

7. *Ein neues Galvanometer; von W. Einthoven.*

(Hierzu Taf. III, Figg. 1—5.)

(Aus dem physiologischen Laboratorium der Universität Leyden.)

I. Prinzip und Theorie.

Das in diesem Aufsatz zu beschreibende Instrument, das *Saitengalvanometer* heißen mag, beruht auf dem bekannten Prinzip des beweglichen Stromträgers in einem festen magnetischen Felde. Der bewegliche Stromträger besteht aus einem versilberten Quarzfaden, der wie eine Saite auf zweckentsprechende Weise zwischen den Polen eines Elektromagnetes ausgespannt ist. Wird ein elektrischer Strom durch die Saite geführt, so weicht dieselbe senkrecht zu den magnetischen Kraftlinien ab, während die Abweichung in der Mitte der Saite mit Hilfe eines Mikroskopes mit Okularmikrometer unmittelbar gemessen werden kann.

Die Überlegungen, die zur Konstruktion des Saitengalvanometers geführt haben, können am besten auseinandergesetzt werden, wenn man von einer bestehenden Form des Deprez-d'Arsonval-Galvanometers ausgeht, und sich die Frage vorlegt, welche Änderungen zugunsten dieses Werkzeuges angebracht werden können.

An erster Stelle muß die Normalempfindlichkeit in Betracht gezogen werden. Unter Normalempfindlichkeit¹⁾ versteht man den Ausschlag in Millimetern auf einer Skala, die 1000 mm vom Spiegel entfernt ist. Für die Stromstärke wird 10^{-6} Amp. und für den inneren Widerstand des Galvanometers 1 Ohm in Rechnung gebracht, während für die volle ($\sim$) Schwingungsperiode eine Dauer von 10 Sek. genommen wird.

Die Ausschläge werden proportional den Stromstärken berechnet. Weiter nimmt man an, daß in einem gegebenen

1) Vgl. W. E. Ayrton u. F. Mather, Phil. Mag. (5) 46. p. 349. 1898. Ferner auch H. du Bois u. H. Rubens, Zeitschr. f. Instrumentenk. 20. p. 74. 1900 und F. Kohlrausch, Lehrb. d. prakt. Phys. 2. Aufl. p. 361. 1901.

Instrumente der Ausschlag für eine bestimmte Stromstärke proportional der Potenz $\frac{1}{2}$ (oder in den meisten Umständen genauer wie die $\frac{2}{5}$ Potenz) des inneren Widerstandes und dem Quadrate der Schwingungsperiode zunimmt.

Zeigt ein Galvanometer bei einem Skalenabstand von d mm für einen Strom von J Amp. einen Ausschlag von a mm, wird für eine ganze Schwingung ($\sim$) t Sek. in Anspruch genommen, und beträgt der innere Widerstand w Ohm, so wird die Normalempfindlichkeit E_1 des Instrumentes ausgedrückt durch

$$(1) \quad E_1 = \frac{a}{10 d t^2 J \sqrt{w}}.$$

Die Normalempfindlichkeit E_1 kann nie durch eine Veränderung der Direktionskraft des Aufhängedrahtes erhöht oder verringert werden, denn hierdurch werden aus obenstehender Formel (1) nur a und t beeinflusst, und zwar so, daß a/t^2 konstant bleibt. Ebenso wenig kann die Normalempfindlichkeit geändert werden, indem man *bei gleichbleibendem Gewichte und gleichbleibenden Dimensionen der beweglichen Spule* die Zahl der Windungen vermehrt oder verringert, denn hierdurch werden aus der Formel (1) nur a und w beeinflusst, und zwar derart, daß jetzt $a/\sqrt{w}$ konstant bleibt. Dahingegen wird der Ausschlag a und damit die Normalempfindlichkeit proportional der Stärke des magnetischen Feldes vermehrt, und werden auch Veränderungen in den Dimensionen der Spule einen bestimmten Einfluß ausüben können. Nur dieser letztere Einfluß verdient näher in Betracht gezogen zu werden.

