

I.

Kymographien, Schreibhebel, Registrierspiegel, Prinzipien der Registrierung.

Von

O. Frank in München.

(Mit 13 Figuren.)

Kapitel 1.

Einleitung.

Zur graphischen Registrierung¹⁾ von Bewegungsvorgängen sind zwei Apparate notwendig: der eigentliche Registrierapparat, durch den die zu untersuchenden Vorgänge in die Bewegungen einer Schreibfeder oder eines Lichtstrahls umgewandelt werden, und eine möglichst gleichmäßig bewegte Fläche, die Registrierfläche, gewöhnlich aus Papier oder aus lichtempfindlichem Material bestehend, auf welche die Bewegungen der Schreibfeder oder des Lichtstrahls in Form einer Kurve aufgeschrieben werden. Nur in seltenen Fällen, wie z. B. bei den Indikatoren, steht die Schreibfläche fest.

Der wesentliche Teil des Instrumentariums ist der eigentliche Registrierapparat. Die Prinzipien seiner Theorie, die jetzt als abgeschlossen zu gelten hat, werden in dem 6. Kapitel dieses Abschnitts behandelt, während die Beschreibung seiner besonderen Einrichtungen und ihre spezielle Theorie in den anderen Teilen des Handbuchs, z. B. „Hämodynamik“, enthalten ist.

In dem vorliegenden Abschnitt werden ferner unter Kapitel 2 die Vorrichtungen zur Bewegung der Registrierfläche, die Kymographien, behandelt.

In dem Kapitel 3 werden die Methoden der Chronographie und Signal-schreibung erörtert.

Die einzigen Registrierapparate, die in diesem Abschnitt, und zwar in den Kapiteln 4 und 5, wegen ihrer allgemeinen Verwendung beschrieben werden, sind die Hebel und die Spiegel.

Als allgemeine Quellen für die Literaturangaben haben gedient: Gscheidlen, Physiologische Methodik 1876, Marey, Méthode graphique 1885, Cyon, Methodik der physiologischen Experimente und Vivisektionen 1876, Langendorff, Physiologische Graphik 1891.

¹⁾ Die Methode wurde von Young geschaffen, in der Physiologie speziell zuerst von C. Ludwig angewandt.

Kapitel 2.

Kymographien.

A. Allgemeines.

Das vorliegende Kapitel beschäftigt sich mit den Apparaten, die zur Bewegung der Registrierfläche dienen, den Kymographien. Seitdem Carl Ludwig im Jahre 1847 (Müllers Archiv S. 242) die graphische Methode zur Bestimmung der Blutdruckschwankungen in die Physiologie eingeführt hat, ist hierfür eine große Reihe von Apparaten konstruiert worden.

Für die Aufnahme der Bewegungen der quergestreiften Muskeln muß die Registrierfläche sehr rasch, $\frac{1}{2}$ bis 10 m Sek., laufen. Hierfür sind besondere Apparate bestimmt, die Myographien. Sie werden ebenso wie die besonderen Einrichtungen zur photographischen Registrierung an anderer Stelle dieses Handbuchs behandelt.

Die Kymographien haben die Aufgabe zu erfüllen, eine Papierfläche mit gleichmäßiger Geschwindigkeit unter der Schreibspitze hindurch zu bewegen. Zum Treiben der Apparate wird entweder eine gespannte Feder, ein fallendes Gewicht oder eine elektromagnetische Kraft, unter Umständen auch die Wasserbewegung benutzt. (Elektromagnetischen Antrieb haben beispielsweise die unten beschriebenen Kymographien von Straub, Blix, Brodie, Lohmann-Rinck. Einen Wasser-Motor verwendet Fitz 1898. Wassermotoren dürften jetzt bei der allgemeinen Zugänglichkeit der elektromagnetischen Kräfte nicht mehr in Betracht kommen.)

