messingstücken, die aus einem Rohr von 3 cm Durchmesser geschnitten und auf Ebonit montiert sind (Fig. 71). Das schwingende System, eine Nadel aus Silberpapier an einem Phosphorbronzedraht, wird durch Öl gedämpft. Eigenartig ist die wegen seines beschränkten Zweckes mögliche Registrierung mittels Tages-

[1]) In die Randpartien des Strahlenbündels ragen noch die Spiegel eines Thermo- und eines Barographen hinein, um Temperatur und Barometerstand auf demselben Registrierstreifen aufzuzeichnen.

[2]) W. A. Douglas Rudge, Cambr. Proc. **19**, 115, 1915.

licht, das durch die Linse auf den Elektrometerspiegel konzentriert wird und von hier auf die durch ein billiges Uhrwerk getriebene Walze fällt. Alles zusammen steht in einem lichtdichten Kasten von 20 × 17 × 14 cm.

In eigenartiger Weise hat Walker[1]) das Dolezalek-Elektrometer für

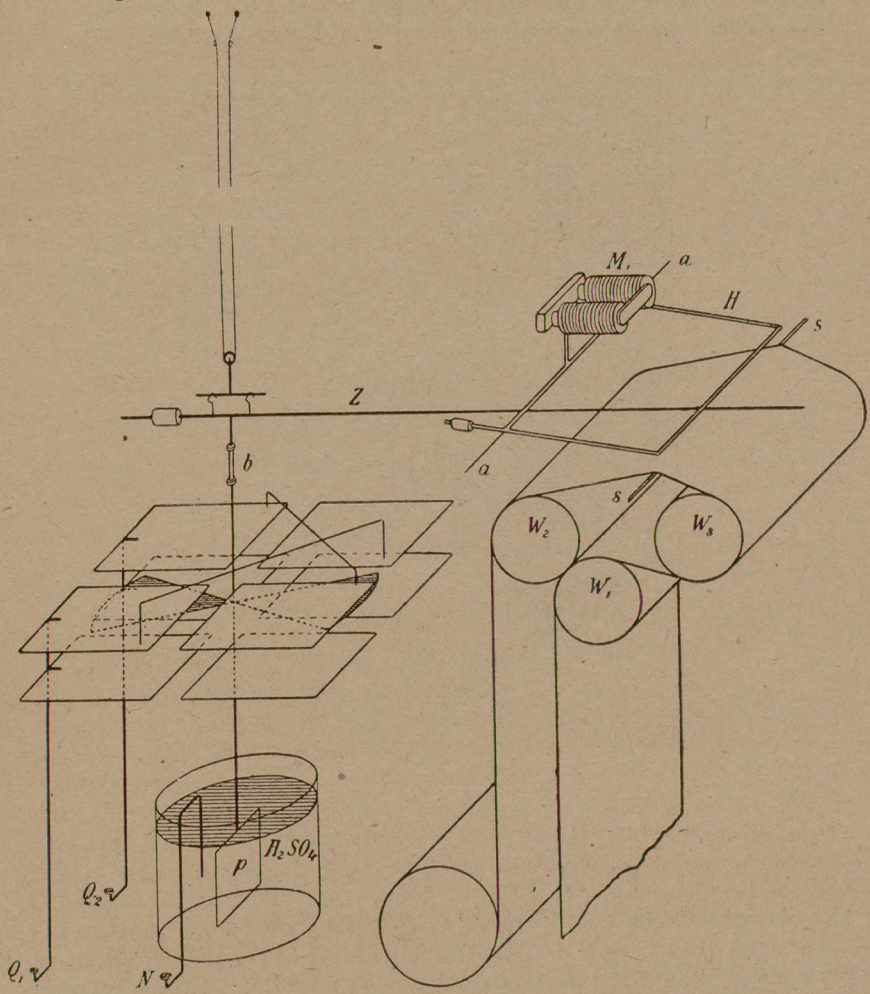


Fig. 72.