Die Form der Spule bleibe vorläufig unverändert, und als erste Frage wird gestellt: „Welchen Erfolg hat das Wegnehmen einiger Windungen, *wenn man nicht zugleich durch die Anwendung eines dickeren Drahtes die Änderung des Gewichtes und der Dimensionen der Spule kompensiert?*“

Wenn so viele Windungen weggenommen werden, daß ihre Zahl m mal verkleinert wird, so wird die Spule m mal leichter, wodurch das Trägheitsmoment auch m mal abnimmt. Hierdurch wird die Schwingungsperiode $\sqrt{m}$ mal kürzer. Der Widerstand wird m mal und der Ausschlag für eine gleiche Stromstärke gleichfalls m mal verringert.

Aus den oben genannten Veränderungen der Schwingungsperiode t , des Widerstandes w und des Ausschlages a geht hervor, daß der Ausdruck $a/t^2 \sqrt{w}$ und damit die Normalempfindlichkeit $\sqrt{m}$ mal zunimmt. Um diese letztere so viel wie möglich zu vergrößern, muß man also **möglichst wenige** Windungen auf der Spule lassen. Wenn keine praktischen Schwierigkeiten vorhanden wären, so wäre eine aus einer einzigen Drahtwindung bestehende Spule am vorteilhaftesten.

Als zweite Frage muß in Erwägung gezogen werden, „auf welche Weise ändert sich die Normalempfindlichkeit durch Änderung der Drahtdicke in der Spule?“ Wenn der Durchmesser des Drahtes n mal kleiner wird, so nimmt das Trägheitsmoment n^2 mal ab. Hierdurch wird die Schwingungsperiode n mal kürzer. Der Ausschlag für eine bestimmte Stromstärke bleibt unverändert, aber der Widerstand des Drahtes wird n^2 mal größer. Aus der Veränderung der Schwingungsperiode t und des Widerstandes w geht hervor, daß der Ausdruck $1/t^2 \sqrt{w}$ und damit wieder die Normalempfindlichkeit n mal zunimmt. Es ist darum wünschenswert, einen Draht anzuwenden, der *möglichst dünn* ist.

Die beiden oben genannten Veränderungen nötigen uns, das Gewicht der Spule und damit ihr Trägheitsmoment möglichst zu verringern. Selbstverständlich kann dies nur dann Nutzen haben, wenn das Gewicht des Spiegels vernachlässigt werden darf. Man kann den Spiegel auch ganz weglassen und die Bewegungen des Drahtes unmittelbar mit dem Mikroskop beobachten. Und schließlich ist es nur ein kleiner Schritt, von der aus einer einzigen, äußerst dünnen Drahtwindung bestehenden Spule zur gespannten Saite überzugehen.¹⁾

Außer der Dicke beeinflusst auch die Länge der Saite die Normalempfindlichkeit des Galvanometers. Wird die Saite p mal kürzer, so wird die Normalempfindlichkeit $\sqrt{p}$ mal vergrößert.

Das Material, aus welchem die Saite angefertigt wird, muß bei einem geringen spezifischen Gewicht S ein großes

1) Als Empfangsapparat zum Gebrauche bei der Telegraphie konstruierte schon Ader ein Instrument mit einer zwischen den Polen eines Magnetes gespannten Saite. Mit Hilfe eines Federkiesels wurde die Saite in ihrer Mitte, d. h. auf der Stelle, wo ihre Bewegungen photographiert wurden, dicker gemacht (Compt. rend. 124. p. 1440. 1897).

Leitvermögen L besitzen. Wenn S^2/L ein Minimum ist, so sind hinsichtlich des Materiales die günstigsten Bedingungen erfüllt.

