



# ARCHIV

FÜR DIE GESAMMTE

# PHYSIOLOGIE

DES MENSCHEN UND DER THIERE.

HERAUSGEGEBEN

VON

**DR. E. F. W. PFLÜGER,**

ORD. ÖFFENTL. PROFESSOR DER PHYSIOLOGIE AN DER UNIVERSITÄT  
UND DIRECTOR DES PHYSIOLOGISCHEN INSTITUTES ZU BONN.

**BAND HUNDERT UND DREISSIG.**

FÜNFTES UND SECHSTES HEFT.

MIT 1 TAFEL UND 27 TEXTFIGUREN.

**BONN, 1909.**

VERLAG VON MARTIN HAGER.

**Ausgegeben am 25. November 1909.**

Preis: im Abonnement Mk. 5.40, einzeln Mk. 6.40.

# Inhalt.

	Seite
Die Atembewegungen des Frosches und ihre Beeinflussung durch die nervösen Zentren und durch das Labyrinth. Von T. Graham Brown. (Hierzu Tafel I.) (Aus dem physiologischen Institut der Universität Strassburg) . . . . .	193
Zur Regelung der Bewegungen durch das Zentralnervensystem. I. Mitteilung. Von R. Magnus (Utrecht). (Mit 10 Textfiguren.) (Aus dem physiologischen Institut der Universität Liverpool) . . . . .	219
Zur Regelung der Bewegungen durch das Zentralnervensystem. II. Mitteilung. Von R. Magnus. (Mit 6 Textfiguren.) (Aus dem pharmakologischen Institut der Reichsuniversität Utrecht) . . . . .	253
Diasklerale Farbenperimetrie. Von Dr. Robert Stigler, Assistent am physiologischen Institut der Universität Wien. (Mit 1 Textfigur) . . . . .	270
Die Konstruktion des Saitengalvanometers. Von W. Einthoven. (Mit 10 Textfiguren.) (Aus dem physiologischen Laboratorium der Universität Leyden) . . . . .	287
Erklärung von Karl Grube . . . . .	322
Antwort auf Dr. Grube's „Erklärung“. Von Eduard Pflüger. (Physiologisches Laboratorium in Bonn) . . .	325
Berichtigung zu der Abhandlung „Untersuchungen über indirekte Muskelreizung durch abgebrochene Kondensatorentladungen“ (dies Archiv Bd. 127 S. 172). Von L. Hermann . . .	328

---

## Die Herren Mitarbeiter

erhalten pro Druckbogen 30 M. Honorar  
und 40 Sonderabzüge gratis.

Die zahlreichen mir zugehenden, in das Deutsche übersetzten Abhandlungen der Ausländer kann ich unmöglich, wie fortwährend gewünscht wird, umarbeiten, um die sprachlich unmöglichen Ausdrücke zu verbessern. Denn der Sinn der selbst in fehlerfreiem Deutsch geschriebenen medicinischen Abhandlungen ist oft nur schwer zu enträthseln.

Zusendungen für die Redaction sind, um Verwechslungen zu vermeiden, zu adressiren:

**Herrn Professor Dr. E. Pflüger,**  
**Bonn, Nussallee 172.**

(Aus dem physiologischen Laboratorium der Universität Leyden.)

## Die Konstruktion des Saitengalvanometers.

Von

**W. Einthoven.**

(Mit 10 Textfiguren.)

### Inhaltsverzeichnis.

	Seite
1. Allgemeine Bemerkungen . . . . .	287
2. Form und Dimensionen des Elektromagnets . . . . .	290
3. Feldstärke . . . . .	294
4. Der Einfluss von Temperaturveränderungen . . . . .	301
5. Die Spannvorrichtung . . . . .	305
6. Der Einfluss von Erschütterungen des Bodens . . . . .	307
7. Das optische System . . . . .	308
8. Die Zentrierung der Saite . . . . .	314
9. Verschiedene Modelle . . . . .	318

### 1. Allgemeine Bemerkungen.

Obleich das Prinzip und die Theorie des Saitengalvanometers schon vor einiger Zeit auseinandergesetzt worden sind<sup>1)</sup>, und die Gelegenheit sich auch schon dargeboten hat, verschiedene mit demselben erzielte Resultate<sup>2)</sup> zu veröffentlichen, ist eine ausführliche

1) Vgl. verschiedene Aufsätze von der Hand des Verfassers in den Annalen der Physik Bd. 12, 14, 16, 21 und in „Onderzoekingen physiol. Laboratorium Leyden“. Vgl. auch eine kürzlich erschienene Habilitationsschrift von Dr. Paul Hertz, Zur Theorie des Saitengalvanometers.

2) Vgl. verschiedene Aufsätze des Verfassers und seiner Mitarbeiter in Pflüger's Arch. f. d. ges. Physiol., Arch. internat. de Physiol., Quarterly Journ. of exper. Physiol. und „Onderzoekingen physiol. Lab. Leyden“. Weiter können hier noch die Untersuchungen auf physikalischem und astronomischem Gebiete erwähnt werden von Ebert, Wulf, Zemplèn, die Fernphotographie von Korn, die Anwendung bei der drahtlosen Telegraphie, die Untersuchungen auf physiologischem und medizinischem Gebiete von Brücke, Cremer, Dittler, Garten, H. E. Hering, Hoffmaun, Judin, Kahn, Kraus, Lewis, Keith Lucas, de Meyer,

Beschreibung des Apparates selbst bis jetzt noch unterblieben. Erst mussten einige Verbesserungen angebracht und geprüft werden. Auch jetzt ist das Instrument noch weit von der Vollkommenheit entfernt; da es sich aber bereits für verschiedene Untersuchungen als sehr brauchbar erwiesen hat, darf die detaillierte Beschreibung nicht länger auf sich warten lassen.

Die Konstruktion ist im Prinzip sehr einfach: ein dünner Faden muss wie eine Saite auf zweckmässige Weise zwischen den Polen eines Elektromagnets ausgespannt werden.

Merkwürdigerweise bestanden schon früher Instrumente, die zwar einen anderen Zweck hatten, die aber doch der Hauptsache nach auf dieselbe Weise zusammengesetzt waren. Ich erinnere hier erstens an den Empfangsapparat für die Kabeltelegraphie, den „Recepteur“ von Ader. Ader hat nicht die Absicht gehabt, ein elektrisches Messinstrument anzufertigen. Das Wort „Galvanometer“ findet sich sogar nicht in der ausführlichsten Beschreibung, die von dem Apparate besteht, und mit einer Anzahl von Figuren versehen unter dem Titel „Télégraphie sous-marine“ von Rossel publiziert ist<sup>1)</sup>.

Wahrscheinlich hat Ader gemeint, dass er, indem er einen einzigen Faden in einem magnetischen Feld ausspannte, die Empfindlichkeit aufopferte, welche bei Messinstrumenten vorhanden ist, worin eine viele Windungen enthaltende Spule in einem solchen Felde aufgehängt ist. Die Schnelligkeit des Ausschlages musste für ihn Hauptsache sein, weil man bei der Telegraphie in Vergleichung mit den schwächsten messbaren Strömen, über ziemlich starke Ströme verfügt.

Ich selbst habe versucht, ein für wissenschaftliche Untersuchungen geeignetes, empfindliches Messinstrument herzustellen und bin dabei von dem in der Physiologie vielfach gebrauchten Galvanometer von Deprez-d'Arsonval ausgegangen. Bei meinen Berechnungen erhielt ich das überraschende Resultat, dass dieses Galvanometer

---

Nicolai, Noyons, Piper, Pribram, Rothberger, Wandel, Wertheim Salomonson, Samojloff, Strubell und vermutlich noch von vielen anderen, deren Arbeiten mir in diesem Momente nicht bekannt sind. — Weiter erinnern wir daran, dass das Saitengalvanometer die Konstruktion von neuen Instrumenten veranlasst hat, namentlich von Elektrometern, von welchen einige auch als Elektrodynamometer und als Wattmeter gebraucht werden können.

1) L'Éclairage électrique t. 12, 3<sup>e</sup> trim. 1897 Nr. 31 p. 194 und Nr. 33 p. 295.

eine um so grössere Normalempfindlichkeit bekommt, je geringer die Anzahl der Windungen der beweglichen Spule genommen wird. Eine Spule, die nur aus einer einzigen Windung eines sehr dünnen Drahtes besteht, ist die empfindlichste. Anstatt dieser einzigen Windung nahm ich eine gespannte Saite.

Meine Berechnungen waren fertig, als ich den Apparat von Ader aus den Comptes rendus<sup>1)</sup> kennen lernte. Das zufolge eines anderen Gedankenganges zu einem anderen Zwecke konstruierte Instrument weist in einigen Hinsichten eine grosse Übereinstimmung mit dem Saitengalvanometer, in anderen Hinsichten aber selbstverständlich auch ziemlich grosse Unterschiede von demselben auf. Es sei hier nur erwähnt, dass im Kabelempfänger von Ader der gespannte Draht nicht weniger als 75 cm lang und in seiner Mitte mittels eines Federkiesels verdickt ist.

Betrachtet man den Kabelempfänger Aders als ein elektrisches Messinstrument, so ist es ungefähr 100 000 mal unempfindlicher als das Saitengalvanometer.

In zweiter Linie<sup>2)</sup> bespreche ich einen Apparat von Prof. Ewing. Dieser konstruierte schon einige Jahre vor Herrn Ader ein Instrument, wobei ein Draht zwischen den Polen eines Magnets ausgespannt ist. Es wird „Apparat zum Zeichnen von Magnetisierungskurven“ genannt<sup>3)</sup> und enthält zwei Elektromagnete mit je einem gespannten Draht. Ein um zwei Achsen beweglich aufgestellter Spiegel ist derart mit den Drähten verbunden, dass er durch den einen Draht um die horizontale, durch den anderen um die vertikale Achse gedreht wird. Der Magnetisierungsstrom des einen Elektro-

1) Sur un nouvel appareil enregistreur pour câbles sous-marins. C. R. de l'Acad. des Sc. vol. 124 p. 1440. 1897. Hierin wird die Empfindlichkeit des Instrumentes angegeben durch die Mitteilung, dass es pro Minute 600 Zeichen, die durch das Kabel zwischen Brest und St. Pierre, und 1600 Zeichen, die durch die Kabel zwischen Marseille und Algier geschickt wurden, wiedergeben konnte.

2) Herr Professor Cremer aus München war so liebenswürdig, mich auf die Arbeit von Ewing aufmerksam zu machen. Den Kabelempfänger von Ader hatte ich selbst schon in meinen ersten Abhandlungen über das Saitengalvanometer erwähnt, vgl. Arch. Néerl, t. 6 p. 625. 1901, und Annalen der Physik Bd. 12 S. 1059. 1903. Der Apparat von Ewing war mir aber damals noch unbekannt.

3) Ewing, Magnetische Induktion. Springer, Berlin 1892. (Deutsch.) Vgl. auch Elektrotechn. Zeitschr. 1892, 13. Jahrg., S. 516 u. 712.

E. Pflüger, Archiv für Physiologie. Bd. 130.

magnets fließt durch den gespannten Draht des anderen, wobei natürlich ziemlich starke Ströme benutzt werden. Die Aufzeichnung der Kurven geschieht photographisch.

Der Apparat, der also zwei Teile enthält, die jeder für sich nach demselben Prinzip wie das Saitengalvanometer konstruiert sind, wurde schon 1892 beschrieben.

## 2. Form und Dimensionen des Elektromagnets.

Die Form des Magnets bestimmt die äussere Gestalt des ganzen Instruments. Weil die Normalempfindlichkeit des Galvanometers proportional ist<sup>1)</sup> der zwischen den Polen des Magnets vorhandenen Feldstärke, muss diese letztere im allgemeinen so gross wie möglich gemacht werden.

In anderen Galvanometern, die auf demselben Prinzip eines beweglichen Stromträgers in einem stillstehenden magnetischen Felde beruhen, namentlich im Galvanometer von Deprez-d'Arsonval, darf man eine gewisse Feldstärke nicht überschreiten. Denn eine Vergrösserung der Feldstärke hat eine Zunahme der Dämpfung zur Folge, und zwar wächst die Dämpfung wie das Quadrat der Feldstärke. Im Galvanometer von Deprez-d'Arsonval wird bei einer geringen Feldstärke schon eine bedeutende Dämpfung der Ausschläge erzielt, während das Instrument bei allmählicher Zunahme der Feldstärke bald eine so enorme Dämpfung aufweisen würde, dass es für gewöhnliche Messungen nicht mehr gebraucht werden könnte.