Registrierungen umgeändert. Zunächst wurde die Empfindlichkeit durch Verwendung stärkerer Fäden so weit herabgesetzt, daß sich der Meßbereich bei Nadelschaltung bis ±1100 V erstreckte. Die Hilfsladung an den Quadranten wird durch ein Kontaktpotential geliefert; zu dem Zweck sind

[1]) G. W. Walker, Proc. Roy. Soc. **84**, 585, 1910.

diese aus Kupfer- und Zinkblech zusammengelötet; sorgfältige Isolierung ist bei dieser Umänderung nur an der Nadelaufhängung nötig.

Weitaus am häufigsten wird zu luftelektrischen Messungen das mechanisch registrierende Quadrantelektrometer von Benndorf[1]) (Fig. 72 u. 73) benutzt. Bei diesem sind die viereckigen Grund- und Deckplatten durch vier Säulen miteinander verbunden, in deren Nuten die Seitenplatten ein-

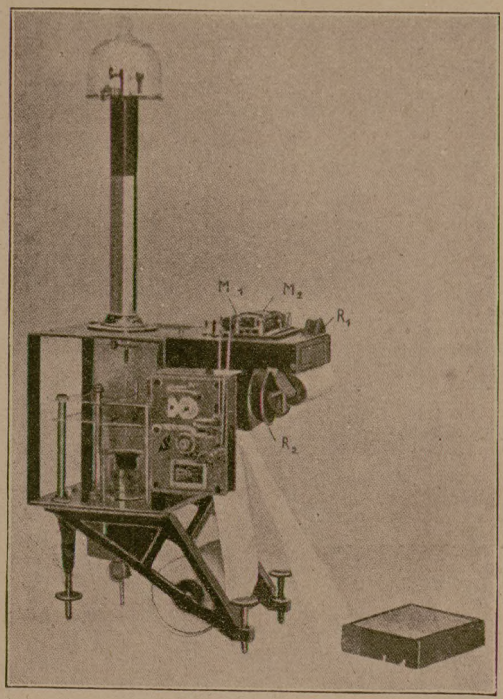


Fig. 73.

geschoben werden. Die Grundplatte trägt die Isolatoren mit den Quadranten, welche aus vier Paaren quadratischer Bleche bestehen; die Deckplatte hält das Schutzrohr mit dem Torsionskopf. Die aus 0,2 mm Aluminiumblech bestehende Nadel ist bifilar an Platindraht von 0,05 mm Durchmesser aufgehängt, der über zwei im Torsionskopf befindliche Schneiden geht, deren gegenseitige Entfernung durch eine Schraube von 0,1 bis 10 mm geändert werden kann.[2]) Die Drahtenden sind an zwei Säulchen mit Walzen befestigt; zum Heben und Senken der Nadel genügt es, eine der Walzen zu drehen. Der untere Abstand der Drähte beträgt 3 mm. Die Nadel ist von der Auf-

[1]) H. Benndorf, Wien. Ber. **111**, 487, 1902; Physik. ZS. **7**, 98, 1906.

[2]) Das Instrument gehört streng genommen nicht zu den Torsionselektrometern. Selbstverständlich könnte die Nadel aber auch an einem einzelnen Draht aufgehängt werden. Die bifilare Aufhängung ist gewählt, damit der Nullpunkt nicht durch Temperaturänderungen verschoben wird.

hängung durch den Bernstein *b* isoliert und setzt sich nach unten in einen 0,2 mm dicken Platindraht fort, der mit einem Platinblech in ein Gefäß mit Schwefelsäure taucht; dieses dient zur Zuführung der Ladung zur Nadel und gleichzeitig zur Dämpfung.