Leider fehlt es bis jetzt an systematischen Untersuchungen über die Leistungen der einzelnen Konstruktionen. Fast durchgängig haben sich die Erfinder damit begnügt, die Vorzüge ihrer Konstruktion hervorzuheben, ohne die Leistungen der Apparate nach jeder Richtung objektiv zu würdigen. Die Herstellung guter Kymographien wird mehr als eine Kunst betrachtet, statt daß man die Prinzipien der Konstruktion entwickelt und der Allgemeinheit zugänglich gemacht hätte. Und doch erscheint die Bildung solcher Prinzipien von nicht zu unterschätzender Bedeutung. Sehr wichtig ist ja die Erzielung einer gleichmäßigen Bewegung der Schreibfläche. Man hat sich vor Fehlern, die durch eine ungleichmäßige Bewegung entstehen, bei den physiologischen Versuchen fast stets dadurch geschützt, daß man bestimmte Zeitintervalle zugleich mit der registrierten Kurve aufgeschrieben hat (s. Kap. 3). Dadurch werden aber die Vorteile einer gleichmäßigen Bewegung der Schreibfläche, ganz abgesehen von der Unbequemlichkeit, eine zweite Kurve registrieren zu müssen, nicht ersetzt. Denn in den meisten Fällen wird man den zeitlichen Verlauf durch Ausmessung der Abszissenlänge feststellen, und nicht durch Ziehen von Ordinaten, welche die Zeitintervalle abgrenzen. Die Meßapparate können kaum für eine andere Methode eingerichtet sein. Dann hat man aber zur Auswertung des zeitlichen Verlaufs eine außerordentlich mühsame Umrechnung notwendig. Unter allen Umständen ist zu bedenken, daß eine Sicherheit für die genaue zeitliche Auswertung bei ungleichmäßiger Bewegung der Schreibfläche nur für den Anfang und das Ende der registrierten Intervalle besteht. Für kleinere Intervalle als die registrierten kann der zeitliche Verlauf unter diesen Umständen nicht sicher ermittelt werden. Die photographische Aufnahme von Bewegungs-

vorgängen hat darüber aufgeklärt, wie unregelmäßig die Schreibfläche gewöhnlicher Kymographien sich bewegt. (Jedes Stillstehen des Films markiert sich durch einen dunkleren Ton der entwickelten Silberschicht.) Will man also eine zeitliche Veränderung für minimale Intervalle wie etwa $\frac{1}{1000}$ Sekunde feststellen, so müssen diese Intervalle registriert werden. Daß unter Umständen eine Unterlassung in dieser Richtung sehr bedenklich wird, hat u. a. Garten gegenüber Tschermak hervorgehoben.

Die Unregelmäßigkeiten in dem Gang der Kymographien werden erzeugt durch Veränderung der bewegenden Kraft, der Reibungswiderstände und bei der Anwendung von Zahnrädern durch unstete Berührung der Zähne. Die bewegende Kraft nimmt bei den durch Federspannung getriebenen Kymographien entsprechend der Entspannung der Feder langsam ab. Man wird bei ihnen niemals eine völlig gleichmäßige Bewegung erhalten können. Bei den besten Konstruktionen wird durch Verwendung von sehr langen Federn einigermaßen die Gleichmäßigkeit des Ganges innerhalb eines Zeitraums von ca. 10—20 Minuten erzielt. Eine gleichmäßige bewegende Kraft ist die Schwere eines Gewichts. Doch haben die Konstruktionen, bei denen dieses Moment benutzt wird, den Nachteil, daß sie wegen der Größe der Anlage nur schwer transportabel sind, und daß das Gewicht nach verhältnismäßig kurzen Zeiträumen wieder aufgezogen werden muß. Für kurzdauernde Aufnahmen kann durch ein fallendes Gewicht eine gleichmäßige Bewegung erzielt werden, wenn eine passende Dämpfung angebracht wird. Vgl. z. B. die Einrichtungen von Hofmann (1907), Wertheim-Salomonson (1907) etc. Eine konstante Kraft würde auch in den Elektromotoren zur Verfügung stehen, falls sie von einer konstanten elektromotorischen Kraft gespeist werden. Doch spielt bei den kleineren Elektromotoren, die für gewöhnlich zur Bewegung der Kymographien verwendet werden, die Berührung der Kollektorbürsten für die Schnelligkeit der Bewegung eine so große Rolle, daß Ungleichmäßigkeiten der Berührung, wie sie bei dem Betrieb ständig vorkommen, wesentliche Unregelmäßigkeiten des Ganges bedingen. Die Veränderung der Berührung der Bürsten beeinflußt sowohl den elektrischen Widerstand als auch die Reibung. Um diese Ungleichmäßigkeiten zu beseitigen, hat man besondere elektrische Regulatoren konstruiert, die sämtlich nach dem Prinzip der Zentrifugalregulatoren gebaut sind. Bei zu geringer Geschwindigkeit des Motors wird eine stärkere elektrische Spannung automatisch eingeschaltet. (S. u. a. Garten, dieses Handbuch Bd. I 110 u. 111.) Eine umfassende Darstellung der Leistungen dieser Regulatoren liegt bis jetzt noch nicht vor.