Dieses Verhältnis kommt beim Saitengalvanometer praktisch so gut wie niemals vor. Sieht man von der Messung der Thermostrome ab<sup>2)</sup>, so braucht man sich bei dem Bestreben, ein Maximum der Feldstärke zu erzielen, nicht durch den Umstand abhalten zu lassen, dass man dabei zu gleicher Zeit die Dämpfung vergrössert. Im Gegenteil werden in den meisten Fällen die Messungen, die man mittels des Saitengalvanometers verrichtet, durch das Vorhandensein einer kräftigen elektromagnetischen Dämpfung erleichtert.

1) Vgl. die theoretischen Auseinandersetzungen a. a. O.

2) Bei der Messung von Thermostromen und im allgemeinen von Strömen in einem Kreise, dessen Widerstand gering ist, kommen einige der guten Eigenschaften des Saitengalvanometers am wenigsten zu ihrem Recht. Vgl. Annalen der Physik Bd. 21 S. 689. 1906.

Ein Maximum der Feldstärke in einem zweckentsprechenden Raum kann nur mittelst eines schweren und kostspieligen Elektromagnets erreicht werden. Für Messungen, die eine nicht sehr grosse

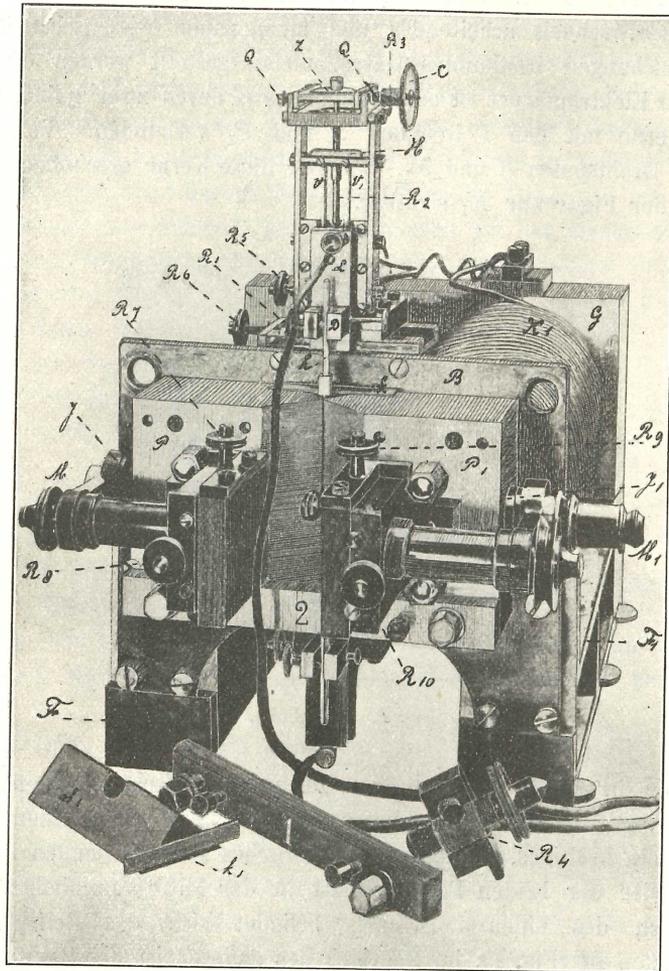


Fig. 1. Saitengalvanometer. Ursprüngliches Leydener Modell.

Empfindlichkeit erfordern, genügt jedoch selbstverständlich auch ein kleiner Elektro- oder ein permanenter Magnet. Das Modell des Instrumentes wird durch die Absichten des Forschers bestimmt. Wir werden am Schluss dieses Aufsatzes verschiedene jetzt gebrauchte Modelle kurz erwähnen, geben aber hier die Beschreibung des ur-

sprünglichen Exemplars, das im physiologischen Laboratorium zu Leyden angefertigt worden ist.

An der Hand dieses, in Fig. 1 abgebildeten Exemplars wird es leicht sein, die Anforderungen zu bestimmen, die an ein empfindliches, schnell arbeitendes und zu genauen wissenschaftlichen Untersuchungen bestimmtes Galvanometer gestellt werden dürfen.

Im Elektromagnet ist die Grundplatte  $G$  durch zwei zylindrische Eisenkerne mit den Polschuhen  $P$  und  $P_1$  verbunden. Von den beiden Drahtspulen  $K$  und  $K_1$ , die über diese Kerne geschoben sind, ist in der Figur nur  $K_1$  sichtbar.

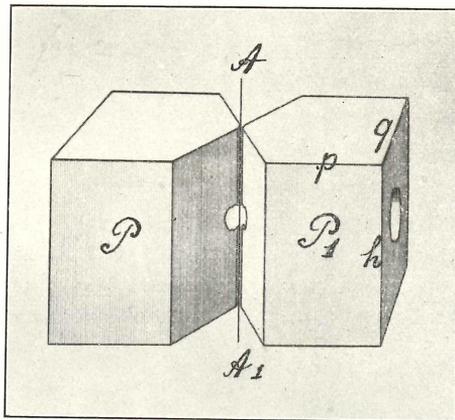


Fig. 2. Polschuhe.

Die in Fig. 2 schematisch gezeichneten Polschuhe haben eine Höhe von 12,5 cm und schliessen einen spaltförmigen Raum ein, worin ein kräftiges, homogenes magnetisches Feld vorhanden ist.

Jeder der beiden Polschuhe ist in der Mitte durchbohrt. Im Bohrloch des einen Polschuhes befindet sich das Belichtungsmikroskop  $M$  (Fig. 1), im Bohrloch des anderen ist das Projektionsmikroskop  $M_1$  angebracht, während die Saite  $AA_1$  (Fig. 2) in der Mitte des spaltförmigen Raumes zwischen den beiden Schuhen ausgespannt ist.

Wir betrachten diesen Raum jetzt näher. Er ist ein rechtwinkliges Parallelepiped, dessen Höhe  $h$  der Höhe der Polschuhe gleich ist, während die Seiten der Grundfläche als  $l$  und  $b$  in Fig. 3 abgebildet sind.

Dieser Raum muss sorgfältig gearbeitet sein, und namentlich müssen die Kraftlinien vollkommen parallel laufen der optischen Achse des Projektionsmikroskops, weil sonst das Saitenbild bei einem Ausschlage unscharf werden würde. Weiter ist es notwendig, dass die einmal am Magnete befestigten Polschuhe sich gegenseitig nicht mehr verschieben. Weil sie, sobald der Magnetisierungsstrom geschlossen wird, einander mit einer Kraft anziehen, die auf mehr als 500 kg berechnet werden kann, hat man besondere Vorkehrungen zu treffen, um zu verhindern, dass sie sich einander nähern.

Im oben abgebildeten Exemplar sind die Polschuhe erstens an den Eisenkernen befestigt, die selbst wieder mit der ausserordentlich schweren Grundplatte *G* verbunden sind. Zweitens sind sie an die Bronzeplatte *B* (Fig. 1) festgeschraubt, und schliesslich werden sie noch durch zwei dicke Bronzestäbe festgehalten. Von diesen ist der obere *1* auf dem Tisch liegend abgebildet, während man den unteren *2* in der Figur an seinem Platze findet.

Bei einem wenig solid konstruierten Saitengalvanometer kann es vorkommen, dass die Polschuhe, sobald der Magnetstrom geschlossen wird, sich rhythmisch nähern und entfernen. Es braucht wohl nicht erwähnt zu werden, dass ein derartiges Instrument zu genauen Messungen nicht geeignet ist.

Welche Abmessungen muss man an *l* und *b* (Fig. 3) geben? In dem oben abgebildeten Exemplar ist  $l = b = 2$  mm; aber es verdient Erwägung, ob es vielleicht vorteilhafter ist, *b* bis auf z. B. 4 mm zu vergrössern, während *l* dabei unverändert bleiben kann. Der Vorteil einer Vergrösserung von *b* besteht in dem Umstande, dass man den Quarzfaden leichter zentriert, während man auch bei der Konstruktion leichter der Anforderung genügen kann, dass das Feld homogen und die Kraftlinien vollkommen parallel der optischen Achse beider Mikroskope sind.

Die Nachteile sind nicht gross: Erstens müssen die Eisenkerne etwas dicker gemacht werden, um mehr Kraftlinien passieren zu lassen, und zweitens wird der Raum, worin der Quarzfaden frei beweglich ist, grösser, wodurch letzterer mehr von Luftströmen beeinflusst werden kann.

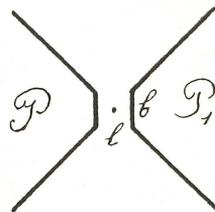


Fig. 3. Polschuhe.

Ob die Vorteile die Nachteile aufwiegen, wage ich nicht zu entscheiden. Der Leydener Apparat machte anfänglich Schwierigkeiten, aber nach sorgfältigerer Ausführung des Instrumentes haben die Abmessungen  $l = b = 2$  mm den Anforderungen vollkommen entsprochen.

Um den Raum, worin sich der Quarzfaden befindet, gegen Luftströmungen zu schützen, werden die Messingschieber  $S$  und  $S_1$  gegen die Polschuhe angeschoben. Der Schieber  $S$  befindet sich in Fig. 1 an seiner Stelle zwischen der Bronzeplatte  $B$  und den Polschuhen. Man sieht ihn darum nur von der Deckfläche. Der Schieber  $S_1$  ist vom Apparat abgenommen worden und liegt auf dem Tische vor dem Elektromagnet. Beide Stücke müssen mit ihren Seitenflächen genau an die schrägen Flächen der Polschuhe anschliessen. Sie hängen an den Stäben  $k$  und  $k_1$  und werden mittels Keile — die man einerseits zwischen der Bronzeplatte  $B$  und dem Schieber  $S$ , andererseits zwischen den Bronzestäben  $1$  und  $2$  und dem Schieber  $S_1$  anbringt — an die Polschuhe festgeklemmt.

Zum weiteren Schutz der Saite gegen Luftströmungen wird an den Stellen, die in Fig. 1 mit  $J$  und  $J_1$  angedeutet sind, Jozepapier zwischen das Mikroskop und den Polschuh gebracht. Und schliesslich wird noch eine teilweise aus Holz, teilweise aus Aluminium angefertigte grosse Stülpe über den ganzen Apparat gesetzt. Diese letztere bietet zugleich die Gelegenheit dar, die Saite frei von Staub und trocken zu erhalten.

Jetzt mögen noch einige Angaben über die Dimensionen des Elektromagnets folgen.

Die Eisenkerne sind 31 cm lang und haben einen Durchmesser von 8 cm, während die schwere Grundplatte 29,5 cm lang, 14,8 cm hoch und 6 cm dick ist. In den Polschuhen, deren Gestalt in obestehenden Figuren genügend sichtbar ist, ist  $h = 12,5$  cm,  $p = 8$  cm und  $q = 6$  cm.

Die über die Eisenkerne geschobenen Spulen haben zusammen 1843 Windungen von isoliertem Kupferdraht. Der Durchmesser des Kupfers ist 2,2 mm, und der Widerstand der in Serie geschalteten Spulen beträgt 2,6 Ohm.

### 3. Feldstärke.

Die Feldstärke zwischen den Polen ist auf folgende Weise in absolutem Maasse gemessen worden. Der Elektromagnet wurde gedreht, so dass er auf seiner Grundplatte ruhte, während die Spalte

zwischen den Polschuhen horizontal gerichtet war. Jetzt wurde ein Kupferdraht von 4 cm Länge, durch den ein Strom von 1 Amp. floss, in die Spalte gehängt, während die Kraft, welche den Draht nach unten zog, mittels einer Wage gemessen wurde.

Beträgt diese Kraft  $p$  g, die Länge des Kupferdrahtes  $l$  cm und der durch den Draht fließende Strom  $J$  Amp., so ist die Feldstärke

$$H = \frac{9813 p}{J l} \text{ Gauss} \dots \dots \dots (1).$$

Bei unseren Messungen war  $J = 1$  Amp. und  $l = 4$  cm, so dass

$$H = 2453 p \text{ Gauss.}$$

In untenstehender Tabelle 1 findet man für Magnetisierungsströme von verschiedener Stärke die beobachteten Werte von  $p$  und die daraus berechneten Werte von  $H$  eingetragen.

Tabelle 1.