Starr mit der Nadel ist oberhalb des Isolators *b* der 20 cm lange Aluminiumzeiger *Z* verbunden, der sich in einem balkonartigen Ausbau des Gehäuses über einem 12 cm langen Papierstreifen bewegt, welcher durch ein Uhrwerk um 4 cm/h fortbewegt wird. Da wegen des geringen Drehmomentes eine kontinuierliche Aufzeichnung der Zeigerstellung (auch durch Schreiben in Ruß) nicht möglich ist, wird sie durch zeitweiliges Niederdrücken markiert. Dies erfolgt dadurch, daß durch ein Uhrwerk etwa alle Minuten der Stromkreis des Elektromagneten M_1 geschlossen wird, welcher dann den Bügel *H* anzieht, der sich auf den Zeiger auflegt. Nun gleitet das Papier über die genau unter *H* befindliche Stricknadel *S*; zwischen dieser und dem Papier befindet sich noch ein Streifen Blaupapier, welcher durch das Uhrwerk kontinuierlich von der Rolle R_1 auf die Rolle R_2 aufgewickelt wird. So entsteht bei jedem Niederdrücken auf dem Papier ein blauer Punkt[1]). Mit dem Uhrwerk ist ferner noch ein Stundenkontakt verbunden, welcher den Stromkreis des Elektromagneten M_2 betätigt; dieser drückt links und rechts 1 cm vom Rand zwei Schneiden herunter und gibt so die Zeitmarken. Schließlich wird durch das Uhrwerk noch die Nadel zweimal in 24 Stunden geerdet und liefert so täglich zwei Punkte für die Nullinie.

Da der Ausschlag nicht streng proportional dem Nadelpotential ist, muß das Instrument geeicht werden. Den Meßbereich wird man im allgemeinen zu 500 V wählen. Die Kapazität beträgt 20 bis 30 cm, die ungedämpfte Schwingungsdauer 5 bis 10 s, das Dämpfungsverhältnis ist gleich 5

Da größere Potentiale nicht mehr registriert werden würden, hat Sprung[2]) an dem Benndorf-Elektrometer eine einfache automatische Umschaltevorrichtung angebracht. Bei dieser wird der Bügel *H*, wenn er sich am Rand befindet, nicht auf das Papier, sondern auf ein Metallstück herabgedrückt. Dadurch wird ein Stromkreis geschlossen, welcher einen Quecksilberschalter betätigt. Dieser schaltet dadurch einen Teil des an die Quadranten gelegten Hilfspotentials ab und verringert so die Empfindlichkeit.

Um nicht unnötig dauernd mit dieser geringeren Empfindlichkeit zu arbeiten, hat Rempp[3]) die Einrichtung getroffen, daß durch den Stundenkontakt der Schalter wieder zurückgelegt wird. Während der verringerten Empfindlichkeit wird noch automatisch ein Elektromagnet mit eingeschaltet, der gleichfalls alle Minuten seine gegen die eigentlichen

---

[1]) Um von etwaigen, nie ganz zu vermeidenden Unregelmäßigkeiten des Minutenkontaktes unabhängig zu werden (wodurch der Schlagbügel vor oder nach dem Kontakt in Zuckungen versetzt werden würde), läßt man diesen nicht direkt auf den Elektromagneten, sondern auf ein Beruhigungsrelais wirken, wofür eine geeignete Konstruktion von G. Rempp (Ber. d. Meteorol. Geophysik. Inst. Frankfurt a. M. Nr. 2, 1916) angegeben ist.

[2]) A. Sprung, Physik. ZS. 5, 326, 1904.

[3]) S. Anm. 1).

Kontaktpunkte versetzten Punktmarken gibt. Schließlich kann man auch noch das Elektrometer dadurch automatisch eichen, daß ein hochisoliertes Relais zu bestimmten Zeiten für die Dauer von 6 min die Nadel von der Sonde ab- und das erste und dritte Mal an Erde, das zweite Mal an die positive, das vierte Mal an die negative Quadrantspannung legt.

Von Patterson[1]) ist das Benndorf-Elektrometer etwas umgestaltet worden; die wesentlichste Änderung ist die, daß sämtliche Bewegungen direkt durch das Uhrwerk ohne Zwischenübertragung durch die Elektro-

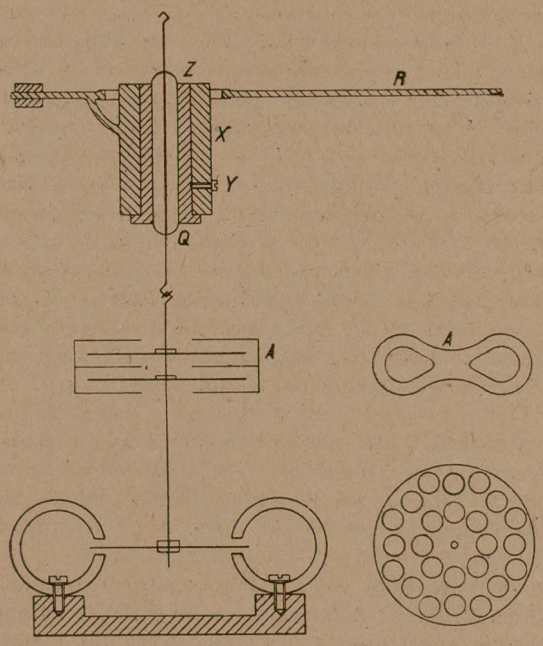


Fig. 74.