Aber wie sollen wir bei einem Galvanometer ohne Spiegel, dessen beweglicher Teil mit dem Mikroskope beobachtet wird, die Normalempfindlichkeit messen? Der Ausdruck „Normalempfindlichkeit“ ist bis jetzt nur für Instrumente mit Spiegelablesung benutzt worden, wobei man merkwürdigerweise die Größe des angewendeten Spiegels ganz außer Rechnung gelassen hat. Ein vielfach gebräuchlicher Spiegel ist z. B. einer von 3 mm Durchmesser. Dieser erzeugt bei einem Skalenabstand von 2,5 m von jedem Punkt der Skala einen ungefähr 1 mm Durchmesser haltenden Diffraktionskreis, so daß es — noch ganz abgesehen von der geringen Lichtmenge — schwierig sein wird, eine Skalenabweichung eines kleinen Bruchteiles eines Millimeters wahrzunehmen. Beim Gebrauch eines größeren Spiegels wird der Diffraktionskreis umgekehrt proportional dem Spiegeldurchmesser verändert werden, so daß es rationell erscheint, den Spiegeldurchmesser bei der Angabe der Normalempfindlichkeit eines Werkzeuges in Rechnung zu bringen.

Man kann zur Basis der Berechnung einen Spiegelradius von 1 mm nehmen. Die Formel (1) wird dann verändert in

$$(2) \quad E_2 = \frac{a r}{10 d t^2 J \sqrt{w}},$$

worin r den Spiegelradius in Millimetern bedeutet.

Eine nach dieser Formel (2) ausgedrückte Normalempfindlichkeit behält ihre Bedeutung bei, wenn die Beobachtung im Spiegelbilde durch die mikroskopische Wahrnehmung ersetzt wird. Denn die mit dem Mikroskope zu erreichende zweckentsprechende Vergrößerung wird durch dieselbe Diffraktion des Lichtes eingeschränkt wie die Verkleinerung des Spiegelradius oder die Verlängerung des Skalenabstandes. Und es empfiehlt sich zur Vergleichung der Empfindlichkeit eine solche mikroskopische Vergrößerung in Rechnung zu bringen, daß die Diffraktionskreise des mikroskopischen Bildes und diejenigen des Spiegelbildes einander gleich sind. Ist dieser Bedingung Genüge geleistet, so wird der Wert der mikroskopischen Vergrößerung v ausgedrückt durch

$$(3) \quad v = N \times \frac{d}{r},$$

worin N die numerische Apertur des gebrauchten Objectives, r den Spiegelradius und d den Skalenabstand bedeutet.

Die numerische Apertur der besten Trockensysteme beträgt 0,95. Setzen wir dafür eine runde Zahl 1, so können wir für Formel (3)

$$v = \frac{d}{r}$$

schreiben, woraus hervorgeht, daß

$$(4) \quad \frac{r}{d} = \frac{1}{v}.$$

Tragen wir den Wert für r/d in Formel (2) ein, so finden wir für die Normalempfindlichkeit eines Instrumentes ohne Spiegel

$$(5) \quad E_3 = \frac{a}{10 t^2 J v \sqrt{w}},$$

worin die Buchstaben ihre oben schon erwähnte Bedeutung beibehalten.

Wenn der Spiegelradius $r = 1$ ist und der Skalenabstand gleich 1000, so wird ein gleich großer Diffraktionskreis gebildet, wie wenn mit einem Objective, dessen numerische Apertur 0,95, eine Vergrößerung $v = 950$ erzielt wird.

II. Die praktische Anwendung.

Bei der praktischen Anwendung des Saitengalvanometers müssen außer der Frage nach der erreichbaren Normalempfindlichkeit noch verschiedene andere Fragen in Betracht gezogen werden. Wie stark ist der schwächste Strom, der noch gemessen werden kann? Wie steht es mit der Dämpfung der Saitenbewegung? Sind die Ausschläge proportional den Stromstärken? Wie stark beeinträchtigen die Erschütterungen der Umgebung und die Luftströmungen die Brauchbarkeit des Instrumentes etc.

In dem von mir konstruierten Instrumente haben die Polschuhe eine Höhe von 12,5 cm und schließen ein spaltförmiges, nahezu homogenes magnetisches Feld ein, dessen Stärke gewöhnlich auf 20000—23000 C.G.S. reguliert wird.¹⁾

1) Bei einer früheren Gelegenheit — vgl. Bosschas Festschrift, Archives Néerlandaises des sciences exactes et naturelles (II) 6. p. 625. 1901 — hatte ich die Feldstärke auf 30000 C.G.S. geschätzt, aber das

Jeder der beiden Polschuhe ist in seiner Mitte durchbohrt. Im Bohrloch des einen Polschuhes befinden sich die Belichtungslinsen, im Bohrloche des anderen ist das Projektionsmikroskop angebracht, während die Saite in der Mitte des spaltförmigen Raumes zwischen den beiden Schuhen ausgespannt ist.