Magnetisierungsstrom	Ponderomotor. Kraft	Feldstärke $H$
2 Amp.	7,6 g	18 600 Gauss
4 "	9,3 "	22 800 "
6 "	10,0 "	24 500 "
10 "	10,75 "	26 400 "

Diese Messungen beziehen sich auf diejenigen Teile des spaltförmigen Raumes, welche die grösste Feldstärke aufweisen. Wegen des Vorhandenseins des Bohrloches erwies sich die mittlere, über die ganze Spaltlänge berechnete Feldstärke ungefähr um 10% geringer; aber wenn wir zur Berechnung der Kraft, womit ein Ausschlag stattfindet, einen für die ganze Länge gleichen Mittelwert von  $H$  in Rechnung bringen wollen<sup>1)</sup>, so darf für diesen nicht ohne weiteres der oben genannte Mittelwert genommen werden, weil ja die Stellen der geringsten Feldstärke sich beim Bohrloche in der Mitte der Spalte befinden, wo die Kraftlinien gerade den grössten Einfluss auf die Bewegung der Saite ausüben.

Sehen wir vom absoluten Betrage der mittleren Feldstärke ab, und betrachten wir ausschliesslich die Verhältnisse dieses Wertes bei verschieden starken Magnetisierungsströmen, so können wir eine ganz einfache und zugleich doch sehr genaue Methode anwenden.

1) Vgl. Weitere Mitteilungen usw. Annalen der Physik Bd. 21 S. 506. 1906. Hier ist auch noch eine andere Methode angegeben, nach welcher  $H$  gemessen worden ist.

Die Saite wird im Galvanometer unter konstanter Spannung gehalten, und ihr Ausschlag für eine bestimmte Stromstärke wird bei verschieden starken Magnetisierungsströmen gemessen<sup>1)</sup>. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in untenstehender Tabelle 2 vereinigt und in Fig. 4 graphisch dargestellt. Hierbei ist für 9 Amp. Magnetisierungsstrom der Wert von  $H = 26\,000$  Gauss angenommen. Letzteres gründet sich auf die in Tabelle 1 erwähnten Werte.

Tabelle 2.

Magnetisierungsstrom	Ausschlag der Saite für $10^{-5}$ Amp.	Verhältnis der Feldstärken
0,9 Amp.	20,5 Skalenteile	10 700 Gauss
1,35 "	29,0 "	15 100 "
1,8 "	36,37 "	18 950 "
2,7 "	43,12 "	22 500 "
4,5 "	47,0 "	24 500 "
9,0 "	49,87 "	<b>26 000</b> "
2,7 "	43,25 "	22 500 "
0,9 "	20,5 "	10 700 "
0 "	1,5 "	782 "

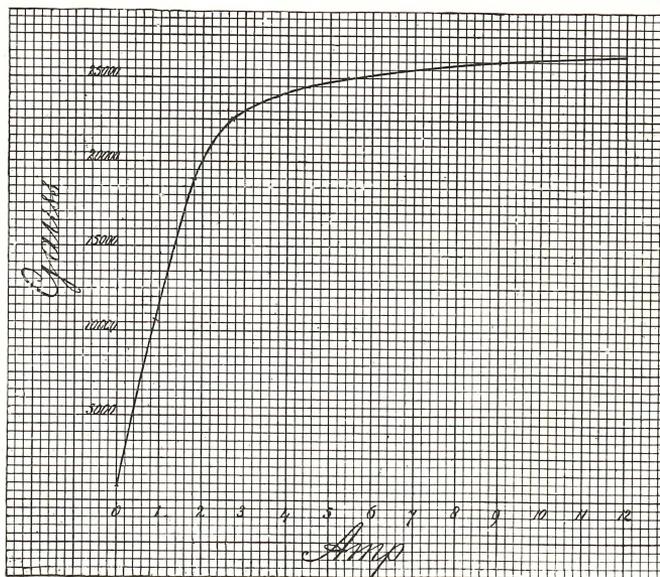


Fig. 4. Verhältnis zwischen Magnetisierungsstrom und Feldstärke.

<sup>1)</sup> Bei diesen Versuchen wird die Saite stark gespannt, so dass ihre Ausschläge bei gleich bleibendem Magnetisierungsstrom vollkommen proportional den durch die Saite gesandten Stromstärken sind.

Aus der Form der Fig. 4 zeigt sich, dass schon bei einem relativ schwachen Magnetisierungsstrom — von z. B. 3 oder 4 Amp. — das magnetische Feld fast bis auf das praktisch erreichbare Maximum gesteigert wird. Hieraus geht hervor, dass schon bei diesen schwachen Strömen der magnetische Widerstand des Eisens sich stark geltend macht.

An welchen Stellen im Eisen besteht der grösste magnetische Widerstand?

Wünscht man den Elektromagnet auf zweckentsprechende Weise zu konstruieren, so ist es von Wichtigkeit, obenstehende Frage zu beantworten.

Es kommen a priori zwei Stellen in Betracht, wo der magnetische Widerstand des Eisens einen grossen Wert erreichen könnte: 1. in den Kernen und zwar namentlich in denjenigen Teilen derselben, die nahe an der Grundplatte liegen; 2. in den Polschuhen und zwar namentlich dort, wo sie sich einander nähern.

Die Grundplatte hat einen so grossen Querschnitt, dass ihr magnetischer Widerstand wohl in allen Fällen vernachlässigt werden darf.

Die gesamte Kraftlinienzahl, die durch die Spalte zwischen den Polschuhen fliesst, wird berechnet nach der Formel

$$\varphi = \frac{4 \pi \times N_s J}{10 R} \dots \dots \dots (2),$$

worin  $N_s$  die Windungszahl,  $J$  die Stromstärke und  $R$  den Widerstand des geschlossenen, die Spalte enthaltenden, unverzweigten magnetischen Kreises bedeutet.

Die Feldstärke in der Spalte ist

$$H = \frac{\varphi}{S} \dots \dots \dots (3),$$

woraus in Verbindung mit Formel (2) hervorgeht, dass

$$H = \frac{1,26 N_s J}{R S} \dots \dots \dots (4).$$

Um die Ampèrezahl des Magnetisierungsstromes für eine gegebene Feldstärke in der Spalte zu berechnen, schreiben wir Formel (4) in der Form

$$J = \frac{R S}{1,26 N_s} \times H \dots \dots \dots (5).$$

Wenn man die Feldstärke zwischen den Polschuhen nur bis auf einen geringen Betrag, z. B. auf 10 000 Gauss steigert, darf bei der

Berechnung des Widerstandes  $R$  von dem magnetischen Widerstande des Eisens wohl abgesehen werden. Man braucht dann nur den Widerstand in der Spalte zwischen den Polschuhen in Rechnung zu bringen. Dieser wird ausgedrückt durch die Formel

$$R_1 = \frac{l}{\mu S},$$

worin  $R_1$  den erwähnten Widerstand,  $l$  die Distanz zwischen den Polschuhen,  $\mu$  die Permeabilität und  $S$  die Grösse der Polfläche bedeutet.

Tragen wir in Formel (5) für  $R$  den Wert von  $R_1$ , also  $\frac{l}{\mu S}$  ein, so bekommen wir

$$J = \frac{l}{1,26 N_s \mu} \times H.$$

Hierin ist  $l = 0,2$ ,  $N_s = 1843$  und  $\mu = 1$ , woraus berechnet wird, dass

$$J = 8,6 \times 10^{-5} H.$$

Für eine Feldstärke in der Spalte von  $H = 10\,000$  Gauss ist also der erforderte Magnetisierungsstrom  $J = 0,86$  Amp. Dieser durch Berechnung gefundene Betrag stimmt sehr gut zu den Messungsergebnissen, die in den Tabellen 1 und 2 angegeben und in Fig. 4 graphisch dargestellt sind.

Obenstehende Berechnung, die dazu dienen kann, die Messungen der Feldstärke zu kontrollieren, welche nach den beiden oben beschriebenen Methoden ausgeführt worden sind, ist jedoch nur für relativ geringe Werte von  $H$  gültig, und zwar solange der magnetische Widerstand des Eisens vernachlässigt werden darf.

Dass letzterer tatsächlich für  $H = 10\,000$  nicht in Betracht gezogen zu werden braucht, stimmt zu der Form der Kurve von Fig. 4 und kann weiter auch leicht bewiesen werden, indem wir die gesamte Kraftlinienzahl der Grundplatte berechnen. Diese ist

$$\varphi_1 = v \varphi \dots \dots \dots (6),$$

worin  $\varphi_1$  die Kraftlinienzahl der Grundplatte,  $\varphi$  die Kraftlinienzahl in der Spalte und  $v$  den Streukoeffizient bedeutet.

Solange die Feldstärke gering ist, bietet die Berechnung von  $v$  keine grosse Schwierigkeiten. Wir dürfen schreiben:

$$v = \frac{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}{\frac{1}{R_1}} \dots \dots \dots (7),$$

worin  $R_1$  den magnetischen Widerstand der Luft in der Spalte,  $R_2$  den entsprechenden Widerstand zwischen den übrigen Flächen der Polschuhe und  $R_3$  den entsprechenden Widerstand zwischen den zylindrischen Flächen der Eisenkerne bedeutet.

Wie oben schon erwähnt wurde, ist

$$R_1 = \frac{l}{\mu S}$$

Hierin ist  $l = 0,2$  cm,  $\mu = 1$  und  $S = 2,5$  qcm, woraus berechnet wird, dass  $R_1 = 0,08$ .

Nach einer annähernden Berechnung wird für  $R_2$  0,0125 und für  $R_3$  0,023 gefunden.

Nach Formel (7) findet man dann  $v = 10,9$ . Setzt man  $H = 10\,000$ , so ist  $\varphi = HS = 25\,000$ , und der Induktionsfluss in der Grundplatte nach Formel (6)  $\varphi_1 = 272\,500$  Weber.

Die Eisenkerne haben einen Querschnitt von 50,27 qcm. Ihre Induktion in der Nähe der Grundplatte wird also berechnet auf

$$B_1 = \frac{272\,500}{50,27} = 5430.$$

Bei dieser geringen Induktion ist die Permeabilität von weichem Eisen fast 3000 mal grösser als von Luft, woraus hervorgeht, dass verglichen mit dem magnetischen Widerstande der Spalte derjenige der Kerne nur klein ist.

Was für die Kerne gilt, trifft auch für die Polschuhe zu. Der grösste Teil jedes Polschubes hat einen Querschnitt, der den Querschnitt der Kerne übertrifft. Allein wo der Schuh in der Richtung nach der Spalte hin schmaler wird, muss ein kleinerer Querschnitt in Rechnung gebracht werden. Der kleinste Querschnitt des Schubes ist  $S = 2,5$  qcm. Hier ist das Maximum der Induktion, das jedoch niemals die Feldstärke in der Spalte übersteigt. Und bei einer Induktion von 10 000 ist der Wert von  $\mu$  im weichen Eisen doch noch 2000.

Das Bestreben, hohe Werte von  $H$  zu erzielen, wird, wie oben schon auseinandergesetzt wurde, durch die Reluktanz des Eisens erschwert. Für  $H = 10\,000$  spielt diese Reluktanz noch keine Rolle, für  $H = 20\,000$  fällt sie schon deutlich ins Gewicht, für  $H = 30\,000$  ist sie der entscheidende Faktor. Es darf hier daran erinnert werden, dass wir unter  $H$  immer die Feldstärke verstehen, die bei unserem Elektromagnet in der Spalte zwischen den Polschuhen vorhanden ist.

Wir müssen jetzt untersuchen, an welcher Stelle im Apparat das Eisen die grosse Reluktanz zeigt, welche uns verhindert, hohe

Werte von  $H$  zu erreichen. Zu diesem Zwecke versuchen wir  $H$  bis auf 26 000 Gauss zu steigern, während wir dabei die Kraftlinienzahl berechnen, welche durch die Grundplatte fließen würde, falls angenommen werden dürfte, dass die Reluktanz des Eisens klein wäre.

Durch diese Annahme wird die Berechnung des Induktionsflusses durch die Grundplatte bedeutend vereinfacht. Wurde oben für  $H = 10\,000$  Gauss der Betrag des Induktionsflusses  $= \varphi_1$  gefunden, so ist für  $H = 26\,000$  der Induktionsfluss  $\varphi_2 = 2,6 \varphi_1$ .

Auf dieselbe Weise wird für die Induktion in den Kernen in der Nähe der Grundplatte gefunden

$$B_2 = 2,6 B_1 = 14\,100.$$

Bei dieser Induktion ist die Permeabilität  $\mu$  des weichen Eisens noch ziemlich hoch, ungefähr 800, und hierdurch bleibt die Reluktanz der Kerne, obgleich dieselbe nicht vernachlässigt werden darf, doch immer kleiner als die der Spalte.