magnete erfolgen, wodurch eine vielfach auftretende Störungsquelle (Versagen der Batterie oder der Kontakte) in Fortfall kommt. Um größere Empfindlichkeit zu erzielen, ist eine Doppelnadel *A* (Fig. 74) gewählt. Jeder Teil besteht aus 0,085 mm dickem Aluminiumblech und wiegt 0,61 g; um genügende Steifigkeit zu erzielen, sind ihre Ecken etwas umgebördelt. Die Quadranten bestehen aus je drei übereinanderliegenden Platten mit $^1/_4''$ Abstand. Die Nadel ist an einem 0,002 mm dicken Phosphorbronzeband aufgehängt. Ihr mittlerer Teil ist von einem Quarzrohr *Q* und dann von einem kleinen Messingzylinder *Z* umgeben. Um diesen läßt sich durch die Führung *X* der $6^1/_2''$ lange Zeiger *R* drehen und so in jede beliebige Stellung zur Nadel bringen; er wird durch die Schraube *Y* festgehalten. Unten ist mit der Nadel eine durchlochte Scheibe starr verbunden, welche

[1]) J. Patterson, Phil. Mag. (6) **26**, 200, 1913.

sich in dem Felde zweier einzeln justierbarer Hufeisenmagnete dreht und so die Dämpfung bewirkt. Das Papier, welches durch ein Uhrwerk mit einer Geschwindigkeit von 14 oder 168 mm/h bewegt wird, geht kontinuierlich über mehrere Rollen und wird durch ein Gewicht an der letzten gespannt gehalten. Ein zweites Uhrwerk drückt den Zeiger mit Hilfe eines Daumenrades und eines Bügels alle 2 min nieder und erzeugt so entweder durch ein unter den Zeiger gelegtes Farbband kleine Striche oder durch einen kontinuierlich vorwärts bewegten Schreibfaden Punkte. Alle 6 min vor jeder vollen Stunde wird durch das Uhrwerk ein Rad unter den Bügel gebracht, welches um 4′ und 2′ vor voll und zur vollen Stunde die Zeitmarken am Rande druckt. Zweimal am Tage wird das Elektrometer durch das Uhrwerk geerdet und so die Nullage markiert. Die Empfindlichkeit beträgt bei einer Quadrantenladung von ±4 V 17,6 V/mm, bei einer solchen von ± 8 V 8,9 V/mm und bei ± 20 V 3,65 V/mm. Bei Quadrantenschaltung und einem Nadelpotential von 198,4 V war die Empfindlichkeit 0,66 V/mm. Die Empfindlichkeit bleibt über den Meßbereich bis auf 5% konstant. Die Kapazität ist gleich 100 cm.

Bei den Quadrantelektrometern geschieht fast allgemein die Aufladung der Nadel entweder durch eine leitende Aufhängung oder von unten durch einen in Schwefelsäure getauchten Dämpferflügel. Letztere Methode hat aber, wie schon früher erwähnt, manche Unzuträglichkeiten im Gefolge. Bei Verwendung von Metallbändern zur Aufhängung kann man die Empfindlichkeit nicht über eine gewisse Grenze steigern, bei metallisierten Quarzfäden macht die gute Verbindung des dünnen Metallbelages mit den übrigen Metallteilen Schwierigkeiten. Man hat deshalb, wie z. B. bei der Wienschen Abänderung des Dolezalek-Elektrometers, die Nadel an einem unmetallisierten Quarzfaden aufgehangen und die Nadel nur zu Beginn des Versuches durch einen Platinkontakt von unten geladen. Trotz der vorzüglichen Isolation des Quarzes nimmt dann aber die Ladung allmählich ab. Man kann nun nach Erikson[1]) eine isoliert aufgehangene Nadel dadurch dauernd auf demselben Potential halten, daß man den Metalldraht, an welchem der Spiegel befestigt ist, durch eine kleine Ionisierungskammer führt, in welcher die Luft durch ein (keine Emanation abgebendes) Poloniumpräparat ionisiert wird. Legt man nun das gewünschte Potential an die isolierte Ionisierungskammer, so ladet sich der Draht infolge der Ionisierung der Luft auf dieses Potential auf. Die Quadranten müssen dabei durch eine geerdete, geeignet angeordnete Platte gegen die Einwirkung der Ionisierungskammer geschützt werden.