Sehr unangenehme Störungen des Ganges — unangenehm deshalb, weil sie in kürzeren Intervallen erfolgende Unregelmäßigkeiten bedingen — werden durch die unregelmäßige Reibung und bei Zahnrad- oder Schneckengetrieben durch Unstetigkeiten in der Zahnradberührung erzeugt. Um die Unregelmäßigkeiten der Reibung an den verschiedenen Achsen und Flächen möglichst unschädlich zu machen, läßt man am besten die bewegende Kraft Arbeit leisten durch Überwindung einer gleichmäßigen eventuell regulierbaren Reibung an einem bestimmten Teil des Apparats. Die sämtlichen mechanischen Regulatoren, die Windflügel, Zentrifugalregulatoren usw., Flüssigkeitsdämpfung, oder auch die Dämpfung durch Foucaultsche Ströme beruhen auf diesem Prinzip. Sie erfüllen meistens einen doppelten Zweck; sie elimi-

nieren die Wirkung der Unregelmäßigkeiten der Reibung in den einzelnen Teilen des Apparats und ferner die Ungleichmäßigkeit der bewegenden Kraft, letzteres dadurch, daß der Reibungswiderstand bei schnellerem Gang des Motors vermehrt wird. Je größer diese Verstärkung des Reibungswiderstands bei einer Vergrößerung der Schnelligkeit des Motors ist, um so besser funktionieren diese Regulatoren. Es würde sich wohl lohnen, die Abhängigkeit der dämpfenden Kraft von der Schnelligkeit der Bewegung dieser Apparate für die einzelnen Typen festzustellen. Nach meinen Erfahrungen wirken die an den Phonographen- oder Grammophonuhrwerken angebrachten Zentrifugalregulatoren besonders gut. Wie der Regulator von Villarceau (s. Marey, *Méth. graphique* S. 135) wirkt, konnte ich nicht ermitteln. Naturgemäß erscheint es am richtigsten, diese Regulatoren an die letzte Stelle des Triebwerks zu setzen. Wird aber die bewegte Schreibfläche durch Zahnradübertragung hinter den Regulator geschaltet, so kommen seine Vorzüge der Ausgleichung der Unregelmäßigkeiten nur teilweise zugute.

Die Unstetigkeiten der Berührung der einzelnen Teile des Werks werden zunächst durch richtige Konstruktion der Zähne und Gänge vermieden. Mir scheint aber hier vor allem ein Prinzip beachtenswert zu sein: bei den Zahnrädern möglichst viel Zähne anzubringen; dadurch wird die Zahl der Stöße und Schwingungen in der Zeiteinheit vermehrt, es kommt eine größere mittlere Regelmäßigkeit zustande. Nach meiner Meinung ist der bemerkenswerte gute Gang der Phonographen durch die Anwendung dieses Prinzips erzielt. Die Kontrolle des regelmäßigen Gangs geschieht ganz allgemein durch Anbringung von Zeitmarken: Chronographie (s. Kap. 3. Vergl. Marey, *Méth. graphique* S. 461).

B. Typen der Kymographien.

Die Geschwindigkeit wird man entsprechend der Schnelligkeit der Bewegung wählen. Normalgeschwindigkeiten in Abstufungen von 0.1, 1.0, 10.0 etc. mm/Sec., wie sie Marey in der *Méthode graphique* S. 461 vorschlägt, haben sich aus begreiflichen Gründen noch nicht eingebürgert.

