

14. *Über einige Anwendungen des Saitengalvanometers; von W. Einthoven.*

(Aus dem physiologischen Laboratorium der Universität Leyden.)

In einem früheren Aufsätze¹⁾ wurde mitgeteilt und durch einige Photogramme erläutert, wie groß die Empfindlichkeit des Saitengalvanometers ist, und welche Dauer die Ausschläge des Quarzfadens haben. Wir erwähnten, daß bei schwacher Spannung der Saite ein Strom von 10^{-12} Amp. noch beobachtet werden konnte, und daß bei stärkerer Spannung, so daß die Saitenbewegung noch gerade aperiodisch ist und die Empfindlichkeit bis auf 1 mm Ausschlag für 2×10^{-8} Amp. reduziert wird, eine Abweichung von 20 mm ungefähr 0,009 Sek. erfordert.

Diese Zahlen mögen genügen, das Instrument theoretisch zu beurteilen, und eine Vorstellung zu geben von dessen praktischer Brauchbarkeit; letztere kann jedoch erst durch die Anwendungen selbst vollständig und überzeugend gezeigt werden.

In den folgenden Zeilen wünschen wir einige dieser Anwendungen zu erwähnen.

Wenn es darum zu tun ist, sehr schwache Ströme zu messen, scheint kein anderes Galvanometer dem von uns beschriebenen Instrumente gleich zu kommen. Selbstverständlich besteht theoretisch keine Grenze der Empfindlichkeit eines willkürlichen Galvanometers für einen konstanten Strom. Man kann die Schwingungsperiode der Magnete ebenso wie den Skalenabstand unbeschränkt vergrößern und also theoretisch jede erwünschte Empfindlichkeit erreichen. Aber die praktischen Schwierigkeiten werden bald unüberwindlich. Man hat u. a. mit der Inkonstanz des Nullpunktes zu kämpfen, die durch viele Einflüsse hervorgerufen wird und desto größere

1) W. Einthoven, Ann. d. Phys. 12. p. 1059. 1903.

Schwierigkeiten erzeugt, je nachdem die Schwingungsperiode größer wird.

Dies wird wohl die Ursache sein, warum man beim Messen sehr schwacher Ströme, z. B. bei der Untersuchung großer Isolationswiderstände und der ionisierenden Wirkung radioaktiver Substanzen, dem Galvanometer ein Elektrometer vorzieht.

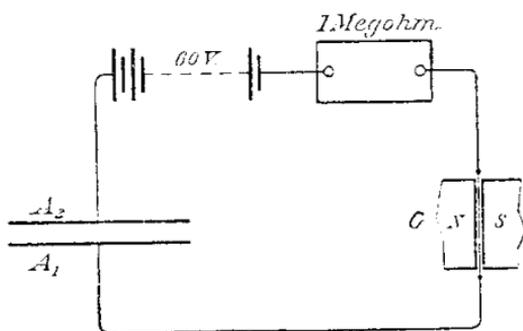
In der berühmten Untersuchung von Hrn. und Frau Curie¹⁾, die zur Entdeckung des Radiums geführt hat, wurde die Radioaktivität verschiedener Substanzen nach ihrer Fähigkeit, die Luft leitend zu machen, beurteilt. Und das Leitvermögen der Luft wurde mittels eines Elektrometers gemessen. Dieses mußte durch einen Strom geladen werden, den man durch eine leitende Luftschicht hindurchführte, während die Geschwindigkeit, womit das Elektrometer geladen wird, das Maß für die Stromstärke lieferte.

Anscheinend war es nicht so einfach, auf diese Weise die Stromstärken kennen zu lernen; darum zogen Hr. und Frau Curie es vor, ein Kompensationsverfahren mittels eines piezoelektrischen Quarzstabes anzuwenden. Die Ladung, die das Elektrometer durch die leitungsfähige Luftschicht empfing, wurde durch eine entgegengesetzte, durch den Quarzstab hervorgerufene Ladung kompensiert. Dies wurde erreicht, indem man das Quarz einer gleichmäßig zunehmenden Spannung unterwarf, und zwar wurden immer mehr Gewichte auf eine unten am Quarzstabe befestigte Schale gelegt. Auf diese Weise mußte das Spiegelbild des Elektrometers auf Null gehalten werden, während die Spannungszunahme pro Zeiteinheit das Maß für die Stromstärke, d. h. in diesem Falle auch das Maß für das Leitvermögen der Luft ergab.