Für Wechselstrommessungen hat man das Quadrantelektrometer zu einem Vibrationsinstrument ausgebaut[2]), das als Nullinstrument in der Brückenschaltung (wie das Wulfsche Elektrometer) zur Messung von Kapazitäten eine mindestens zehnmal größere Genauigkeit gibt als das Vibrationsgalvanometer. Die Quadranten bestehen aus vier vertikal stehenden Metallplatten, zwischen denen ein leichter Aluminiumflügel bifilar aufgehängt ist.

---

[1]) H. A. Erikson, Phys. Rev. (2) **1**, 253. 1912.
[2]) H. L. Curtis, Bull. Bur. Standards, **11**, 535, 1915.

An diesen wird eine konstante Spannung, an die zu je zwei diagonal verbundenen Quadranten die Wechselspannung gelegt. Um den Resonanzfall (also möglichst große Amplitude) für verschiedene Frequenzen einstellen zu können, ändert man die Eigenschwingungszahl des Flügels durch Änderung der Länge, des Abstandes und der Spannung der Aufhängefäden und eventuell die Dämpfung durch Evakuieren des Elektrometers. Bei Platten von 1 cm Länge und 2 cm Breite und 2 mm Plattenabstand besteht über den ganzen Meßbereich Linearität. Wegen der Trägheit des Flügels ist die Anwendung des Elektrometers auf Periodenzahlen unter 100 beschränkt. Der schwächste nachzuweisende Strom beträgt 10^{-11} A[1]).

d) Zusammenstellung der Angaben über die verschiedenen Elektrometer. Nachdem im Vorhergehenden die verschiedenen Elektrometertypen beschrieben wurden, seien nachfolgend ihre größten Empfindlichkeiten sowie Meßbereiche und Kapazitäten nochmals übersichtlich zusammengestellt (Tabelle XV).

Bei den Elektrometern der ersten und zweiten Klasse betragen die größten Empfindlichkeiten etwa 3 Millivolt/Skt.; dabei hat die Kapazität den kleinen Wert von 2 cm. Bei den Torsionsinstrumenten ist die größte Empfindlichkeit etwa 300mal größer ($1{,}5 \cdot 10^{-5}$ V/mm), während die Kapazität im günstigsten Falle denselben Wert von 2 cm besitzt. Nun kann man aber im allgemeinen aus der Angabe der Spannungsempfindlichkeit und der Kapazität nicht auf die Ladungsempfindlichkeit schließen, da die Kapazität nicht unabhängig vom Ausschlag ist; man muß noch die bei der Nadelbewegung durch die influenzierende Wirkung der Quadranten gebundene Elektrizitätsmenge berücksichtigen. Bezeichnet man mit S die reziproke Spannungsempfindlichkeit (dv/ds), mit L die reziproke Ladungsempfindlichkeit (de/ds), beide in der Nähe der Ruhelage gemessen (dabei bedeutet s den Ausschlag, v und e Potentialdifferenz und Ladung der Quadranten) und mit C die Kapazität der Nadel, so gilt nicht die Beziehung $L = C \cdot S$, sondern nach Hofmann

$$L = C \cdot S + a \cdot v,$$

wo das letzte Glied die bei der Bewegung des Flügels auf dem System influierte Elektrizitätsmenge berücksichtigt; dabei ist der Kapazitätsfaktor a (die Kapazität der Winkeleinheit des Systems gegen die Dose) eine Instrumentenkonstante, welche mit den Abmessungen der Nadel, ihrer Nähe zu den Quadrantenflächen und der Feldstärke wächst. Das erste Glied kann zwar durch Vergrößern der Hilfsspannung beliebig klein gemacht werden, dagegen wächst das zweite damit an. Der ideale Fall der linearen Skala läßt sich aber wegen der durch die Formfehler der Nadel und die windschiefe Lage auftretenden elektrostatischen Richtkräfte praktisch niemals verwirklichen und die mechanische Richtkraft R' ist zu ersetzen durch $R' - {}^1/_2\, b\, v^2$;