Wie oben auseinandergesetzt, ist der Durchmesser der Saite einer der wichtigsten Faktoren, welche die Empfindlichkeit des Galvanometers bestimmen. Im Handel bestehen zwar dünne metallene Drähte oder Bänder, die man als Saite benutzen könnte, aber begnügt man sich hiermit nicht, so kann man auch selber eine Saite anfertigen und dazu z. B. Aluminium in Blattform verwenden. Ein aus einem Bueche genommenes Aluminiumblatt, das, wie leicht durch Wägung konstatiert werden kann, nur $0,75 \mu$ dick ist, wird, ähnlich wie ein Buchbinder das Blattgold schneidet, in Streifen geteilt. Ein Streifen von einigen Millimetern Breite wird mittels Firnis auf eine Glasplatte geklebt und danach mit einem scharfen Messer in feinere Bänder geteilt. Es gelang uns nicht, schmalere Bänder als 0,3 oder 0,4 mm zu erhalten und als Saite im Galvanometer auszuspannen, aber mit solchen von 0,4 mm — welche doch nur einen Querschnitt gleich $300 \text{ q}\mu$ hatten — wurden schon ziemlich befriedigende Resultate erzielt.

Eine große Verbesserung wurde erreicht, als durch Versilberung leitend gemachte Quarzfäden versucht wurden. Von den verschiedenen Quarzfäden, womit wir Messungen angestellt haben, ist früher schon einer erwähnt worden¹⁾, nämlich ein Faden von $2,1 \mu$ Durchmesser und 20300 Ohm Widerstand. Dieser Faden konnte als Saite im magnetischen Felde wegen seiner paramagnetischen Eigenschaften nicht genügend entspannt werden. Jetzt wird ein anderer Faden von $2,4 \mu$ Durchmesser und 10000 Ohm Widerstand benutzt. Er ist zwar etwas dicker als der frühere, aber er hat den Vorteil, daß er einen zweifach geringeren Widerstand besitzt und in genügendem Maße entspannt werden kann. Außerdem sind

Eisen, aus welchem der Elektromagnet angefertigt ist, entspricht den gehegten Erwartungen nicht. Die unmittelbare Messung zeigte mir, daß die Feldstärke schwerlich auf mehr als 26 000 C.G.S. gebracht werden kann.

1) Archives Néerlandaises I. c.

eine Anzahl nicht unwesentlicher Verbesserungen an dem schon vorliegenden Werkzeuge angebracht, wodurch man schließlich in den Stand gesetzt wird, sehr schwache Ströme zu messen.

Welche Empfindlichkeit kann jetzt erreicht werden?

Reguliert man die Spannung der Saite derart, daß ein Ausschlag je nach der Größe in ungefähr 10 oder 15 Sek. stattfindet, so entspricht bei der Anwendung einer 660fachen Vergrößerung jeder Millimeter Verschiebung des Saitenbildes einem Strome von 10^{-11} Amp. Weil in diesen Umständen, wie bei der Besprechung der beigegebenen Taf. III, Figg. 1—5 noch näher gezeigt werden wird, eine Verschiebung von 0,1 mm noch beobachtet werden kann, so kann man noch Ströme von 10^{-12} Amp. wahrnehmen.

Sogar die empfindlichsten Galvanometer anderer Konstruktion, wie diejenigen von Thomson und die Panzergalvanometer von du Bois und Rubens, sind kaum oder nicht imstande, mit Sicherheit das Vorhandensein von ebenso schwachen Strömen wahrnehmbar zu machen. Das Saitengalvanometer nimmt also in der praktischen Anwendung eine Stelle neben diesen ein und muß von den sogenannten, nur auf viel stärkere Ströme reagierenden Oszillographen unterschieden werden.