Die Schreibfläche der Kymographien ist in verschiedener Weise gebildet:

a. Aus einem beruhten glatten Papierstreifen, der auf einer durch irgendeine Kraft bewegten Trommel aufgespannt ist. Gewöhnlich beträgt der Umfang der Trommel 50 cm, selten mehr, wie z. B. bei dem Fickschen Myographion.

b. Aus einer beruhten in sich zurücklaufenden endlosen Papier- schleife. Diese Form ist zuerst von Hering angewandt worden und hat sich bei vielen Untersuchungen als sehr zweckmäßig erwiesen. Die Schleife wird um den rotierenden Zylinder und eine oder mehrere Walzen geführt. Die Schleifenlänge kann zwei oder mehr Meter betragen. Der Vorzug dieser Konstruktion liegt darin, daß bei ihr nicht so oft wie bei dem Kymographion neues beruhtes Papier aufgezogen werden muß. Die Kymographien von dem Typus 1 lassen sich meist für die Registrierung auf endlosem Papier umgestalten.

c. Aus Papier in Rollen aufgewickelt. Das Papier bewegt sich über Walzen und wird auf eine zweite Rolle aufgewickelt. So ist das alte Ludwigsche Kymographion konstruiert. An den Kymographien, bei denen für gewöhnlich auf beruſtes Papier geschrieben wird, kann in den meisten Fällen eine solche Vorrichtung, wie sie soeben beschrieben wurde, angebracht werden. Auf das Papier muß mit Tinte ¹⁾ geschrieben werden; dadurch ist die Verwendung dieser Kymographien fast ganz beschränkt auf eine Registrierung, nämlich auf die Registrierung der Druckschwankungen durch das Quecksilbermanometer. Denn die Registrierung mit Tinte bedingt eine große Masse der Schreibspitze, durch die das Trägheitsmoment der Hebel-schreibapparate so vermehrt wird, daß sie ihre Vorzüge einbüßen.

C. Spezielle Konstruktionen.

a) Einfache rotierende Zylinder.

1. Das Ludwig-Baltzarsche Kymographion. Das Instrument, das wohl zu den meisten graphischen Untersuchungen bis jetzt gedient hat, ist das von Baltzar nach den Angaben Ludwigs konstruierte Kymographion (siehe die umstehende Abbildung, $\frac{1}{3}$ natürliche Größe. Eine ältere Konstruktion ist in Cyon, Atlas Taf. VII abgebildet).

Der mit beruſtem Papier zu überziehende Metallzylinder *cy* wird durch das Uhrwerk *u* in Umdrehungen versetzt. Das Uhrwerkgehäuse kann durch Abnahme einer Seitenwand geöffnet werden. Sein Gang wird durch einen Foucaultschen Windflügel *f* reguliert. Durch den Hebel *h* wird das Uhrwerk ausgelöst. Mit dem Schlüssel *sl* wird es aufgezogen. Die von dem Uhrwerk bewegte Achse *a*¹ trägt die Friktions-scheibe *s*, die mit der Schraube *p* an die auf ihrer Achse verstellbare Friktionsrolle *r* angepreßt wird. Durch diese mit der Schraube *d* bewirkte Verstellung, die an einem Zeiger *i* kontrolliert werden kann, wird die Zylinderachse *a*² in verschiedene Geschwindigkeiten versetzt. Der Gang des Zylinders kann auch noch durch Wechsel der Räderübersetzung im Uhrwerk verändert werden. Der Zylinder samt seiner Achse kann zum Bekleben mit Papier und zur Beruſung herausgenommen werden. Nach dem Einsetzen wird er durch eine Einschnappvorrichtung von der Achse der Friktionsrolle mitgenommen. Er kann auf seiner Achse in der Höhe verschoben werden, was durch die Bewegung der Spindel *g* bewerkstelligt wird. Diese Hebung und Senkung kann auch selbsttätig durch Eingreifen des Räderwerks *se* in die Achse des Uhrwerks erzielt werden (vgl. S. 10).

Bei den neueren Konstruktionen, wie sie von den Mechanikern Petzold und Zimmermann in Leipzig in den Handel gebracht werden, sind noch einige Verbesserungen angebracht. So kann die Trommel horizontal gestellt werden, ja auch in schiefer Richtung. Auch kann ein Rollensystem mit ihr in Verbindung gebracht werden, das die Verwendung von endlosem Papier erlaubt (Typus *c* der Kymographien). In letzterem Falle kann nur mit Tinte geschrieben werden.