Obgleich die Annahme, auf welche sich diese Rechnung stützt, mit der Wirklichkeit im Widerspruch steht, kann obenstehende Betrachtung uns doch zeigen, dass man die Stelle der alles beherrschenden Reluktanz nicht in den Eisenkernen zu suchen hat. Sie muss also in den Polschuhen stecken, und zwar dort, wo dieselben sich einander nähern. Wo der Schuh seinen kleinsten Querschnitt hat, ist die Induktion gleich der Feldstärke der Spalte, in unserem Falle also  $= 26\,000$  Gauss, und bei dieser hohen Induktion wird die Permeabilität sehr klein, ungefähr  $= 5$ .

Durch die grosse Reluktanz der Polschuhe wird der Streuungskoeffizient  $v$  bedeutend vergrößert. Ausserdem muss in Betracht gezogen werden, dass wir bei der Berechnung der Reluktanz  $R_2$  zwischen den verschiedenen Flächen der Polschuhe als Medium die Luft angenommen haben, während in Wirklichkeit die Polschuhe noch gegenseitig durch eine Bronzeplatte, Bronzestäbe und Messingschieber verbunden sind. Die genannten Verbindungsstücke werden wohl nicht vollkommen frei von Eisen sein. Durch diesen Umstand erfährt der Streuungskoeffizient  $v$  aufs neue eine Vergrößerung mit der notwendigen Folge, dass bei einem Betrage von  $H = 26\,000$  die Induktion in den Kernen bedeutend höher steigen wird als der oben berechnete Betrag von 14 100. Und hieraus dürfen wir wohl den Schluss ziehen, dass es unzweckmässig sein würde, den Querschnitt der Eisenkerne zu verringern.

#### 4. Der Einfluss von Temperaturveränderungen.

Einer der Nachteile, die das Saitengalvanometer vielen weniger empfindlichen Messinstrumenten gegenüber zeigt, liegt in dem Einfluss, den eine eventuelle Temperaturveränderung auf die Empfindlichkeit des Instrumentes ausübt. Die Volt- und Ampèremesser aus dem Handel und auch die feineren Galvanometer nach dem Typus von Deprez-d'Arsonval zeigen eine Empfindlichkeit, die nur in geringem Maasse durch Temperaturveränderungen beeinflusst wird, und die man praktisch als jahrelang konstant betrachten darf.

Diese gute Eigenschaft ist beim Saitengalvanometer nicht vorhanden. Die Grösse eines Ausschlages für einen Strom von gegebener Stärke wird *ceteris paribus* durch die Spannung der Saite bestimmt, und hat das Material, woraus diese verfertigt ist, einen anderen Ausdehnungskoeffizienten als die Materialien des Elektromagnets, so wird bei einer Temperaturveränderung des ganzen Apparates die Saitenspannung verändert werden.

Bei weitem die besten Saiten bestehen aus versilberten Quarzfäden. Der Ausdehnungskoeffizient von verglastem Quarze ist  $0,4 \times 10^{-6}$ , während der entsprechende Wert für Eisen  $11 \times 10^{-6}$  und für Messing  $18 \times 10^{-6}$  beträgt<sup>1)</sup>. Der Quarzfaden erfährt also eine 30—40fach geringere Wärmeausdehnung als das Galvanometer im ganzen.

Dies hat zur Folge, dass bei einer Temperatursteigerung des Apparates die Saite stärker gespannt und also der Ausschlag für eine gegebene Stromstärke verringert wird.

Es darf hier kurz erwähnt werden, dass Platindrähte, die im allgemeinen weniger zweckmässige Saiten für das Galvanometer liefern, einen viel grösseren Ausdehnungskoeffizienten als Quarzfäden besitzen. Daher wird bei ihrem Gebrauch der Einfluss von Temperaturveränderungen, obgleich nicht ganz aufgehoben, doch im allgemeinen weniger störend sein. Der Ausdehnungskoeffizient von Platin<sup>2)</sup> ist  $8,9 \times 10^{-6}$ .

Um näher erklären zu können, auf welche Weise und in welchem Maasse Temperaturveränderungen die praktische Brauchbarkeit des Saitengalvanometers zu beeinträchtigen imstande sind, ist es wünschens-

1) Nach Kohlrausch, Lehrb. d. prakt. Physik, 10. Aufl., S. 622. 1905.

2) Vgl. Kohlrausch, a. a. O.

wert, vorher die Spannung<sup>1)</sup> der Saite zu erörtern. Diese ist umgekehrt proportional dem Ausschlage für eine gegebene Stromstärke.

Wenn der Quarzfaden stark gespannt und gedehnt ist, z. B. so, dass er 100 oder 200  $\mu$  länger geworden ist, wird eine weitere Dehnung von 1  $\mu$ , wie wohl selbstverständlich ist, die Spannung nur wenig vergrössern, d. h. die Empfindlichkeit relativ nur wenig verkleinern.

Wenn der Quarzfaden so sehr erschlafft ist, dass er stark gebogen herabhängt, wird ebenfalls eine Veränderung in der gegenseitigen Distanz der Befestigungsstellen einen relativ geringen Einfluss ausüben.

Wenn jedoch die Saite sich in einem solchen Zustande befindet, dass sie so gut wie ohne Torsion oder Spannung genau vertikal gestreckt ist, kann eine Vergrösserung der Distanz zwischen den Befestigungsstellen von 0,1  $\mu$  und sogar von einem noch bedeutend geringeren Betrag schon eine merkbare Verringerung der Empfindlichkeit erzeugen.

Man kann sich leicht eine Vorstellung von der Temperaturzunahme bilden, die das Galvanometer erfahren muss, um eine geringe, im voraus bestimmte Spannungszunahme der Saite zu verursachen.

Nennen wir die Länge der Saite  $l$  und den Unterschied zwischen dem Temperaturkoeffizienten des Quarzes einerseits und dem der übrigen Materialien des Galvanometers andererseits  $a$ , so ist für  $t$  Grad Temperaturzunahme die Dehnung  $V$  der Saite

$$V = l \times a t \quad \dots \dots \dots (8).$$

Die Dehnung  $V$  der Saite ist jener Teil der Längezunahme, der ausschliesslich durch die Spannungszunahme verursacht wird. Der andere Teil der Längezunahme, welcher durch die Wärmeausdehnung verursacht wird, muss selbstverständlich hiervon unterschieden werden.

Wir schreiben die Formel (8) in der Form

$$t = \frac{V}{l \times a} \quad \dots \dots \dots (9).$$

Die Länge  $l$  der Saite beträgt 127 000  $\mu$ , während wir für  $a$  nach einer einigermaassen annähernden Schätzung den Wert  $14 \times 10^{-6}$  setzen dürfen. Nach diesen Daten schreiben wir für Formel (9)

$$t = 0,56 V.$$

1) Vgl. Weitere Mitteilungen usw., a. a. O. S. 679 ff.

Setzen wir für die Dehnung  $V$  der Saite den oben erwähnten Betrag von  $0,1 \mu$ , so wird  $t$   $0,056^\circ$ .

Obenstehende Betrachtungen zeigen, dass es wünschenswert ist, Vorkehrungen zu treffen, welche entweder den schädlichen Einfluss einer Temperaturveränderung aufheben oder die Temperatur des Galvanometers konstant erhalten.

Die Aufhebung des nachteiligen Einflusses von Temperaturveränderungen könnte vielleicht durch Anwendung des Prinzips des Kompensationspendels erzielt werden. Bei der praktischen Ausführung dieser Idee stösst man jedoch auf Schwierigkeiten, welche wahrscheinlich durch den Umstand hervorgerufen werden, dass die Erwärmung des komplizierten Messinstrumentes in der Regel ungleichmässig stattfindet.

Die „Cambridge Scientific Instrument Comp.“, die ein in vielen Hinsichten vorzügliches Modell des Saitengalvanometers in den Handel bringt, hat sich viel Mühe gegeben, die Temperatureinflüsse im Galvanometer zu kompensieren, schliesslich aber ihre Versuche in dieser Richtung eingestellt.

Im Leydener Modell fehlt eine derartige Kompensation; es ist jedoch versucht worden, die Temperatur so gut wie möglich konstant zu erhalten.

Erstens haben schon die grosse Metallmasse von ungefähr 140 kg, aus welcher das Instrument besteht, und die Aufstellung auf einem schweren steinernen Pfeiler zur Folge, dass die Temperatur des ganzen Apparates nur äusserst langsame Schwankungen aufweist. Weiter müssen aber auch noch andere Umstände erwähnt werden. Die Wärmeentwicklung des durch den Elektromagnet fliessenden, eine zweckmässige Feldstärke erzielenden Stromes ist gering.

In der Regel wird bei einem Magnetisierungsstrom von 2,7 Amp., d. h. bei einer Feldstärke von 22500 Gauss gearbeitet. Ein stärkerer Strom würde, wie aus der Kurve der Fig. 4 hervorgeht, nur eine geringe Verstärkung des Feldes zur Folge haben, während die Wärmeentwicklung wie das Quadrat der Stromstärke zunimmt.

Der Widerstand der in Serie geschalteten Spulen beträgt 2,6 Ohm, die Stromleistung bei 2,7 Amp. also 18,92 Watt. Nehmen wir an, dass keine Wasserkühlung angebracht ist, so lässt sich aus der Anzahl von Watt in Verbindung mit den Dimensionen des Instrumentes berechnen, wie hoch dessen Temperatur sich über die Temperatur der

Umgebung erheben wird. Dabei müssen die Spulen anhaltend durchströmt gedacht werden.

Die Erwärmung des Apparates ist ungleichmässig, und es ist fast selbstverständlich, dass die Bronzeplatte und die Schlitten, an welchen der Quarzfaden befestigt ist, eine geringere Temperaturerhebung zeigen werden als die durchströmten Spulen selbst. Nach einer rohen Schätzung darf die Temperaturerhebung der Bronzeplatte und der Schlitten auf kaum  $2^{\circ}$  gesetzt werden.

Dieser Betrag, der an und für sich nicht sehr hoch genannt werden darf, und erst nach vielen Stunden des Durchströmens erreicht werden könnte, ist, wie oben erwähnt, berechnet unter Annahme, dass keine Wasserkühlung im Apparat vorhanden ist. Die Wasserkühlung trägt jedoch noch bedeutend dazu bei, die Konstanz der Temperatur zu erhöhen.

Man sieht in Fig. 1 bei  $K_1$ , auf welche Weise die Wasserkühlung angebracht ist. Eine Wasserleitungsröhre von 1 cm äusserem Durchmesser ist einfach um die Spulen gewunden und wird mit Leitungswasser durchströmt. Das Resultat ist sehr befriedigend.

Als ich noch nicht lange mit dem Galvanometer gearbeitet hatte, versuchte ich das Instrument jedesmal vor dem Anfange der Messungen, mittels eines starken Magnetisierungsstromes auf eine im voraus bestimmte Temperatur zu bringen, welche dann später leichter konstant gehalten werden konnte.

Aber diese Methode, die sorgfältig ausgeführt werden muss, hat sich als ziemlich überflüssig herausgestellt. Ohne irgendwelche Mühe bleibt jetzt mit Hilfe des Kühlwassers die Temperatur des Apparates während längerer Zeit konstant, so dass praktisch keine einzige damit auszuführende Messung auf Schwierigkeiten zu stossen braucht.

Doch kann das Instrument, wie oben schon bemerkt wurde, in bezug auf die Konstanz der Empfindlichkeit nicht mit einem Galvanometer von Deprez-d'Arsonval verglichen werden. Wenn das Saitengalvanometer gebraucht wird, muss man seine Empfindlichkeit immer leicht und schnell kontrollieren können. Dies findet auf die einfachste Weise mittels eines Akkumulators und zweier Rheostate statt, welche also bei der Ausführung von Messungen mit dem Saitengalvanometer niemals fehlen dürfen.

Wir müssen hier noch kurz einen anderen Einfluss erwähnen, den die Temperatur auf die Anweisungen des Galvanometers ausüben kann. Wenn die Temperatur des Instrumentes bedeutend von

derjenigen der Umgebung verschieden ist, treten in der Spalte Luftströmungen auf, welche den Stand der Saite auf unregelmässige Weise beeinflussen. Diese Erscheinung kann im oben beschriebenen Modell beobachtet werden, wenn die Wasserkühlung ausser Wirkung gesetzt, die Saite stark entspannt wird und dabei der Magnetisierungsstrom während längerer Zeit eine grosse Stärke behält.

Die Temperaturveränderungen des Apparates werden teilweise vermieden, wenn an der Stelle eines Elektromagnets ein permanenter Magnet angewendet wird. Es ist aber zu beachten, dass auch der permanente Magnet durch die Temperaturschwankungen der Umgebung beeinflusst wird. Ausserdem wird durch die Anwendung des permanenten Magnets die Empfindlichkeit des Instrumentes sehr bedeutend verringert. Nur wenn man weniger hohe Anforderungen an die Empfindlichkeit stellt, kann ein permanenter Magnet benutzt werden.