Viel leichter können diese Messungen mit dem Saitengalvanometer ausgeführt werden. Ich verband das Instrument mit zwei Messingplatten A_1 und A_2 (vgl. Figur). Die beiden runden Platten hatten einen Diameter von ungefähr 25 cm und wurden bei einer gegenseitigen Distanz von ungefähr 2 cm isoliert aufgestellt, während in die Leitung vom Galvanometer G

¹⁾ Vgl. u. a. M^{me} S. Curie, Ann. de Chim. et de Phys. (7) 30. p. 99. 1903.

nach den Platten die Laboratoriumsbatterie von ungefähr 60 Volt und ein Widerstand von 1 Megohm eingeschaltet wurden. Die Empfindlichkeit des Galvanometers wurde auf 1 mm Ausschlag für 2×10^{-11} Amp. reguliert, wobei die Dauer eines Ausschlages ungefähr 5—7 Sek. in Anspruch nahm. Nun wurde



eine runde Platte, die um einen Diameter von ungefähr 20 cm mit pulverförmigem Urantrioxyd (wasserhaltend) belegt war, zwischen A_1 und A_2 geschoben und auf A_1 gelegt. Das Galvanometer zeigte hierbei eine Abweichung von

2,5 mm. Sobald das Uranpräparat entfernt wurde, zeigte das Galvanometer wieder genau seinen Nullpunkt.

Wiederholt wurde auf diese Weise das Uranpräparat zwischen die Kondensatorplatten gebracht und wieder weggenommen, und jedesmal zeigte das Galvanometer denselben Ausschlag von genau 2,5 mm. Jede Messung wurde in 5 bis 7 Sek. verrichtet, und weil — wie früher¹⁾ bewiesen wurde — ein Ausschlag von 0,1 mm noch merklich ist, darf die Beobachtungsgenauigkeit gleich 4 Proz. gesetzt werden.

Die gemessene Stromstärke betrug 5×10^{-11} Amp., welcher Wert von derselben Ordnung ist, wie die von Frau Curie berechneten Stromstärken für andere Uranpräparate, welche unter ähnlichen Umständen mittels des Piezoelektrometers untersucht waren.

Mit einem Worte erwähnen wir noch ein paar Versuche mit einigen Milligrammen eines Radiumsalzes. Wird das Radium zwischen die Kondensatorplatten gebracht, so ist eine Spannung von 2 Volt genügend, das Saitenbild einige Zentimeter ausweichen zu machen. Bei einer Spannung von 40 Volt im Kreise konnte man mit demselben Resultat das Radiumpräparat auf eine Entfernung von 1 m von den Platten halten.

1) l. c.

Jede bestimmte Distanz des Radiums von den Platten entsprach einer bestimmten Galvanometeranweisung, und es kostete keine Mühe, indem man das Radium dem Kondensator näherte, das Saitenbild von der Skala wegzuschlagen. Bemerkenswert ist bei all diesen Versuchen, daß, wenn das Uran- oder das Radiumpräparat unbeweglich gehalten werden, auch der Ausschlag des Galvanometers keine Schwankungen zeigt.

Obenstehende Beobachtungen mögen auch zum Beweise dienen, wie leicht es ist, mit dem Saitengalvanometer einen Isolationswiderstand zu messen. Der Versuch mit dem Urantrioxyd zeigte, daß der Widerstand der zwischen den beiden Kondensatorplatten befindlichen Luftschicht

$$\frac{60 \text{ Volt}}{5 \times 10^{-11} \text{ Amp.}} = 1,2 \times 10^{13} \text{ Ohm}$$

oder rund eine Million Megohm betrug. Durch einen bleibenden Galvanometerausschlag kann mit der Laboratoriumsbatterie von 60 Volt ein Isolationswiderstand von 6×10^{13} Ohm angezeigt werden.