1) François-Franck (1894) ist es jedoch gelungen, das endlose Papier automatisch zu beruſen und zu fixieren. (Abbild. S. 749—50 der Abhandlung.)

2. Bei dem Mareyschen Kymographion (1868, Abbild. Méthode graph. S. 134, Cyon, Atl., XVII, Fig. 1) liegt die Trommel für gewöhnlich horizontal. Das Uhrwerk wird durch den Foucaultschen Windflügel reguliert (Marey scheint ihn zuerst bei Kymographien angewendet zu haben, s. Du mouve-

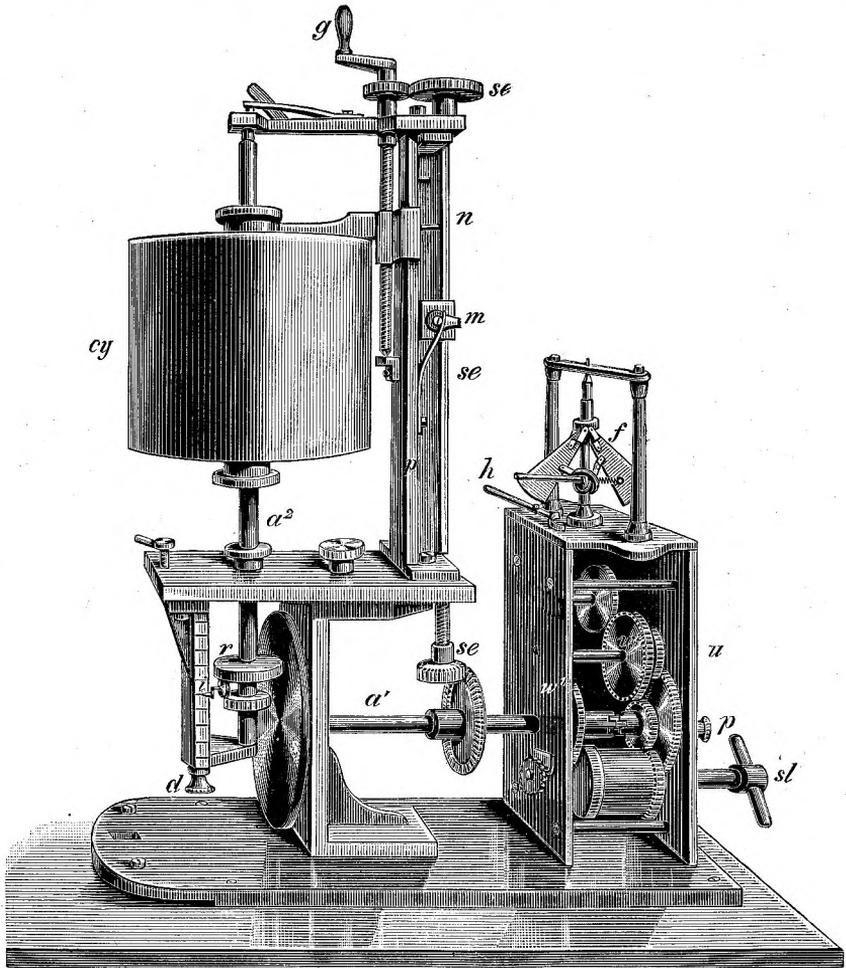


Fig. 1.

Ludwig-Baltzarsches Kymographion (nach Langendorff, Graphik S. 11).

ment dans les fonctions de la vie 1868, p. 124). Die Trommel wird zur Erzielung verschiedener Geschwindigkeiten auf verschiedene Achsen gelagert, was nach meinen Erfahrungen große Nachteile mit sich bringt. Ob in neuerer Zeit diese Übelstände beseitigt worden sind, ist mir nicht bekannt geworden. Die Registrierung auf horizontaler Schreibfläche bietet prinzipiell keine Vorteile, wie dies Marey fälschlich angenommen hat (s. S. 39).