Wie sehr die Messungen erschwert werden können, wenn man ein kleines Modell des Saitengalvanometers benutzt, in welchem die Wärmeentwicklung des Magnetisierungsstromes relativ gross ist, wird u. a. durch eine Untersuchung von Westerlund<sup>1)</sup> gezeigt. Die Temperatur eines solchen Instrumentes variiert so schnell, dass seine Empfindlichkeit von Minute zu Minute bedeutend verändert wird und genaue Messungen mit demselben nahezu unmöglich werden.

### 5. Die Spannvorrichtung.

Verglichen mit anderen Galvanometern hat das Saitengalvanometer den Vorteil, dass man auf einfache Weise seine Empfindlichkeit variieren kann. Dies findet innerhalb weiter Grenzen und zugleich mit grosser Genauigkeit statt, indem die Saitenspannung verändert wird. Die Regulierung dieser letzteren darf in einem zweckmässig konstruierten Instrumente keine Schwierigkeiten darbieten.

Die Spannvorrichtung, die am oben abgebildeten (Fig. 1) Galvanometer angebracht worden ist, genügt den gestellten Anforderungen.

Die Saite ist an den Halter *h* (Fig. 5) gelötet. Dieser ist mittels der Schraube *R*<sub>1</sub> im Würfel *D* festgeklemmt, und letzterer ist am Schlitten

---

1) A. Westerlund, Über einige Beobachtungen mit einem von Edelmann gelieferten kleinen Modell des Einthoven'schen Saitengalvanometers. Skandin. Arch. f. Physiol. Bd. 22 S. 281. 1909.

$L$  befestigt. Durch zwei starke stählerne Federn  $v$  und  $v_1$  wird der Schlitten  $L$  gegen die stählerne Spitze der Schraube  $R_2$  gezogen. Die Schraube hat eine Ganghöhe von 0,5 mm und läuft in der festen Mutter  $H$ . Am oberen Ende der Schraube ist ein horizontales Zahnrad  $Z$  befestigt, das in Fig. 1 kaum sichtbar, aber in Fig. 5 deutlich abgebildet ist. Gegen die Zähne des Rades wird die endlose Schraube  $R_3$ , mit welcher die Scheibe  $C$  fest verbunden ist, federnd angedrückt. Eine Umdrehung der Scheibe  $C$  entspricht der Verschiebung eines Zahnes des Zahnrades, und weil, wie schon erwähnt,

die Ganghöhe der Schraube  $R_2$  0,5 mm beträgt, während das Zahnrad 100 Zähne besitzt, wird jede Umdrehung der Scheibe  $C$  die obere Lötstelle der Saite um  $5 \mu$  in vertikaler Richtung verschieben.

Die Scheibe  $C$  kann leicht um 0,01 einer ganzen Umdrehung gedreht werden, wodurch also die Dehnung der Saite zu einem Betrage von  $0,05 \mu$  reguliert werden kann.

Wenn das Zahnrad  $Z$  gedreht wird, verschiebt es sich zu gleicher Zeit in vertikaler Richtung. Um dabei die endlose Schraube  $R_3$  fortwährend gegen die Zähne des Rades angedrückt zu halten, ist sie auf einem Gestell montiert, das um die Achse  $QQ_1$  drehbar ist.

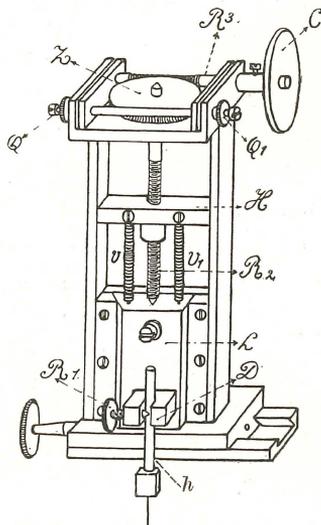


Fig. 5. Spannvorrichtung.

Beim praktischen Gebrauch der Spannvorrichtung wird die Scheibe  $C$  in der Regel nicht mit der Hand berührt. Sie ist mittels eines endlosen Riemens mit einem nicht in der Figur angegebenen kleinen Scheibe verbunden, an welche eine Gabel befestigt ist. Der Beobachter kann mittels einer zweiten hierin passenden Gabel, die sich am Ende eines Stockes befindet, die Saitenspannung regulieren, während derselben Zeit, in der er die Ausschläge des Saitenbildes beobachtet.

Die genannte kleinere Scheibe mit Gabel ist an die früher schon erwähnte Aluminiumstülpe drehbar befestigt.

## 6. Der Einfluss von Erschütterungen des Bodens.

Ogleich das Saitengalvanometer dem Einfluss mechanischer Erschütterungen in geringerem Maasse unterworfen ist als viele andere empfindliche Messinstrumente, so muss man doch bei der Ausführung genauer Beobachtungen einige Vorkehrungen treffen, um das Instrument gegen unerwünschte Schwingungen zu schützen. Man erwäge, dass beim Registrieren der Saitenbewegungen schon sehr kleine, kurz dauernde Verschiebungen der Saite scharf in den Kurven zum Vorschein kommen. Eine Abweichung der Mitte des Quarzfadens zum Betrage von 0,1 bis 0,2  $\mu$  kann schon störend deutlich im Photogramm hervortreten, auch wenn sie nicht länger als ein oder zwei Zehntausendstel einer Sekunde anhält.

Die zu treffenden Vorkehrungen bestehen erstens in der Wahl einer zweckmässigen Saite, zweitens in der soliden Konstruktion und der Aufstellung des Instrumentes.

Während die Eigenschaften der Saite in einem folgenden Aufsatze näher erörtert werden sollen, möchten wir hier nur eine Bemerkung machen, die sich auf die Konstruktion des Apparates bezieht.

Der Elektromagnet war ursprünglich auf vier schwere Stellschrauben montiert. In Fig. 1 ist eine derselben,  $R_4$ , auf dem Tisch vor dem Instrumente liegend abgebildet. Später sind die vier Schrauben durch zwei von rechts nach links durchgehende Bronzefussgestelle  $F$  und  $F_1$  ersetzt, die an die Bronzeplatte  $B$  und die Grundplatte  $G$  festgeschraubt sind. Die Bronzefussgestelle sind an der unteren Fläche ein wenig konkav, so dass jedes derselben nur mit seinen zwei Endflächen auf dem Tische ruht. Unter einer der Endflächen von  $F$  ist eine Stellschraube angebracht, womit man erreicht, dass der Elektromagnet gleichmässig auf vier Stellen ruht. Die Stellschraube ist in der Figur nicht sichtbar.

Diese Vorrichtung hat den Nachteil, dass man, um den Apparat genau vertikal zu stellen, dünne Platten unter eine oder zwei der Tragflächen schieben muss, aber die hierdurch verursachte Unbequemlichkeit ist nicht von grosser Bedeutung, weil das Saitengalvanometer in der oben beschriebenen Form nicht dazu bestimmt ist, wiederholt umgestellt zu werden.

Der Vorteil der Bronzefussgestelle liegt in der grösseren Erschütterungslosigkeit, die mit denselben erreicht werden kann. Als

der Elektromagnet noch auf den vier alten Stellschrauben stand, waren unter bestimmten Umständen Schwingungen des Saitenbildes bemerkbar, deren Periode ungefähr 0,04 Sekunde betrug. Jetzt da wir die Schrauben durch die Fussgestelle ersetzt haben, sind diese Schwingungen bedeutend kleiner geworden.

Hier folgen einige einschlägigen Messungsergebnisse.

Das Galvanometer stand auf einem steinernen Pfeiler. Auf denselben Pfeiler wurde ein Elektromotor befestigt, der absichtlich ein wenig ungleichwichtig gemacht war. Auf diese Weise wurde der Pfeiler, sobald der Motor sich drehte, einer schwachen, mit regelmässigem Rhythmus wirkenden Kraft unterworfen. Dabei oszillierte die Saite, wenn sie stark gespannt war, nur wenig; wenn sie entspannt wurde, mehr, während die Amplitude der Schwingungen ein Maximum erreichte, wenn der Elektromotor 25 bis 26 Umdrehungen pro Sekunde vollbrachte. Das Saitenbild zeigte dann Abweichungen von 2,5 mm.

Nachdem die neuen Fussgestelle angebracht worden waren, wurde der Versuch wiederholt. Die maximale Amplitude der Saitenschwingungen war jetzt bis auf 0,25 mm, d. h. bis auf einen zehnmal geringeren Betrag zurückgebracht.

### 7. Das optische System.

Sowohl bei der direkten Beobachtung wie bei der Projektion und Registrierung der Saitenbewegungen ist es von Wichtigkeit, dass man bei starker Vergrößerung ein scharfes Saitenbild entwirft. Dieser Anforderung kann man nur dann genügen, wenn man Mikroskopobjektive von grosser Apertur anwendet. Es braucht nicht besonders betont zu werden, dass man im allgemeinen die Vergrößerung auf unbegrenzte Weise steigern kann; aber dies geschieht dann auf Kosten der Lichtstärke und der Schärfe des zu erzielenden Bildes.

Die Lichtstärke ist in den meisten Fällen reichlich vorhanden, so dass eine bedeutende Verringerung derselben sich nicht in allzu störender Weise geltend macht. Der Nachteil jedoch, der durch den Verlust der Bildschärfe verursacht wird, kann auf keine Weise kompensiert werden. Praktisch wird hierdurch die nützliche Vergrößerung beschränkt, und diese darf für genau konstruierte Linsen proportional ihrer numerischen Apertur angenommen werden.

Weil die Metalldrähte oder versilberten Quarzfäden, die als Saite dienen müssen, undurchsichtig sind, wird die Apertur des Objektivs

des Projektionsmikroskops nur dann völlig benutzt, wenn sie nicht grösser ist als die Apertur des Beleuchtungsobjektivs. Beide Objektive müssen in die unmittelbare Nähe der Saite gebracht werden.

Als Projektionslinse benutzen wir Zeiss' Apochromat 4 mm, *P*, Fig. 6, dessen numerische Apertur 0,95 beträgt. Die Firma Zeiss hat behufs unseres Zweckes die Korrektur des Objektivs für gewöhnliche Deckglasdicken verändert und dasselbe für die Bénutzung ohne Deckglas korrigiert. Das Preisverzeichnis gibt für den freien Objekt- abstand des Objektivs 0,2 mm an.

Als Beleuchtungslinse *V*, Fig. 6, benutzen wir Zeiss' Achromat *DD*, dessen numerische Apertur 0,85 und dessen freier Objekt- abstand 0,4 mm beträgt.

Die numerische Apertur der Beleuchtungslinse ist absichtlich etwas kleiner genommen als diejenige der Projektionslinse. Wie vorzüglich die Firma Zeiss ihre Objektive auch konstruiert, doch bleibt Vollkommenheit immer etwas Unerreichbares, so dass es einen Vorteil haben kann, die Apertur der Projektionslinse nicht völlig zu benutzen, und auf diese Weise den schädlichen Einfluss, den ihre Unvollkommenheiten auf die Bildschärfe ausüben, zu verringern.

Jetzt muss die Frage erörtert werden, wie die Lichtquelle aufgestellt werden muss, um die Saite so zu bestrahlen, dass tatsächlich die volle Apertur des Objektivs *DD* benutzt wird. Die Wahl der Lichtquelle selbst ist dabei nicht zweifelhaft. Bei der direkten Beobachtung der Saitenbewegungen ist der Gebrauch des Tagelichtes am einfachsten; falls jedoch die Ausschläge auf eine schnell vorüberfahrende empfindliche Platte photographiert werden müssen, ist es wünschenswert, eine Bogenlampe anzuwenden, weil der Krater eines Bogenlichtes von allen irdischen Lichtquellen die grösste Flächenhelle besitzt.

Die scheinbar einfachste Aufstellung der Lampe ist eine solche, wobei der Krater ohne Vermittlung einer Linse direkt das Objektiv *DD* bestrahlt. Das Objektiv muss dabei ein scharfes Bild des Kraters in die Ebene werfen, wo sich die Saite befindet.

Diese Aufstellung stösst jedoch praktisch auf grosse Schwierig-

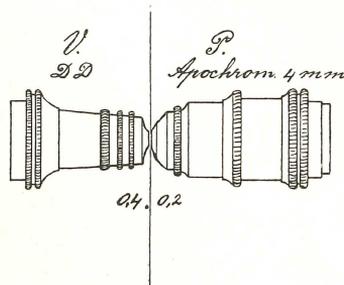


Fig. 6. Beleuchtungs- und Projektionsobjektiv.

keiten; aber es fällt nicht schwer, sie zweckmässiger zu machen, ohne dass dabei ein anderer Lichtverlust stattfindet als der geringe Betrag, der notwendigerweise durch Absorption in brechenden Medien und Reflexion gegen brechende Flächen hervorgerufen wird.