Schließlich erwähnen wir hier noch eine Anwendung des Saitengalvanometers für die Messung schwacher Ströme, und zwar derjenigen, die durch die atmosphärische Elektrizität erzeugt werden. Eine Spirituslampe wird an einem langen Stock im Freien in die Höhe gehalten. Ein isolierter Leitungsdraht verbindet die Flamme mit dem einen Ende der Saite, während das andere Ende mit der Erde in Verbindung gebracht wird. Unter diesen Umständen sieht man eine bleibende Abweichung des Galvanometers, die sich verringert und verschwindet, sobald der Stock niedriger gehalten und in das Zimmer gebracht wird, aber wieder zum Vorschein kommt, sobald man den Stock wieder im Freien in die Höhe hält. Der Ausschlag des Galvanometers war bei diesen Versuchen meistens etwas schwankend, was durch den Wind verursacht wurde, der die Spiritusflamme bald etwas besser, bald etwas weniger gut mit dem Ende des Leitungsdrahtes in Berührung brachte.

Außer für die Messung sehr schwacher Ströme ist das Saitengalvanometer praktisch gut anwendbar, kleine Elektri-

zitätsmengen anzuzeigen, und besonders schnelle Schwankungen einer geringen elektrischen Spannung oder eines schwachen elektrischen Stromes genau kennen zu lernen. Als das auf schwache Ströme am schnellsten reagierende Instrument wird es zweifelsohne gute Dienste bei der transatlantischen Telegraphie leisten können.

Die kleinste Elektrizitätsmenge, die mit demselben angezeigt werden kann, kann leicht berechnet werden. Man stelle sich vor, daß in den Galvanometerkreis ein großer Widerstand eingeschaltet ist, so daß die elektromagnetische Dämpfung der Saitenbewegung vernachlässigt werden darf und daß jetzt plötzlich ein Strom von konstanter Stärke durch die Saite geschickt wird. Die unter diesen Umständen von der Saite vollbrachte Bewegung findet man in den früher schon publizierten¹⁾ Photogrammen genau abgebildet. Theoretisch muß die Saite in dem Augenblick, wo der Strom anfängt, eine elektromagnetische Kraft erfahren, durch welche ihr eine Beschleunigung mitgeteilt wird. Und die beschleunigte Bewegung wird so lange dauern, bis die Resultierende der elektromagnetischen Kraft und der Saitenspannung dem Luftwiderstande das Gleichgewicht hält.

Falls die Saite jedoch schwach genug gespannt ist, ist die Dauer dieser beschleunigten Bewegung sehr klein hinsichtlich der Dauer des ganzen Ausschlages, so daß die erste vernachlässigt werden darf. Man darf dann von einer Anfangsgeschwindigkeit der Saite reden und braucht ihrer Masse keine Rechnung mehr zu tragen. Die Anfangsgeschwindigkeit ist proportional der Stromstärke und darf bei einem Saitenbilde, das bei der von uns angewendeten Vergrößerung erhalten wird, für einen Strom von 10^{-9} Amp. ungefähr = 20 mm pro Sek. gesetzt werden.²⁾

1) l. c.

2) Obenstehender Betrag von 20 mm ist nur annäherungsweise genau. Ich hoffe bald Gelegenheit zu haben, ausführlicheres über die genaue Bewegung mitzuteilen, die durch die Saite unter verschiedenen Umständen vollbracht wird. Dabei wird der Einfluß des Luftwiderstandes mit demjenigen der elektromagnetischen Dämpfung verglichen werden. Es wäre ein unverkennbarer Vorteil, wenn die Saite in einen luftdicht abgeschlossenen Raum gebracht werden könnte, wodurch man in den

Ein Strom von 10^{-9} Amp. braucht also nur $\frac{1}{200}$ Sek. anzuhalten, um einen Ausschlag von 0,1 mm hervorzurufen, und weil, wie die Photogramme beweisen, ein solcher Ausschlag noch sichtbar ist, so kann eine Elektrizitätsmenge von 5×10^{-12} Ampèresekunden angezeigt werden. Diese Menge ist gleich der Ladung eines Kondensators von 1 Mikrof. bei einem Potential von 5×10^{-6} Volt oder der Ladung einer Kugel von 4,5 cm Radius bei einem Potential von 1 Volt.