3. Als Kymographion im gewöhnlichen Sinn (Geschwindigkeit 0,5—250 mm),

Myographion (v bis 2 m) und Polyrheotom zugleich konstruiert ist das Pantokymographion Engelmans (1894).

4. Eine elegante Konstruktion ist von Blix (1902, Abbildung S. 408) angegeben und von Sandström ausgeführt worden. Der Elektromotor, der die Trommel bewegt, läuft mit elektromagnetischer Regulation. Die Geschwindigkeit variiert von 0,05–1000 mm/sek.

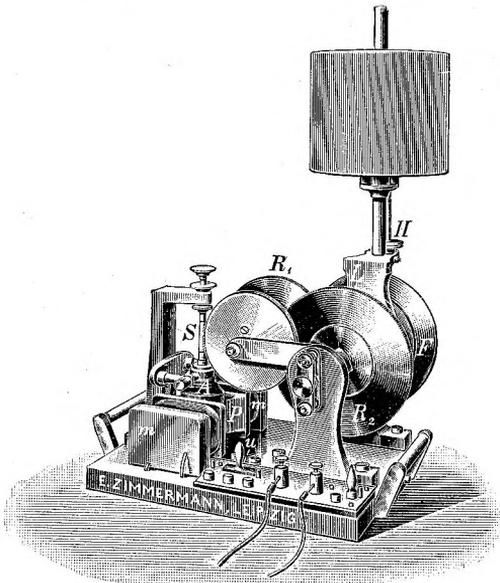


Fig. 2.
Elektro-Kymographion nach Straub.

5. Das Kymographion von Straub (1900) wird durch Elektromotor betrieben. Die Geschwindigkeit ist bequem von 0,5–260 mm regulierbar (vgl. die Abbildung).

6. Für Aufnahmen, bei denen es nicht auf einen vollständig regelmäßigen Gang ankommt, sind sehr brauchbar die von Porter (1903 und 1904) angegebenen Konstruktionen. Sie nehmen nur wenig Platz ein, besitzen genügende Verstellbarkeit der Geschwindigkeit, darunter einen durch Pendelbewegung erzielten sehr langsamen Gang von etwa einer Umdrehung in 12 Stunden.

b) Kymographien mit Schleife.

1. Das Heringsche Kymographion (Typus b) soll die Verwendung einer größeren Papierfläche ermöglichen (auch von Fr. Franck angegeben, siehe Fr.-Franck 1894). Sein Prinzip besteht darin, daß ein durch Verkleben seiner Enden zu einer geschlossenen Schleife umgewandelter Papierstreifen über zwei Trommeln geführt wird. Die eine Rolle steht mit einem Uhrwerk in Verbindung, die andere wird durch die Bewegungen des Papierstreifens mitgenommen.

2. Die ältere Heringsche Konstruktion ist verschiedentlich verändert und verbessert worden. So findet sich auch in dem Katalog von Verdin, Paris 1890, S. 5 eine Modifikation des Heringschen Kymographions nach Marey. Es wird mit Gewichten betrieben und hat einen Windflügel-Regulator mit Öldämpfung. Eine zweckmäßige Modifikation hat Hürthle (1890)