Die Kraft, welche die Saite zur Abweichung bringt, wenn sie sich in einem Felde von 20000 C.G.S. befindet, und von einem Strome von 10^{-12} Amp. durchströmt wird, ist sehr klein und läßt sich für eine Länge von 12,5 cm auf $2,5 \times 10^{-11}$ g oder noch viermal weniger als ein zehnmillionstel Milligramm berechnen.

Indem man die Saite stärker spannt, wird ihre Bewegung schneller, aber der Ausschlag für dieselbe Stromstärke kleiner. Es hat keine Schwierigkeit, die Saite genau so zu spannen, daß ein Strom von gegebener Stärke einen im voraus bestimmten Ausschlag erzielt, wie man aus den Photogrammen der Taf. III ersehen kann. Diese Photogramme sind auf ähnliche Weise hergestellt wie die früher beschriebenen¹⁾ kapillarelektrometrischen Kurven. Das 660fach vergrößerte Bild von der Mitte der Saite wird auf einen senkrecht auf dem Saiten-

¹⁾ Vgl. verschiedene Aufsätze in Pflügers Archiv f. d. gesamte Physiol. und in „Onderzoekingen“ Physiol. Laborat. Leiden, 2. Reihe.

bilde stehenden Spalt geworfen. Vor dem Spalte befindet sich eine Zylinderlinse, deren Achse der Spaltrichtung parallel verläuft, während hinter ihr eine photographische Platte in der Richtung des Saitenbildes bewegt wird. Zur selben Zeit, wo die Bewegungen der Saite registriert werden, wird nach der vorzüglichen Methode Gartens¹⁾ ein Koordinatensystem auf der photographischen Platte entworfen. Die horizontalen Linien dieses Systems erhält man, indem man eine gläserne Millimeterskala dicht vor die empfindliche Platte hinstellt, so daß die scharfen Schatten der Skalenteilung auf die Platte fallen, während die vertikalen Linien durch eine gleichmäßig drehende Scheibe mit Speichen hervorgerufen werden, welche das auf dem Spalt fallende Licht intermittierend unterbrechen. Die gegenseitige Distanz der vertikalen Linien ist in unseren Photogrammen ebenso wie die gegenseitige Distanz der horizontalen ungefähr gleich 1 mm genommen, während jede fünfte Linie etwas dicker ist. Diese letztere Eigentümlichkeit kann leicht in dem Koordinatensysteme angebracht werden, indem man in der gläsernen Millimeterskala vor der empfindlichen Platte jeden fünften Strich etwas dicker macht, während gleichfalls jede fünfte Speiche der drehenden Scheibe breiter gemacht werden muß.

Das erste Photogramm (Taf. III, Fig. 1) stellt die Ausschläge der Saite dar, während durch das Galvanometer hintereinander Ströme von 1, 2 und 3×10^{-9} Amp. geschickt werden. Im Koordinatensystem hat eine Abszissenlänge von 1 mm den Wert von 0,1 Sek., während eine Ordinatenlänge von 1 mm gleich 10^{-10} Amp. ist. Obgleich das Saitenbild eine große Breite hat, und — wie bei der angewendeten 660fachen Vergrößerung auch zu erwarten ist — keine vollkommen scharfen Ränder besitzt, kann doch seine Verschiebung im Koordinatensystem leicht auf 0,1 mm genau bestimmt werden. Man vergleiche dazu nur einen der Ränder des Bildes vor und nach dem Ausschlage, und kann sich dann entweder bei unmittelbarer Beobachtung mit dem unbewaffneten Auge oder mit Hilfe einer Lupe überzeugen, daß der gemachte Ausschlag

1) S. Garten, Abhandl. d. k. sächs. Gesellsch. d. Wissensch. zu Leipzig, Mathem.-phys. Klasse 26. Nr. 5. p. 331. 1901.

weniger als 0,1 mm vom angegebenen Betrage verschieden ist. Die Stromstärken werden also im Photogramm bis auf einen Wert von 10^{-11} Amp. genau gemessen.

Man sieht, daß die Ausschläge genau proportional den Stromstärken sind, daß sie aperiodisch sind und daß sie je nach ihrer Größe in ungefähr 1—2 Sek. ablaufen. Die starke Dämpfung der Bewegung muß dem Luftwiderstande zugeschrieben werden, denn während der Registrierung der Kurven war in den Galvanometerkreis ein Widerstand von 1 Megohm eingeschaltet, wodurch die gewöhnliche elektromagnetische Dämpfung nahezu ganz aufgehoben war.