Die von mir angewandte Aufstellung ist in Fig. 7 abgebildet. Der Krater  $K$ , die Linsen  $L_1$  und  $L_2$ , das Diaphragma  $D$  und das Objektiv  $DD$  sind in der optischen Achse  $AA_1$  zentriert.

Die Ebene  $B_1$ , die sich nur einige Millimeter hinter dem Krater befindet, wird durch die Linse  $L_1$  scharf in  $B_2$  abgebildet, wo auch das Diaphragma  $D$  und die Linse  $L_2$  aufgestellt sind. Letztere wirft ein scharfes Bild von  $L_1$  auf das Objektiv  $DD$ . Schliesslich wird durch das Objektiv  $DD$  ein scharfes Bild von  $B_2$  auf  $B_3$ , d. h. die Ebene der Saite, geworfen.

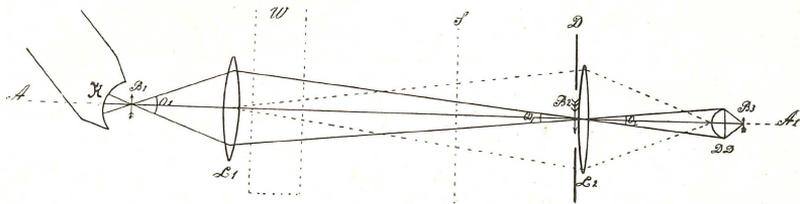


Fig. 7. Das optische System.

Weil Fig. 7 nur schematisch ist, kann sie nicht dienen, um die Dimensionen der von uns benutzten Linsen und ihre gegenseitigen Abstände kennen zu lernen. Wir geben hierunter einige der wirklichen Maasse an.

Die Linsen  $L_1$  und  $L_2$  sind einfache bikonvexe Linsen aus einem Brillenkasten. Erstere hat eine Brechkraft von zehn Dioptrien, letztere von 5,5 Dioptrien. Beide Linsen haben einen Durchmesser von 3,5 cm.

Der Abstand der Linse  $L_1$  vom Bilde  $B_2$  beträgt . . . 95 cm.

In Verbindung mit der Hauptbrennweite von  $L_1$  berechnet man hieraus, dass der Abstand der Ebene

$B_1$  von  $L_1$  = . . . . . 11,2 "

Das Kraterbild wird scharf auf eine Ebene  $S$  eingestellt,

deren Abstand von  $L_1$  . . . . . 63 "

beträgt.

Hieraus wird der Abstand des Kraters  $K$  von  $B_1$  be-

rechnet auf . . . . . 0,7 "

Der Abstand der Linse  $L_2$  von  $DD$  beträgt . . . . 22,5 "

Die hier beschriebene Aufstellung hat praktisch grosse Vorteile, verglichen mit der scheinbar einfacheren Methode, wobei der Krater in die unmittelbare Nähe des Mikroskoptubus gerückt wird. Denn bei unserer Aufstellung befindet die Bogenlampe sich in grosser Distanz vom Galvanometer, während dabei doch alles Licht, welches das Objektiv  $DD$  einem Krater entnehmen kann, benutzt wird.

Letzteres wird auf folgende Weise bewiesen:

Für die Linse  $L_1$  sei der Öffnungswinkel des einfallenden Lichtkegels  $\omega_1$ , des austretenden Lichtkegels  $\omega_2$ . Die entsprechenden Öffnungswinkel für das Objektiv  $DD$  werden  $\omega_2$  und  $\omega_2$  genannt.

Richten wir unsere Aufmerksamkeit ausschliesslich auf die Strahlen, die sich im Durchschnittspunkt des Bildes  $B_2$  und der optischen Achse vereinigen, so können wir unmittelbar aus der Figur herleiten, dass  $\omega_1 = \omega_2$  ist, und dass die numerische Apertur des Objektivs  $DD$  völlig benutzt werden wird, falls nur der Öffnungswinkel  $\omega_1$  einen gewissen, leicht zu berechnenden Betrag überschreitet.

Dabei leistet die Linse  $L_2$  keine Dienste. Sie ist jedoch nötig, um für alle übrigen Punkte von  $B_2$  gültig zu machen, was ohne sie lediglich für den erwähnten Durchschnittspunkt zutrifft. Dazu muss die Linse  $L_2$  ein scharfes Bild der zweiten Hauptebene von  $L_1$  auf die erste Hauptebene des Objektivs  $DD$  werfen. Ihre Hauptbrennweite wird mittels der Formel

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \dots \dots \dots (10)$$

berechnet, worin  $x$  die gesuchte Hauptbrennweite,  $p$  den Abstand der Linse  $L_1$  von  $L_2$  und  $q$  den Abstand zwischen  $L_2$  und  $DD$  bedeutet.

Tragen wir für  $p$  den Wert von 95 cm und für  $q$  den Wert von 22,5 cm ein, so finden wir  $x = 18,2 \text{ cm} = \frac{1}{5,5} \text{ m}$ .

Man kann mittels eines einfachen Versuches kontrollieren, ob die Linsen genau eingestellt sind und die Brechkraft von  $L_2$  richtig gewählt ist. Dazu fange man die Strahlen in der unmittelbaren Nähe von  $L_1$  mit einem undurchsichtigen Schirme auf, der allmählich von einer willkürlichen Richtung aus — z. B. von oben — vor die Linse geschoben wird. Das durch das Projektionsmikroskop projizierte Bild muss unter diesen Umständen allmählich verdunkelt werden, und zwar so, dass diese Verdunkelung immer gleichmässig über alle Teile des Gesichtsfeldes verteilt wird. Strahlt noch ein

wenig Licht durch  $L_1$  hindurch, z. B. durch eine kleine punktförmige Öffnung am oberen oder unteren Rande der Linse, so muss das ganze Gesichtsfeld, obgleich sehr schwach, doch noch vollkommen gleichmässig beleuchtet werden.

Nimmt man  $L_2$  zu stark, so wird bei der Verschiebung des Schirmes vor  $L_1$  in einer bestimmten Richtung die Verdunkelung des Gesichtsfeldes in derselben Richtung stattfinden. Nimmt man  $L_2$  zu schwach, so wird die Richtung der Verdunkelung derjenigen der Schirmbewegung entgegengesetzt sein.

Der Krater muss in der Ebene  $S$  abgebildet werden, wo ein mit einer kleinen Öffnung versehener Schirm aufgestellt werden kann. Während des Photographierens wird der Schirm entfernt. Der Abstand zwischen  $S$  und  $L_1$  kann einigermaassen willkürlich angenommen werden. Doch muss man zwei extreme Stellungen von  $S$  vermeiden. Erstens darf er nicht zu nahe an  $L_2$  gebracht werden, weil sonst der Krater mit  $B_1$  zusammenfällt und ausser in  $B_2$  auch im objektiven Gesichtsfelde  $B_3$  des Projektionsmikroskopes scharf abgebildet wird. Die Zeichnung, die der Krater aufweist, würde also im projektierten Gesichtsfelde zum Vorschein kommen, das dadurch seine gleichmässige Beleuchtung verlieren würde.

Bringt man den Schirm  $S$  zu nahe an  $L_1$ , so stösst man auf die Schwierigkeit, dass bei einer gegebenen Kratergrösse die Lichtintensität des Gesichtsfeldes abnimmt, auch wenn man sich dabei mit einem verhältnismässig kleinen Gesichtsfelde begnügt.

Wird der Schirm  $S$  dagegen an einer zweckmässigen Stelle aufgestellt, so erhält man ein objektives Gesichtsfeld in  $B_3$ , das vollkommen gleichmässig und zu gleicher Zeit mit maximaler Intensität beleuchtet wird. Diese maximale Intensität wird lediglich durch die Flächenhelle des Kraterlichtes und die Apertur des Objektives  $DD$  bestimmt. Sie ist für eine Bogenlampe von vielen 100 Amp. nicht grösser als für eine von 10 oder 20 Amp. Sie bleibt unverändert, wenn in der Lampe geringe Schwankungen der Stromstärke stattfinden oder der Krater sich etwas auf und nieder bewegt.

Diese Umstände haben eine gewisse Bedeutung, wenn man bei der Registrierung der Saitenbewegungen auf photographischem Wege über eine konstante Beleuchtung zu verfügen wünscht.

Wir kommen jetzt zur Frage, wie gross der Durchmesser der Linse  $L_1$  sein muss, damit dieselbe tatsächlich alles benutzbare Licht auffängt.

Der Diameter kann aus den oben schon erwähnten Daten des optischen Systems Fig. 7 berechnet werden, wenn ausserdem noch die Brennweite des Objektivs  $DD$  bekannt ist. Nehmen wir hierfür den Betrag von 0,43 cm an, der im Preisverzeichnis von Zeiss angegeben ist, so finden wir für den gesuchten Minimumdiameter von  $L_1$  3,1 cm.

Die Brennweite jedoch der von uns benutzten, schon vor mehreren Dezennien von Zeiss gelieferten Linse stimmt wahrscheinlich wohl nicht genau mit der Angabe des Preisverzeichnisses überein. Ausserdem sind auch einige der anderen Daten nur annäherungsweise bekannt, so dass es uns nicht zu verwundern braucht, dass der Minimumdiameter von  $L_1$  in Wirklichkeit von dem berechneten Betrage etwas abweicht.

Experimentell kann leicht konstatiert werden, dass alle nützlich angewandten, durch  $L_1$  gebrochenen Strahlen in der Ebene dieser Linse über einen Kreis verteilt sind, dessen Diameter nur 2,5 cm beträgt. Dazu wird eine an einem dünnen Stiel befestigte, undurchsichtige Scheibe von 2,5 cm Durchmesser an die Linse angeschoben. Gibt man ihr eine zweckmässige Stellung, so wird das Gesichtsfeld ganz verdunkelt. Ist das optische System genau zentriert, so muss man sie konzentrisch der Linse anbringen. Diese selbst hat, wie oben schon erwähnt wurde, einen Durchmesser von 3,5 cm, so dass sie an allen Seiten noch 0,5 cm über die lichtauffangende Scheibe hinausragt.

Wir lenken hier insbesondere die Aufmerksamkeit auf den Umstand, dass man eine maximale Belichtung des Gesichtsfeldes erhält mittels einer gewöhnlichen kleinen Linse aus einem Brillenkasten, deren Diameter von 3,5 cm schon übermässig gross ist, während sie bei einer Brennweite von 10 cm die geringe Dicke von 4,5 mm besitzt.

Es darf hier wohl darauf hingewiesen werden, dass man bei der Projektion mikroskopischer Präparate und in der Mikrophotographie in der Regel enorme Kondensoren benutzt, während doch die dabei benötigte optische Vorrichtung prinzipiell mit der von uns beschriebenen übereinstimmt. Die riesigen Kondensoren können jedoch die Lichtstärke des Gesichtsfeldes nicht steigern. Im Gegenteil werden sie dieselbe durch Lichtabsorption im dicken Glas sogar ein wenig verringern.

Zusammen mit dem Objektiv  $P$  (Fig. 6) des Projektionsmikroskops benutzen wir im Saitengalvanometer in der Regel das Pro-

jektionsokular 2, womit auf der Stelle der empfindlichen Platte, d. h. auf ungefähr 1,5 m Abstand bei 660facher Vergrößerung ein Gesichtsfeld von 30 cm Durchmesser erzeugt wird. Dieses Gesichtsfeld kann mit dem Krater einer Bogenlampe von 15—20 Amp. ganz gefüllt werden, während die Beleuchtung vollkommen gleichmässig ist. Dabei ist die Lichtstärke so gross, dass die Beobachtung der Saitenbewegungen in einem hell beleuchteten Saal stattfinden kann.

Während der Aufnahme des Photogrammes ist es aus verschiedenen Ursachen wünschenswert, den Durchmesser des beleuchteten Gesichtsfeldes nicht viel grösser zu machen, als die Höhe der empfindlichen Platte beträgt. Die Regulierung der Grösse des Gesichtsfeldes wird auf bequeme Weise mittels des Irisdiaphragmas  $D$  erzielt, das durch die Linse  $DD$  scharf in der Ebene der Saite abgebildet wird.

Die enorme Bestrahlung der Saite kann durch Erwärmung zu störenden Erscheinungen Anlass geben, die wir bei einer anderen Gelegenheit ausführlich zu beschreiben hoffen. Hier möge die Mitteilung genügen, dass jede Schwierigkeit weggenommen wird, wenn das Licht auf zweckmässige Weise filtriert wird.