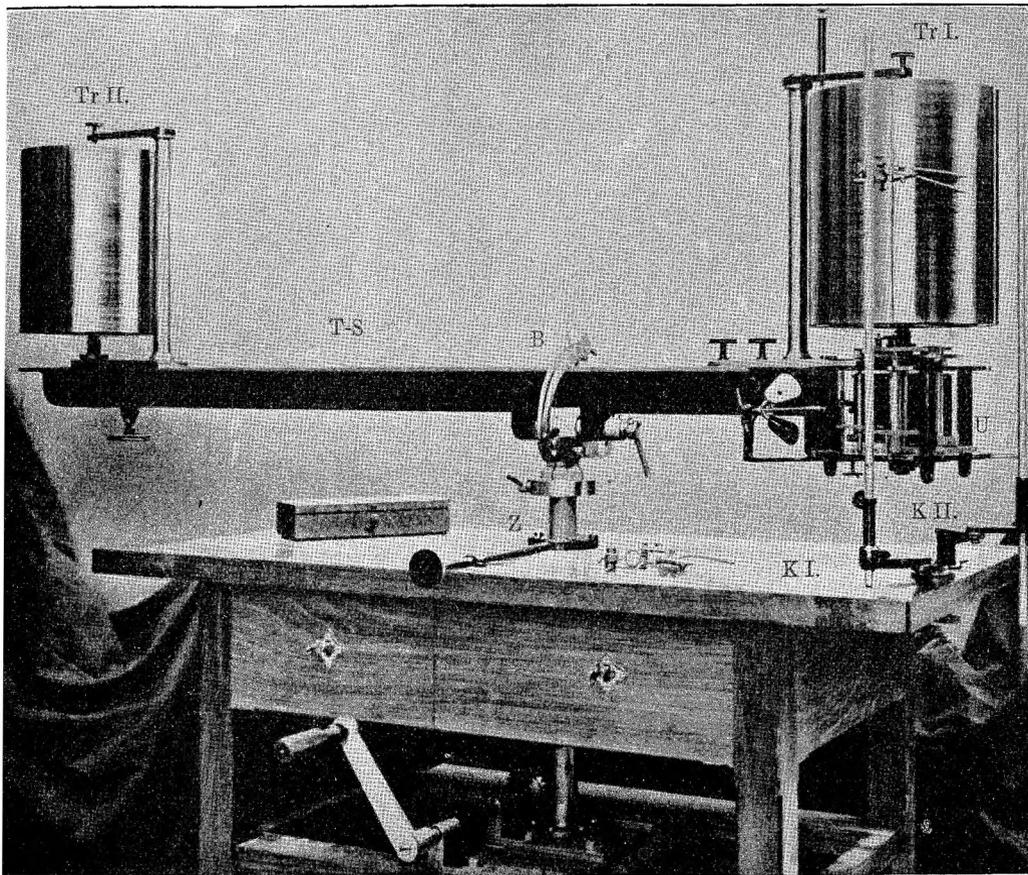


Fig. 2.

Modifikation des Heringschen Kymographions nach Hürthle.

U Uhrwerk, Tr Trommeln, B Bügel zum Umlegen, KI, II Halter für die Schreibapparate.

angegeben (siehe die Abbildung). Sie ist sehr stabil gebaut und besitzt den Vorteil, daß die Trommeln und mit ihnen die Papierschleife gehoben und gesenkt werden können. Außerdem können sie horizontal für die Registrierung oder zum Anlegen und Beruhen der Papierschleife gestellt werden.

3. Eine andere Form dieses Apparates für langsamen Gang ist von Magnus 1902 angegeben worden. (Geschw. 1—6,3 mm/sek.) Sie zeichnet sich durch einen niedrigen Preis aus.

4. Eine weitere Modifikation, ausgeführt von C. F. Palmer, London, hat Brodie 1901 auf dem internationalen Kongreß zu Turin demonstriert.

5. Für elektrischen Antrieb haben Lohmann und Rinck (1908) zweckmäßige Einrichtungen beschrieben. (Geschw. 1—200 mm/sek.)

6. Epstein (1896) hat eine ähnliche Einrichtung des Heringschen Kymographions getroffen. (Gewichts-Uhrwerk Geschw. 0,5—150 mm/sek.)

Selbstverständlich können alle Kymographien, welche die Heringsche Schleife besitzen, auch für die gewöhnliche Registrierung, bei der das Papier auf der Trommel aufgezo-gen wird, benutzt werden. Notwendig ist, daß die Schleife sich bei dem Beru-ßen nicht verzieht. Das Papier darf hierbei nicht zu stark erwärmt werden (s. unten).