Weil, wie schon bemerkt wurde, die Anfangsgeschwindigkeit proportional ist der Stromstärke, wird beim Durchströmen einer kleinen Elektrizitätsmenge der Ausschlag des Galvanometers gänzlich durch diese Menge selbst bestimmt werden, gleichgültig ob ein starker Strom während kurzer Zeit, oder ein schwacher Strom während längerer Zeit hindurchströmt, falls nur die Dauer der Durchströmung klein genug ist.

Die Eigenschaften des Saitengalvanometers lassen noch ein zweites, sehr merkwürdiges Resultat erwarten. Spannt man die Saite kräftiger, so wird die Geschwindigkeit, womit ein Ausschlag zustande kommt, zunehmen, aber zu gleicher Zeit die Größe der Abweichung für eine bestimmte Stromstärke abnehmen. Wie sich aus den Photogrammen schon gezeigt hat, wird *bei nicht zu stark gespannter Saite* die Veränderung der Empfindlichkeit genau umgekehrt proportional der Veränderung der Ausschlagsgeschwindigkeit sein, so daß bei größerer oder geringerer Saitenspannung doch die Anfangsgeschwindigkeit für eine bestimmte Stromstärke konstant bleibt. Und hieraus läßt sich der scheinbar paradoxe Satz herleiten, daß unter der genannten Bedingung der Ausschlag für eine schnell durchgeführte kleine Elektrizitätsmenge bei jeder willkürlichen Saitenspannung gleich groß ist.

Die Tatsachen sind mit obenstehender Betrachtung vollkommen im Einklang, und für denjenigen, der nicht mit dem Saitengalvanometer vertraut ist, ist es überraschend zu sehen, wie auch bei einer relativ viel stärkeren Saitenspannung, also bei einer bedeutenden Verringerung der Empfindlichkeit für

Stand gesetzt würde, sie willkürlich bald in einer Luftleere, bald bei erhöhtem Luftdrucke ausschlagen zu lassen.

konstanten Strom, die Empfindlichkeit für eine schnell hindurchgeleitete kleine Elektrizitätsmenge nahezu unverändert bleibt.

Und die praktische Anwendung liegt auf der Hand. Jedesmal wenn man schnelle Schwankungen der elektrischen Spannung anzeigen muß, ohne daß man dabei behindert werden darf durch den Einfluß langsam sich entwickelnder Änderungen der Stromstärke — eine Forderung, die bei elektro-physiologischen Untersuchungen wiederholt auftritt —, muß die Saite relativ stark gespannt werden.

Die oben beschriebene Empfindlichkeit für eine kleine, schnell durchgeleitete Elektrizitätsmenge macht mehr noch als die Empfindlichkeit für konstanten Strom das Saitengalvanometer geeignet für die Untersuchung einer Anzahl von Erscheinungen, die man mittels eines Elektrometers zu beobachten gewohnt ist.

Verbindet man das eine Ende der Saite mit der Erde, das andere mit einem isolierten, leitenden Gegenstand, z. B. einem Rheostat, so wird ein geriebener Hartgummistab, der in die Nähe des Rheostats gebracht wird, durch Influenz wirksam sein und das Saitenbild leicht von der Skala wegschlagen.

Eine einzige sich nähernde oder eine einzige sich entfernende Bewegung des Stabes hat der Natur der Sache nach immer eine doppelte Saitenbewegung zur Folge, weil die Saite jedesmal, wenn man mit der Bewegung des Stabes aufhört, sofort wieder auf ihren Nullpunkt zurückgeführt wird. Steht man auf einige Meter Entfernung vom Rheostat, so wird das Reiben des Hartgummistabes mit einem seidenen Tuche noch immer Ausschläge des Galvanometers veranlassen, und zwar wird bei jeder einzelnen Handbewegung eine doppelte Saitenbewegung sichtbar.