In den meisten Fällen genügt eine Wasserkammer  $W$ , die zwischen der Linse  $L_1$  und  $S$  aufgestellt wird. Wenn man aber bei entspannter Saite photographiert, ist es nötig, das Wasser durch eine Lösung von  $\text{CuSO}_4$  in  $\text{NH}_3$  zu ersetzen. Die Konzentration der  $\text{CuSO}_4$ -Lösung wird mit einem Handspektroskope kontrolliert. Sobald die äussersten roten Strahlen grösstenteils absorbiert werden, kann die Konzentration als ausreichend betrachtet werden. Die infraroten Strahlen sind dann auch verschwunden, während die restierenden Lichtstrahlen nahezu ungeschwächt auf die photographische Platte einwirken.

### 8. Die Zentrierung der Saite.

Man muss die Saite genau im magnetischen Felde zentrieren. Dazu kann jede der beiden Befestigungsstellen des Quarzfadens mittels mikrometrisch verschiebbarer Schlitten in zwei senkrecht aufeinander stehenden horizontalen Richtungen bewegt werden.

Für den oberen Halter  $h$  der Saite findet diese Bewegung mit Hilfe der Schrauben  $R_5$  und  $R_6$ , siehe Fig. 1, statt. Für den unteren Halter sind die Schlitten und Schrauben auf ähnliche Weise konstruiert, aber in der Figur grösstenteils unsichtbar.

Es kommt oft vor, dass beim Lötten der Saite ihre Enden etwas

umgebogen werden. Dann kann es wünschenswert sein, die Saitenhalter ein wenig zu drehen. Der Halter  $h$ , Fig. 1, ist im Würfel  $D$  um eine vertikale Achse drehbar, und der Würfel selbst kann um eine horizontale Achse, die rechtwinklig zur Richtung der Lichtstrahlen steht, gedreht werden. Der Mechanismus dieser Drehungen muss jedoch einfach bleiben.

Bisweilen ist es auch nötig, dass eine kleine Korrektur in der Stellung der Saitenhalter in dem Sinne angebracht wird, dass die Saitenenden nicht genau senkrecht übereinander zu stehen kommen. Dies wird leicht mit Hilfe der mikrometrisch verschiebbaren Schlitten bewerkstelligt. Man muss dabei sorgen, dass man die unteren und die oberen Schlitten gleich viel und in entgegengesetzter Richtung voneinander verschiebt, so dass die Mitte der Saite so gut wie möglich an derselben Stelle bleibt. Unter fortwährender Beobachtung des stark vergrößerten Bildes der Saite kann der Betrag der feinen Schlittenverschiebungen genau kontrolliert werden.

All diese Maassregeln haben den Zweck, die weiter mit dem Galvanometer auszuführenden Messungen zu vereinfachen. Ist die Saite auf zweckmässige Weise gelötet und einmal auf die richtige Weise im Galvanometer befestigt, so kann man ihr die verschiedensten Spannungen erteilen, ohne dass ihre Mitte dabei eine nennenswerte horizontale Verschiebung erleidet.

Welchen Vorteil dies bei der Arbeit bietet, ist leicht ersichtlich. Bei der Registrierung der Saitenbewegung ist es oft wünschenswert, dass die Empfindlichkeit des Galvanometers genau auf einen im voraus bestimmten Wert gebracht wird, während es weiter bei physiologischen Untersuchungen wiederholt vorkommt, dass man gezwungen ist, bald nach einander Ströme von sehr verschiedener Intensität zu messen. Man wird also mehrere Male während der Arbeit die Saitenspannung variieren müssen, Und je weniger das projizierte Saitenbild bei einer Veränderung der Saitenspannung verschoben wird, desto weniger braucht auch die Einstellung der Mikroskope verändert zu werden.

Die Weise, worauf diese letztere Einstellung stattfindet, ist unmittelbar aus Fig. 1 ersichtlich, und braucht also nicht näher beschrieben zu werden. Keine der hier abgebildeten Einstellungs- vorrichtungen kann ohne Nachteil weggelassen werden.

Bei einer Dehnung der Saite wird selbstverständlich auch eine Verschiebung der Saitenmitte in vertikaler Richtung wahrgenommen;

aber diese letztere Bewegung kann, falls man über eine richtig polierte, glatte Saite zu verfügen hat, hier ausser Betracht gelassen werden.

Es wird noch ein nicht zu unterschätzender Vorteil durch eine genaue Aufstellung der Saite im magnetischen Felde erzielt. Nur wenn die Saite sorgfältig zentriert ist, wird es möglich, ihre Spannung stark zu verringern und die schwächsten Ströme zu messen, ohne dass dabei das Galvanometer einige seiner guten Eigenschaften einbüsst.

Bei den Saiten Nr. 18 und 25 konnte bei der üblichen 660 maligen Vergrößerung die Empfindlichkeit bis auf 1 mm Ausschlag für  $5 \times 10^{-12}$  Amp. gesteigert werden. Hierbei war der Nullpunkt noch in genügendem Maasse konstant, die Ausschläge waren den Stromstärken proportional, und für eine gleiche Stromstärke war der Ausschlag nach beiden Richtungen hin gleich gross. Die Dauer eines Ausschlags dürfte auf ungefähr eine halbe Minute geschätzt werden.

Es braucht nicht besonders betont zu werden, dass die Eigenschaften der Saite an und für sich diese Ergebnisse stark beeinflussen. Saite Nr. 18 hatte einen Diameter von  $2,3 \mu$  und einen Widerstand von 5200 Ohm; Saite Nr. 25 einen Diameter von  $1,5 \mu$  und einen Widerstand von 6800 Ohm.

Aber auch mit dickeren Saiten können ähnliche Ergebnisse erzielt werden. Saite Nr. 35 hat einen Diameter von mehr als  $3 \mu$  und einen Widerstand von 3800 Ohm. Ihre Empfindlichkeit kann auch bei der schon erwähnten 660 maligen Vergrößerung bis auf 1 mm Ausschlag für  $5 \times 10^{-12}$  Amp. gesteigert werden, während die Konstanz des Nullpunktes, die Proportionalität zwischen Ausschlägen und Stromstärken, und die Gleichheit der Ausschläge nach beiden Richtungen hin sehr befriedigend sind.

In Fig. 8 ist eine Kurve abgebildet, die mittels der Saite Nr. 35 geschrieben wurde.

Es werden hintereinander durch das Galvanometer Ströme von 1, 2 und  $3 \times 10^{-10}$  Amp. geschickt. Ebenso wie bei den früher publizierten Kurven ist die Vergrößerung 660 fach, während das Koordinatensystem zusammen mit den Saitenausschlägen auf die empfindliche Platte photographiert worden ist. Diese letztere wird mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 1 mm pro Sekunde fortbewegt.

In der Figur entspricht 1 Skalenteil einer Abszisse 1 Sek., während 1 Skalenteil einer Ordinate den Wert von nahezu  $10^{-11}$  Amp. hat. Die

Ausschläge sind aperiodisch, was der Luftdämpfung zugeschrieben werden muss. Durch die Einschaltung von 1 Megohm in den Galvanometerkreis ist die elektromagnetische Dämpfung nahezu bis auf 0 reduziert.

Man vergleiche einen der Ränder des Bildes vor und nach den Ausschlägen und kann sich dann entweder bei direkter Beobachtung mit dem unbewaffneten Auge oder mit Hilfe einer Lupe überzeugen, dass die Ausschläge noch auf befriedigende Weise den Stromstärken proportional sind: für  $3 \times 10^{-10}$  Amp. hat man einen Ausschlag von 27,9 Sk., so dass für jedes Drittel dieser Stromstärke ein Ausschlag von 9,3 Sk. erwartet werden muss. Es kommen aber Abweichungen

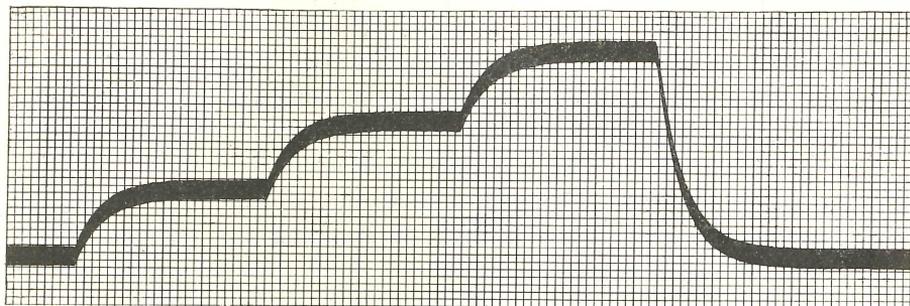


Fig. 8. Eichungskurve. Absz. 1 Sk. = 1 Sek., Ordin. 1 Sk. =  $10^{-11}$  Amp.

von 0,2 Sk. vor. Der erste Ausschlag ist 9,1, der zweite 9,3, der dritte 9,5 Sk. Aber eben dass man diese Abweichungen leicht konstatieren kann, beweist, dass man bei einer wirklichen Messung keinen grösseren Fehler als von  $10^{-12}$  Amp. zu machen braucht.

Die Dauer eines Ausschlages darf je nach der Grösse auf 15 bis 20 Sek. angenommen werden<sup>1)</sup>, während die Zeit, die für die Registrierung der ganzen Figur nötig war, ungefähr 2 Minuten beträgt. Während dieser Zeit ist, wie aus der Figur ersichtlich, das Bild scharf und der Nullpunkt konstant geblieben.

Nachdem wir die Vorteile des Vorhandenseins einer verhältnismässig grossen Anzahl von Einstellungsrichtungen im Saitengalvanometer besprochen haben, wollen wir nicht unterlassen, auch kurz auf die Nachteile hinzuweisen.

1) Gelingt es, die Saite in einen luftleeren Raum einzuschliessen, so wird der Ausschlag bei gleicher Empfindlichkeit viel rascher erfolgen. Vgl. hierüber „Weitere Mitteilungen über das Saitengalvanometer usw.“ a. a. O.

Erstens wird das Instrument durch dieselben kostspieliger, und zweitens wird der Ersatz einer Saite zu einer ziemlich umständlichen Arbeit. Das Wegnehmen und Wiedereinstellen eines versilberten Quarzfadens zwischen den Polen des Elektromagnetes kostet im oben abgebildeten Instrumente ungefähr 1 Stunde. Wünscht man eine Anzahl von Saiten miteinander zu vergleichen und die eine unmittelbar nach der anderen zu untersuchen, so wird dieser Umstand tatsächlich als ein Nachteil empfunden.

Aber für den Gebrauch des Saitengalvanometers als elektrisches Messinstrument kommt der Zeitaufwand für das Einbringen einer neuen Saite kaum in Betracht, weil ein einmal eingebrachter, zweckmässig versilberter Quarzfaden 1—2 Jahre hintereinander seine Dienste leisten kann. Die Saiten Nr. 10, 15, 17 und 25 sind resp.  $1\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{3}{4}$  und  $1\frac{1}{2}$  Jahr in Gebrauch gewesen<sup>1)</sup>.

Zu den verschiedensten Zwecken kann eine und dieselbe Saite dienen, weil sie bald bei einer Empfindlichkeit von 1 mm Ausschlag für  $5 \times 10^{-12}$  Amp., bald bei einer Empfindlichkeit von 1 mm Ausschlag für  $3 \times 10^{-7}$  Amp. gebraucht werden kann. Bei der letztgenannten Empfindlichkeit ist die Ausschlagdauer bis auf ungefähr 0,001 Sek. zurückgebracht.

### 9. Verschiedene Modelle.

Es sind verschiedene Modelle des Saitengalvanometers in den Handel gebracht worden, die sich vom oben beschriebenen Modell dadurch unterscheiden, dass sie leichter gebaut und weniger kompliziert sind, wodurch sie auch bedeutend billiger werden.

Eine grosse Bequemlichkeit für den Forscher, der eine Anzahl von Saiten miteinander zu vergleichen wünscht, oder wegen anderer Ursachen die Saite oft im Elektromagnet umzutauschen wünscht, bietet eine bei vielen Modellen vorhandene Vorrichtung dar, wobei die Saite in einem geschlossenen Behälter befestigt ist. Der Behälter, worin zwei Fenster aus Glas oder Mica angebracht sind, kann schnell und leicht zwischen die Polen des Elektromagnetes eingeschoben werden. Hat man eine Anzahl von Saiten in ihren resp. Behältern bereit, so verursacht ein wiederholter Umtausch der Saiten keinen grossen Zeitaufwand mehr.