---

[1]) Für den Gebrauch des Quadrantelektrometers als Wechselstromspannungs- und -leistungsmesser sei auf E. Orlich, ETZ **30**, 435, 466, 1919; ZS f. Instrkd. **29**, 33, 1909; E. Wilson, Proc. Phys. Soc. London **23**, 246, 1911; A. Baxmann, Physik. ZS. **13**, 744, 1921; C. C. Paterson, E. H. Kayner und A. Kinnes, Electrician **71**, 126, 182. 1913 verwiesen.

Tabelle XV.

Gegenkraft	Elektrometer	Ablesung	Autor	Empfindlichkeit	Meßbereich	Kapazität
I. Schwerkraft	Blättchen	direkt	Elster u. Geitel	6—7 V/Skt.	40—300 V	5—10 cm
	Blättchen	direkt	Schering	3,3 »		2,8 »
	Blättchen	Mikr.	Schmidt	0,5 »		
	Ein Blatt	direkt	Braun		500-10000 V	
	Ein Blatt	direkt	Bräuer	2—3 »		4
	Quarzfaden	Mikr.	Wiechert	0,5 »	400 V	6,8
	Einfaden	Mikr.	Elster u. Geitel	2 »	0—30 »	2
				—0,003 »		
	Kipp	Mikr.	Wilson	0,0025 »		2
II. Biegungs-Elastizität	Quarzfaden	Mikr.	Wulf	9 »	1400 »	1,7 ohne } Hilfskon-
				—0,25 »	40 »	2,3 mit } duktor
	Einfaden	Mikr.	Wulf	8 »	1300 »	je nach Schaltung;
				—0,003 »		Minimum: 2 cm
	Saiten	Mikr.	Lutz Doppelsch.:	1 »	2—130 V	4,7 ohne } Lade-
					10—120 »	5,7 mit } sonde
			Influenzsch.:	2,5 »	400—750 »	2,3 ohne } »
						3,3 mit }
			Saitensch.:	0,006 »	0,01—750 »	2,3 ohne } »
						3,3 mit }
	Kohlefaden	Mikr.	Villard	0,2 »		
	Metallfaden	Mikr.	Eccles	0,01 »		
III. Torsions-Elastizität	Quadrant	Fernrohr, Spiegel und Skala	Elster u. Geitel	0,005—0,001 V/mm		
	Quadrant		Schultze	0,0015 V/mm		
	Quadrant		Dolezalek	0,00006 »		80
	Quadrant		Paschen	0,0001 »		15
	Quadrant		Mülly	0,000015 »		1—2
	Quadrant		Compton	0,00001 »		9
	Quadrant		Parson	0,00008 »		
	Quadrant		Dolezalek	0,00005 »		
	Binant	Zeiger	Dolezalek	0,03 V/Grad	1600 V	
	Binant	Fernrohr, Spiegel, Skala	Hofmann	0,00005 V/mm		5
	Quadrant, komb. m. Hankel	Zeiger	Szilard	5 V/Skt.	250—1000 V	2
	Spiralfeder	Mikr.	Szilard	0,05 »		2
	Spiralfeder, neu	Zeiger	Szilard	2 »	100—300 »	6
	Quadrant	Skala, Fernrohr	Barus	0,00006 V/Ring		
	Quadrant, Reg.	Fernrohr, Spiegel, Skala	Ebert	0,003 V/mm		18
	Quadrant, Reg.	Zeiger	Benndorf	10 V/mm (Mittel)		20—30
	Quadrant, Reg.	Zeiger	Patterson	3,65 V/mm		100

dadurch kommt es, daß das System für gewisse Werte von v labil wird. Für $b < 2\, v^2/C$ wird L wie vorher ein Minimum, während es im entgegengesetzten Fall Null werden kann. Sieht man hiervon ab, so gilt für eine sektorenförmige Nadel mit dem Sektorenradius r, deren Abstand von der Dose d mm beträgt, beim