Als ich den Hartgummistab und das seidene Tuch weggelegt hatte und mich nur mit der leeren Hand dem Rheostat näherte, konnte noch ein kleiner Ausschlag von einigen Millimetern beobachtet werden. Bei der schnellen Annäherung der Hand zeigte die Saite eine kurz währende Abweichung in einer Richtung, bei der schnellen Entfernung der Hand eine

entsprechende Abweichung in der anderen Richtung. Sogar die Bewegung der Finger um eine der Kurbeln des Rheostats führte die Saite von ihrer Stelle weg. Hierbei muß nachdrücklich betont werden, daß der Rheostat nicht mit der Hand berührt wurde, so daß eine gewöhnliche Leitung vom menschlichen Körper durch das Galvanometer nach der Erde hin ausgeschlossen war.

Ich konnte die Erscheinung nicht unmittelbar erklären. Der erste Gedanke war, daß der menschliche Körper oder wenigstens die Hand bis auf ein gewisses Potential geladen war und ebenso wie der Hartgummistab durch Influenz die Elektrizität durch den Rheostat und das Galvanometer trieb. Das Potential einer der Hände einer nicht isolierten Person ist jedoch zu klein, um die Saitenbewegung zu erklären. Auch zeigte sich, daß die Kleidung, wie z. B. ein wollener Ärmel, nicht in Betracht kam. Wurde eine runde metallene Scheibe, die durch einen Leitungsdraht mit der Erde verbunden war und also erachtet werden dürfte, dasselbe Potential wie die Saite und der Rheostat zu besitzen, plötzlich letzterem genähert oder von ihm entfernt, so zeigten sich dieselben Ausschläge wie bei der Bewegung der menschlichen Hand.

Auch wurden diese Ausschläge nur wenig verändert, wenn die metallene Scheibe bewegt wurde, nachdem sie erst mittels eines Akkumulators das eine Mal zum Potential $+2$, das andere Mal zum Potential -2 geladen war.

Der Gedanke, daß die fremdartige Erscheinung den Luftströmungen zugeschrieben werden müßte, welche durch Reibung Elektrizität entwickelten, mußte sofort verworfen werden, als mittels eines Blasebalgs ein kräftiger Luftstrom auf den Rheostat gerichtet wurde, ohne daß die Saite eine Spur von Bewegung zeigte. Aber schließlich stellte sich heraus, daß die Erscheinung ganz einfach erklärt werden muß. Die Hartgummiplatte des Rheostats hat eine gewisse Ladung und die elektrischen Kraftlinien biegen sich vom Hartgummi nach den metallenen Teilen des Rheostats um. Sobald nun ein Leiter in die Nähe gebracht wird, verschieben sich diese Kraftlinien, wodurch eine Elektrizitätsbewegung des Metalles des Rheostats durch das Galvanometer nach der Erde hin hervorgerufen werden muß.

Daß diese Erklärung die richtige ist, konnte leicht demonstriert werden, indem das Hartgummi des Rheostats gerieben und also zu höherem Potential geladen wurde. Hatte letzteres stattgefunden, so wurden die oben beschriebenen Ausschläge viele Male vergrößert.

Ein hübscher Beweis dafür, daß das Saitengalvanometer als empfindliches und zugleich schnell anweisendes Instrument praktisch gut brauchbar ist, wird durch die Leichtigkeit und Reinheit geliefert, womit es einen Schall zu registrieren imstande ist. Verbindet man ein Siemenssches Telephon mit dem Galvanometer, so werden die Schallwellen, welche die Sprechplatte des Telephons erreichen, Induktionsströme durch die Saite schicken, wodurch diese letztere in Bewegung versetzt wird.

Sobald man einen Ton von willkürlicher Höhe mit konstanter Intensität gegen das Telephon klingen läßt, so scheint das Saitenbild sich auf eigentümliche Weise zu verbreitern. Im hellen, weißen Gesichtsfelde wird das schmale, schwarze Saitenbild zu einem verschiedene Zentimeter breiten Bande ausgedehnt, das eine weißgraue Färbung hat und sich desto schwächer im Gesichtsfelde hervorhebt, je nachdem es breiter ist. Die Mitte des grauen Bandes stimmt immer mit der Stelle des Bildes des ruhenden Quarzfadens überein, während von den Rändern bemerkt werden muß, daß sie sich etwas dunkler abzeichnen als der übrige Teil des Bandes.