Spannt man die Saite 10mal schwächer an, so wird das Galvanometer auch 10mal empfindlicher und können, wie schon oben erwähnt, noch Ströme von 10^{-12} Amp. wahrgenommen werden. Aber bei dieser großen Empfindlichkeit bleiben die Ausschläge nicht mehr proportional den Stromstärken, und kann die Saitenbewegung nur schwierig registriert werden, weil der Quarzfaden sich nicht mehr vollkommen in einer flachen Ebene bewegt. Doch ist das Instrument dann für unmittelbare mikroskopische Beobachtung noch brauchbar.

Aus Taf. III, Fig. 2 ist ersichtlich, daß die Ausschläge nach rechts und links — die in der Figur den Ausschlägen nach oben und unten entsprechen — gleich groß sind. Die Bewegungsgeschwindigkeit der photographischen Platte ist unverändert geblieben, also entspricht wieder eine Abszisse von 1 mm einer Zeit von 0,1 Sek. Aber die Saite ist 200mal stärker gespannt, so daß 1 mm einer Ordinate 2×10^{-8} Amp. vorstellt. Ein Strom von 4×10^{-7} Amp. wird wechselweise in der einen und in der anderen Richtung durch das Galvanometer geschickt und erzielt also Ausschläge von 20 mm nach rechts und ebensoviel nach links. Man überzeugt sich leicht, daß diese Ausschläge bis auf 0,1 mm genau einander gleich sind.

Die Saitenbewegung ist sehr schnell, so daß die Saite während ihres Ausschlages nur einen geringen Schatten auf die photographische Platte werfen kann. Die aufsteigenden und die absteigenden, so gut wie vertikale Linien, welche im ursprünglichen Negativ noch als sehr dünne Striche sichtbar sind, sind im reproduzierten Photogramm weggefallen.

In Taf. III, Fig. 3 ist eine Saitenbewegung beim plötzlichen

Ein- und Ausschalten eines Stromes von 3×10^{-8} Amp. abgebildet. Die photographische Platte ist mit einer 10mal größeren Geschwindigkeit fortbewegt und die Saite ist 10mal stärker gespannt als in Fig. 1, also Abszisse 1 mm = 0,01 Sek. und Ordinate 1 mm = 10^{-9} Amp. Der Galvanometerkreis enthält wieder 1 Megohm, so daß dieselben Ursachen für die Dämpfung wirksam sind wie in Fig. 1. Während die Bewegung noch aperiodisch ist, geschieht sie jedoch wegen der 10mal größeren Kraft, womit ein Ausschlag vollzogen wird, auch 10mal schneller, was man leicht beurteilen kann, wenn man die große absteigende Kurve der Fig. 1 mit einer der Kurven der Fig. 3 vergleicht, oder besser noch die Kurven beider Figuren in Diapositivbildern aufeinander legt. Man wird dann sehen, daß sie einander vollkommen bedecken, und weil bei der einen Figur die Bewegungsgeschwindigkeit der photographischen Platte 10mal größer ist als bei der anderen, so wird hierdurch bewiesen, daß auch der Ausschlag der Saite im einen Falle 10mal schneller stattfindet als im anderen. Zugleich wird hierdurch gezeigt, daß unter unseren Bedingungen der durch die Saite empfundene Luftwiderstand proportional ihrer Bewegungsgeschwindigkeit zunimmt.

Beim Registrieren der Kurven der Figg. 4 u. 5, Taf. III ist die Bewegungsgeschwindigkeit der photographischen Platte bis auf 250 mm pro Sek. erhöht, also ist Abszisse 1 mm = 0,004 Sek. Die Platte fängt ihre Bewegung langsam an und erreicht die genannte Geschwindigkeit erst, nachdem sie einen Weg von 4—5 cm zurückgelegt hat, während die Speichen der drehenden Scheibe immer genau jede 0,004 Sek. ihre Schatten auf die Platte werfen. Daher ist das Koordinatensystem auf dem ersten Sechstel des Photogramms in der Richtung der Abszissen zusammengedrückt.