Hofmannschen Elektrometer ... $a = 1{,}325 \cdot 10^{-6} \cdot r^2/d$

und für das

Quadrantelektrometer ..... $a = 4 \cdot 1{,}325 \cdot 10^{-6} \cdot r^2/d$;

im letzteren Falle ist vorausgesetzt, daß die Nadel in der Dosenmitte hängt. Selbst für ein Elektrometer mit unendlich großer Spannungsempfindlichkeit ($S = 0$) kann doch L nie kleiner als $a \cdot v$ werden.

Für die anfänglich benutzte Nadelform beim Hofmannschen Elektrometer z. B. ist $r = 9$ mm, $d = 0{,}7$ mm; die größte Spannungsempfindlichkeit tritt ein für $v = 45$ V. Dann ist

$$L = 7 \text{ Millivolt} \cdot \text{cm/mm}.$$

Durch eine andere Nadelform läßt sie sich bis auf 0,7 Millivolt · cm/mm und noch weiter erhöhen.

Für das Dolezalek-Elektrometer wäre unter der Annahme $r = 20$ mm, $d = 3{,}5$ mm, $v = 100$ V,

$$L = 60 \text{ Millivolt} \cdot \text{cm/mm}.$$

Für das Müllysche Elektrometer kann man schätzen

$$a = 0{,}3 \cdot 10^{-3}; \text{ für } v = 100 \text{ V}$$

wäre dann $L = 30$ Millivolt · cm/mm.

Wie man sieht, bleibt die maximale Ladungsempfindlichkeit weit hinter der aus dem Produkt Kapazität mal Spannungsempfindlichkeit berechneten zurück. Die größte bis jetzt erreichte Ladungsempfindlichkeit dürfte zu 0,1 Millivolt·cm/mm anzusetzen sein. Es lassen sich damit 1000 Elementarquanten ($4{,}77 \cdot 10^{-10}$ ESE) wahrnehmen. Durch Summation über längere Zeit (etwa $^1/_4$ h) wäre somit noch 1 Elementarquantum/s bequem festzustellen.[1])

Bei den Elektrometern der beiden ersten Klassen tritt der Anteil der Influenzierung weit mehr zurück. Wir wissen z. B., daß beim Wulfschen Elektrometer die Änderung der Kapazität mit dem Ausschlag praktisch zu vernachlässigen ist; bei diesem wäre die größte Ladungsempfindlichkeit demnach zu 6 Millivolt·cm/Skt. anzusetzen. Während also die Torsionselektrometer bis zu 200 mal größere Spannungsempfindlichkeit aufweisen, ist ihre Ladungsempfindlichkeit nur etwa 60 mal so groß als bei den Elektrometern der beiden ersten Klassen.

---

[1]) G. Hofmann, Ann. d. Phys. **42**, 1196, 1913; **52**, 665, 1917.

Immerhin lassen alle Elektrometer bisher noch nicht den direkten Nachweis e i n e s elektrischen Elementarquantums zu, wie man dies an einem mikroskopischen Metall- oder Öltröpfchen ausführen kann, das zwischen zwei Kondensatorplatten durch die elektrischen Kräfte gegen die Schwerkraft in der Schwebe gehalten wird. Eine solche Vorrichtung — welche allerdings außer zur Bestimmung der Größe des elektrischen Elementarquantums für die Praxis der radioaktiven Messungen nicht in Betracht kommt — wäre somit als das bei weitem empfindlichste Elektrometer anzusprechen.[1])

[1]) H. Rubens in einer Diskussionsbemerkung auf der 84. Versammlung der Naturforscher und Ärzte in Münster 1912 (s. Physik. ZS. **13**, 1034, 1912).

Politechniki Gdańskiej

Druck von Oskar Leiner in Leipzig.

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
II 33870
Politechniki Gdańskiej

DRUCK VON OSKAR LEINER
LEIPZIG, KÖNIGSTRASSE 26B