<sup>1)</sup> Saiten, die nur dann und wann im Galvanometer benutzt, übrigens aber ruhig aufbewahrt werden, können viel länger gut bleiben. So ist z. B. Saite Nr. 20, obgleich schon 7 Jahre alt, noch vorzüglich.

Das Eingeschlossensein der Saite hat jedoch auch seine Nachteile. Insbesondere muss auf den Umstand hingewiesen werden, dass die Glas- oder Micafenster es unmöglich machen, Objektive von grosser Apertur zu benutzen, weil man letztere behufs einer zweckmässigen Bildformung sehr nahe, z. B. 0,2 mm, an die Saite anschieben muss<sup>1)</sup>.

Ist die Saite in einen Behälter eingeschlossen, so hat man mittels der jetzigen im Handel vorkommenden Mikroskopobjektive nur Verfügung über eine nützliche Vergrösserung des Saitenbildes, die dreimal geringer ist als bei einer freien Saite. Dies hat zur Folge, dass man bei derselben Ausschlagsdauer eine dreifach geringere Empfindlichkeit oder bei derselben Empfindlichkeit und bei stark gedämpfter Saitenbewegung eine dreifach grössere Ausschlagsdauer erhält.

Es ist vielleicht möglich, die Vorteile beider Systeme zu vereinigen, indem man die Fenster des Behälters verschiebbar macht.

Um sehr schnelle Ausschläge zu bekommen ist es wünschenswert, eine kürzere Saite zu gebrauchen. Diese kann ohne Mühe in das Modell von Fig. 1 eingesetzt werden. Saite Nr. 20 hat einen Durchmesser von  $1 \mu$  und ist 25 mm lang. Durch zweckmässige Spannung, die ohne Gefahr des Reissens angewendet werden kann, zeigt sie bei einer Empfindlichkeit von 1 mm Ausschlag für  $10^{-5}$  Amp. Oszillationen, deren Periode gleich  $0,31 \sigma$  ist.

Diese Periode entspricht derjenigen eines Tones von 3230 ganzen Schwingungen pro Sekunde — also ungefähr *gis*<sup>4</sup>.

Wünscht man ausschliesslich mit diesen schnellen Oszillationen und also mit entsprechend kurzer Saite zu arbeiten, so sind selbstverständlich die grossen Polschuhe überflüssig und genügt auch ein kleinerer Elektromagnet.

Von den Entwerfern neuer Modelle ist der Elektromagnet in sehr ungleicher Gestalt konstruiert worden. Wir erinnern hier an die Modelle von verschiedener Grösse von *Edelmann* in München, der auch ein doppeltes Saitengalvanometer und ein Modell mit permanentem Magnet liefert. An den Apparat von *Kunsch* und *Jaeger* zu Rixdorf-Berlin, die eine photographische Registriervorrichtung an das Saitengalvanometer verbunden haben, welcher automatisch entwickelt und fixiert. Einige wenige Sekunden nach der Exposition kommen die photo-

1) Vgl. hierüber auch das vorletzte Kapitel 7.

graphierten Kurven entwickelt und fixiert aus dem Apparat zum Vorschein<sup>1)</sup>. An das Modell von Wertheim Salomonson, der dem

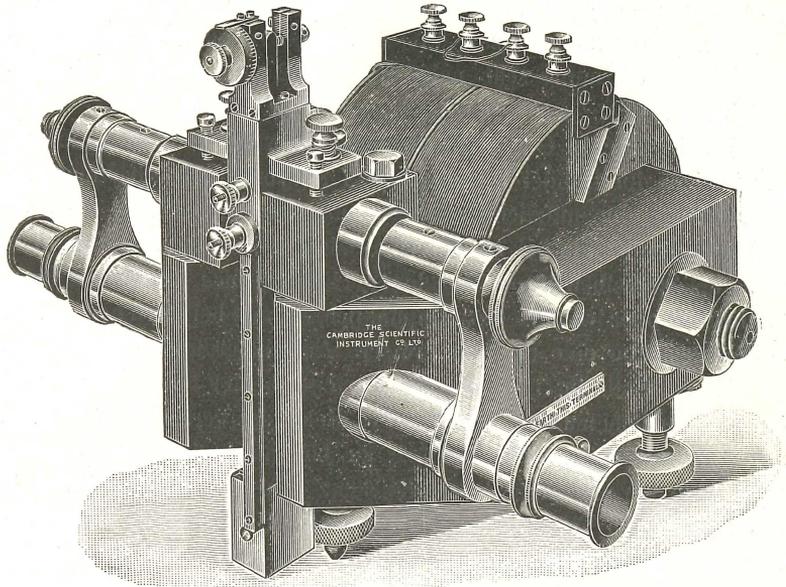


Fig. 9. Cambridge-Modell des Saitengalvanometers.

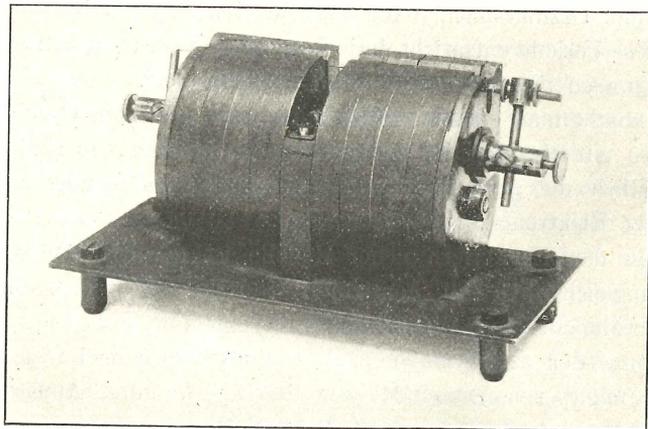


Fig. 10. Elektromagnetisches Signal.

einfachen Elektromagnet zwei magnetische Kreise in Parallelschaltung vorgezogen hat. Und schliesslich an das Modell von „The Cam-

1) Die Aktiengesellschaft C. Lorenz, Berlin SO. 26, liefert einen ähnlichen Apparat.

bridge Scientific Instrument Comp.“ Letzteres Modell, das in Deutschland nur wenig bekannt ist, zeichnet sich durch seine gedrängte, solide Form aus. Man findet es in nebenstehender Fig. 9 abgebildet.

Zum Schluss erwähnen wir noch eine Anwendung des Prinzips des Saitengalvanometers für ein elektromagnetisches Signal. Dieser Apparat, Fig. 10, den ich schon mehrere Jahre benutze, hat den Zweck, einen bestimmten Augenblick, z. B. den Moment einer Reizung, photographisch aufzuzeichnen.

Es besteht aus einem Silberbande<sup>1)</sup>, das 12 cm lang,  $143 \mu$  breit und  $6,4 \mu$  dick ist und zwischen den Polen eines permanenten Lamellenmagnetes ausgespannt wird. Der Lamellenmagnet, der eine solche Gestalt hat, dass er nahe an die photographische Platte angeschoben werden kann, ist aus zwei Hälften zusammengesetzt. Die beiden Hälften stehen 12 mm voneinander entfernt, und das Licht passiert durch die zwischen denselben vorhandene Öffnung, insofern es nicht vom Silberbande aufgefangen wird.

Das Silberband wird stark gespannt, hat einen Widerstand von 2,6 Ohm und erträgt einen Strom von 0,2 Amp. Will man ein deutliches Schattenbild des dünnen Bandes auf die photographische Platte werfen, so muss man dafür sorgen, dass es beim Ausschlagen nicht um seine Längsachse gedreht wird. Selbstverständlich muss das Signal so aufgestellt werden, dass seine Ausschläge in einer Ebene stattfinden, die senkrecht auf die Richtung der Lichtstrahlen steht. In dieser selben Ebene muss die Breitendimension des Bandes sich befinden, und um dies zu erreichen, wird ein feiner Metalldraht, nicht weit von der Mitte des Apparates entfernt, federnd gegen das Silberband angedrückt. Diese Vorrichtung hat zugleich den Vorteil, dass die Bewegungen des Silberbandes gedämpft werden.

Oben beschriebenes Signal registriert den Moment der Reizung mit keinem grösseren latenten Stadium als 0,0001 Sekunde.

Bei einer folgenden Gelegenheit hoffe ich zu beschreiben, auf welche Weise die versilberten Quarzfäden angefertigt und im Elektromagnet befestigt werden. Danach werden noch einige Nebenapparate, wie die Registriervorrichtung und die Methode der Zeitschreibung, zur Besprechung gelangen.

1) Dieses Band ist mir unter dem Namen „Silberplätt“ vor längerer Zeit von E. Kuhn's Drahtfabrik zu Nürnberg geliefert worden.

# Jodipin

Tertiäre Syphilis,  
Psoriasis, Struma,  
Bronchial-  
Asthma, Em-  
physem,  
etc.

# Stypticin

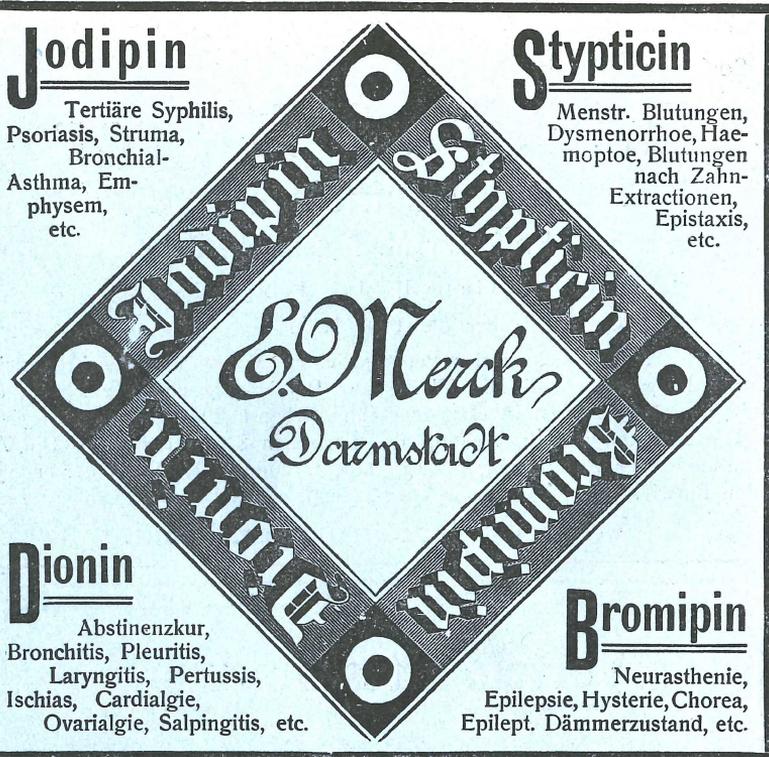
Menstr. Blutungen,  
Dysmenorrhoe, Hae-  
moptoe, Blutungen  
nach Zahn-  
Extractionen,  
Epistaxis,  
etc.

# Dionin

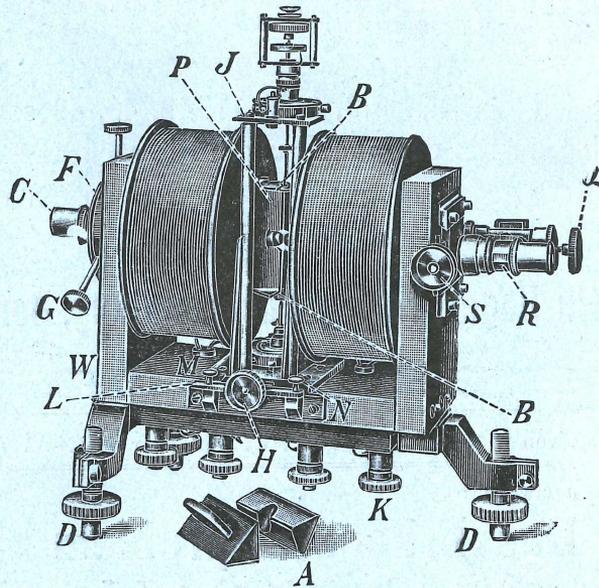
Abstinenzkur,  
Bronchitis, Pleuritis,  
Laryngitis, Pertussis,  
Ischias, Cardialgie,  
Ovarialgie, Salpingitis, etc.

# Bromipin

Neurasthenie,  
Epilepsie, Hysterie, Chorea,  
Epilept. Dämmerzustand, etc.



Spezialbroschüre über Saiteninstrumente  
gratis und franko.



## Saiten-Galvanometer

(Konstruktion Edelmann).

Phys.-mech. Institut  
von Prof. Dr. M. Th. Edelmann & Sohn, München.