In Fig. 4 ist Ordinate 1 mm = 2×10^{-8} Amp., während in Fig. 5, Ordinate 1 mm 3×10^{-8} Amp. beträgt. Aus beiden Figuren zusammen lernt man den Grenzwert der Empfindlichkeit kennen, bei welcher die Saitenbewegung noch gerade aperiodisch ist. In Fig. 4 ist plötzlich ein Strom von 4×10^{-7} Amp., in Fig. 5 ein Strom von 6×10^{-7} Amp. durch das Galvanometer geschickt und wieder unterbrochen worden. Bei oberflächlicher Betrachtung scheint der Ausschlag in Fig. 4

noch aperiodisch, während er in ungefähr 0,009 Sek. abläuft. Dahingegen fängt die Bewegung in Fig. 5 an deutlich oszillierend zu werden und nimmt für eine halbe Schwingung 0,006 Sek. in Anspruch.

Beim Schreiben der beiden Figuren ist im Galvanometerkreis nur ein unbedeutender Widerstand eingeschaltet, so daß sich hier nebst der Reibung der Luft noch die gewöhnliche elektromagnetische Dämpfung auf die Bewegung geltend macht. Das Ein- und Ausschalten des Stromes wurde mittels eines Stromschlüssels erzielt, der sich in der Hauptleitung befand, während der Galvanometerkreis, der eine Nebenleitung darstellte, dabei dauernd geschlossen blieb. Unter diesen Umständen bleibt die elektromagnetische Dämpfung im Galvanometerkreis bei der Stromöffnung gleich derjenigen bei der Stromschließung, man würde daher erwarten, daß die absteigenden Kurven in der Figur vollkommen gleich den aufsteigenden wären. Aber dieser Erwartung entsprechen die Figuren, besonders Fig. 4 nicht. Betrachtet man die Kurven dieser letzteren Figur genauer, so kann man sehen, daß schon eine Spur von Periodizität bei den absteigenden Kurven, d. h. bei Stromöffnung vorhanden ist, während die aufsteigenden Kurven, welche bei Stromschließung registriert, noch vollkommen aperiodisch sind. Bei den absteigenden Kurven überschreitet die Saite den Nullstand mit ungefähr 0,3 mm.

Die Erklärung dieser Erscheinung könnte darin gesucht werden, daß der Schlüsselkontakt nicht plötzlich zustande kommt, aber die Ungleichmäßigkeiten der Kurven, welche davon die notwendige Folge sein müßten, fehlen ganz. Wahrscheinlicher kommt mir der Einfluß der Kapazität der Hauptleitung vor, weil diese einen induktionslosen Rheostaten von 100000 Ohm enthielt. Jedenfalls zeigen die Kurven die außergewöhnliche Genauigkeit, womit die Beobachtungen mit dem Saitengalvanometer stattfinden können.

Jetzt mögen noch einige Einzelheiten erwähnt werden, die sich auf die sämtlichen fünf oben genannten Photogramme Taf. III, Figg. 1—5 beziehen.

Um das Saitenbild auf alle Stellen des Gesichtsfeldes gleich scharf zu erhalten, muß sich die Saite in einer flachen, senkrecht auf der optischen Achse des Projektionsmikroskopes

stehenden Ebene bewegen. Eine Verschiebung der Saite von $0,5 \mu$ in der Richtung dieser optischen Achse genügt, um bei der von uns angewendeten Vergrößerung die Schärfe des Bildes merklich zu beeinträchtigen. Die Photogramme zeigen, daß diese Verschiebung nicht stattfindet. Man beachte weiter die große Konstanz des Nullpunktes und die Gleichheit der Ausschläge. Die Beobachtung mit unbewaffnetem Auge oder mit der Lupe hebt diese Eigenschaften nicht genügend hervor. Vielleicht daß eine Ortsbestimmung der Kurve mittels des Mikroskopes — ungefähr nach der in der Astronomie benutzten Methode in Himmelfotogrammen den Ort der Gestirne genau kennen zu lernen — zu schärferen Ergebnissen führen würde. Aber für die gewöhnlichen, am meisten gebräuchlichen Zwecke wären solche Messungen wohl zu weitläufig.