Dieses ganze Aussehen wird vollkommen erklärt durch den Umstand, daß die Saite regelmäßige, schnelle Schwingungen macht, die denselben Rhythmus wie die das Telephon erreichenden Schallschwingungen haben.

Auf eine Eigentümlichkeit muß noch hingewiesen werden. Wird ein Laut, z. B. der Vokal *A* oder *O* gegen die Sprechplatte des Telephons gesungen, so sieht man das graue Band in Abteilungen eingeteilt. Symmetrisch im Verhältnis zur Mitte des Bildes sind innerhalb der wirklichen Ränder gleichsam sekundäre und tertiäre Ränder sichtbar, die wohl nicht anders erklärt werden können, als durch die Annahme, daß die Saitenbewegung den Laut in den Grundton und die Obertöne zerlegt und aus einer Anzahl von Schwingungen ver-

schiedener Frequenz und Amplitude zusammengesetzt ist. Wir hoffen diese Erscheinung bald mittels der Photographie näher zu studieren. Verändert man die Intensität des Schalles, so ändert sich auch sofort die Breite des grauen Bandes. Und im selben Augenblick, wo der Schall aufhört, sieht man das schmale, schwarze Saitenbild wieder vollkommen unbeweglich im hellen Gesichtsfelde stehen.

Wird das Telephon durch ein Mikrophon mit einem zweckentsprechenden Induktorium ersetzt, so werden dieselben Erscheinungen beobachtet, außer daß bei dieser Verbindung die Vorrichtung viel empfindlicher geworden ist. Schwache Schalle erzeugen jetzt schon bedeutende Verbreiterungen, und es ist überraschend, zu sehen, wie beim leisen Sprechen auf mehrere Meter Entfernung vom Mikrophon das Saitenbild auf jedes gesprochene Wort oder besser auf jede ausgesprochene Silbe kräftig reagiert, während es immer sofort den Ruhestand einnimmt, sobald der Laut nur einen Augenblick aufhört.

Schwache Schalle, wie z. B. die Herztöne eines Kaninchens, werden auf vorzügliche Weise durch das Galvanometer reproduziert.

Außer bei dem Studium der menschlichen Stimme und der Herztöne wird das Saitengalvanometer in der Physiologie mit Erfolg auf einem ausgebreiteten Untersuchungsgebiete angewendet werden können. Wir teilten schon einige Ergebnisse der Untersuchung über das menschliche Elektrokardiogramm¹⁾ mit. Weiter ist jetzt eine Untersuchung über Nervenströme in Bearbeitung, wovon hier vorläufig erwähnt werden kann, daß man den Aktionsstrom eines Nerven als Folge eines einfachen Reizes deutlich sichtbar machen und scharf registrieren kann. Soweit mir bekannt ist, sind Aktionsströme eines Froschischiadikus, welche durch die Reizung bei Öffnung und Schließung eines auf- und eines absteigenden konstanten Stromes erzeugt werden, nie beobachtet worden. Das Saitengalvanometer zeigt dieselben an mit allen Einzelheiten, wie sie nach dem Pflügerschen Zuckungsgesetze erwartet werden müssen und deren

1) W. Einthoven, Pflügers Archiv für die gesamte Physiol. 99. p. 472. 1903.

Vorhandensein man bis jetzt nur aus den beobachteten Muskelzuckungen vermuten konnte. Auch sieht man die Superposition der elektrotonischen Erscheinungen auf diejenigen des Aktionsstromes, was keine Schwierigkeit bei der Erklärung der erhaltenen Kurven darzubieten braucht. Die Annahme scheint mir nicht zu gewagt, daß vielleicht neue Gesichtspunkte eröffnet werden können über die Art und Weise, auf welche ein Nerv auf verschiedene Reize zu reagieren imstande ist.

(Eingegangen 28. März 1904.)