Für die praktische Anwendung des Werkzeuges wird es unter vielen Umständen, besonders bei elektro-physiologischen Messungen von Bedeutung sein, daß es möglich ist, dem Instrumente genau eine im voraus bestimmte Empfindlichkeit zu erteilen. Schon mit unbewaffnetem Auge kann an nahezu allen Figuren beobachtet werden, daß dies mit weniger als $0,1 \text{ mm}$ Abweichung gelingt, was für Ausschläge von 40 und 30 mm einen geringeren Fehler als 2,5 oder 3 promille bedeutet. Nur in Fig. 5 sieht man ein merkliches Defizit von ungefähr $0,1 \text{ mm}$, das jedoch auch mit etwas größerer Sorge hätte vermieden werden können.

Es braucht kaum erwähnt zu werden, daß das Galvanometer für Änderungen im magnetischen Felde der Umgebung unempfindlich ist. Ferner haben weder Erschütterungen des Bodens noch Luftströmungen großen Einfluß auf dasselbe. Wir haben keine Juliussche Aufhängung¹⁾ und auch nicht die Methode vom Schwimmen auf Quecksilber²⁾ angewendet. Das Instrument steht auf demselben steinernen Pfeiler, auf welchem eine große Blétscheibe mit Speichen durch einen Elektromotor schnell herumgedreht wird. Dieser Elektromotor steht nur einige Zentimeter vom Galvanometer entfernt, während ein zweiter ähnliche Motor, der mit einem

1) W. H. Julius, Wied. Ann. 56. p. 151. 1895.

2) W. Einthoven, Wied. Ann. 56. p. 161. 1895.

schweren Schwungrade verbunden ist und die Bewegung der photographischen Platte bewirkt, etwas weiter entfernt auf demselben Pfeiler befestigt ist. Nichtsdestoweniger merkt man in den Photogrammen keine Spur des Einflusses von mechanischen Erschütterungen.

Die Normalempfindlichkeit des Galvanometers kann aus Photogrammen berechnet werden, die bei stark oszillierender Saite angefertigt worden sind. Bei einer Saitenspannung, wobei ein Ausschlag von $a = 1$ mm durch einen Strom von $J = 10^{-7}$ Amp. hervorgerufen wird, findet eine ganze Schwingung $\sim$ in $t = 0,004$ Sek. statt. Der Ausschlag ist bei einer Vergrößerung $v = 660$ gemessen, während der Widerstand w der Saite gleich 10000 Ohm ist. Nach Formel (5) wird hieraus die Normalempfindlichkeit auf $9,5 \times 10^5$ berechnet, oder, wenn man für $\sqrt{w}$ besser $w^{2/5}$ setzt, auf

$$2,38 \times 10^6.$$

Zum Vergleich mag das hochempfindliche astatische Panzer-galvanometer mit leichtem Magnetgehänge von du Bois und Rubens¹⁾ erwähnt werden. Der von den Autoren selbst nach Formel (1) berechnete Betrag für die Normalempfindlichkeit ihres Instrumentes ist 1000. Weil sie einen Spiegel mit einem Radius $r = 1,5$ mm anwenden, muß diese Zahl jedoch nach Formel (2) bis auf 1500 vergrößert werden.

Schließlich erinnern wir daran, daß man den Quarzfaden im Galvanometer durch einen Platin- oder Phosphorbronze-draht, dessen Widerstand sehr viel geringer ist, ersetzen kann. Bei der Anwendung einer größeren Saite mit geringem Widerstande ist das Galvanometer auch noch brauchbar, obgleich bemerkt werden muß, daß es nur dann zu seinem vollen Rechte kommt, wenn die Saite dünn ist und der innere Widerstand groß sein darf. Der oben beschriebene Quarzfaden von 10000 Ohm Widerstand kann noch mit einem merklichen Ausschlag auf einen Thermostrom reagieren, dessen elektromotorische Kraft 10^{-8} Volt beträgt.

1) H. du Bois u. H. Rubens, l. c.