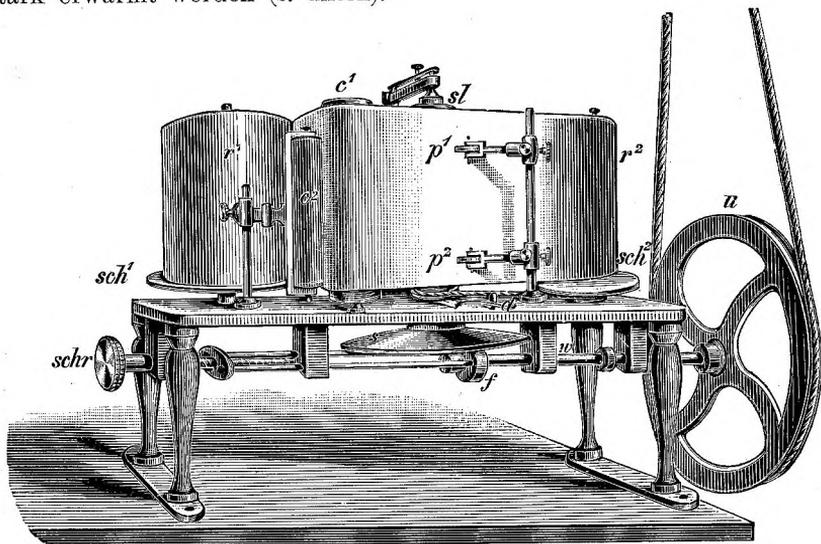


Fig. 4.

Ludwigsches Kymographion (nach Langendorff, Graphik S. 24).

c) Kymographien mit endlosem Papier.

Für Registrierung mit Tintenschreibung ist das Baltzarsche Kymographion mit Papier ohne Ende bestimmt (s. die Abbildung). Das Kymographion wird durch Motorkraft bewegt. Die Achse des Treibrades *u* überträgt ihre Bewegungen durch die verstellbare Friktionsrolle *f* auf die Friktions-scheibe *s*. Auf deren Achse sitzt die bewegende Rolle *sl*. Das Papier wickelt sich von der Rolle *r*¹ (durch verschiedene Rollen geführt) und mit den Preßröllchen *p* an die bewegende Rolle *l* angedrückt) ab und auf die Rolle *r*² auf. Die Rolle *r*² wird ebenfalls von dem Treibwerk durch einen Schnurlauf mitgetrieben; sie steckt, aber nur durch Friktion festgehalten, auf ihrer Achse auf und kann, wenn sich das Papier nicht genügend fest aufwickelt, nachgedreht werden. Eine Abbildung findet sich auch in Cyon, Atlas Taf. XIII. Marey hat in „La méthode graphique“ S. 457 ein kleines transportables Modell dieses Typus abgebildet, das wohl von Verdin, Paris, in den Handel gebracht wird.

Die Rußschreibung hat fast vollständig die Tintenschreibung, die nur mit großen Trägheitskräften durchgeführt werden kann, verdrängt. Die

Tintenschreibung kann nur für das gedämpfte Hg-Manometer oder überhaupt für stark gedämpfte Apparate mit Vorteil verwendet werden.

D. Bespannung der Trommeln, Bereußung, und Fixierung.

Das Papier das für die Registrierung verwendet wird, muß möglichst kornlos und glatt sein. Marey (La méthode graphique S. 458) empfiehlt papier glacé au blanc de zinc. Wir verwenden in der letzten Zeit Kunst-druckpapier. Eine systematische Prüfung der Papiersorten ist bis jetzt noch nicht vorgenommen worden. Es wird in Blättern von der Höhe der Registrier-trommel, und etwa 1 cm größerer Länge als ihr Umfang geschnitten und an der einen Seite gummiert. Auf die Trommel wird es möglichst fest auf-gespannt.

Die Bereußung des Papiers geschieht bei allen Instrumenten am besten durch eine Gasflamme, die entweder in der Form einer Stichflamme oder einer Bürstenflamme einer passend geformten Röhre entströmt. Die Gasbürste besteht aus einer Röhre, die mit vielen kleinen Öffnungen versehen ist. Nach meinen Erfahrungen eignet sich die Stichflamme am besten. Bei der Bereußung muß die Trommel bezw. die Heringsche Schleife sehr rasch gedreht werden. Brodie benutzt für die Bereußung der Heringschen Schleife einen besonderen Apparat, bei dem sie zur besseren Abkühlung über mit Wasser gefüllte Trommeln mit mäßiger Geschwindigkeit läuft. Hürthle hat hierfür einen Rußzerstäuber angegeben (1890). Von Marey (La méthode graphique S. 459) wird ein Wachsstock, wie er zum Anzünden der Gasflammen usw. gebraucht wird, für die Bereußung empfohlen.

Fixiert werden die Kurven durch eine Schellacklösung. Eine geeig-nete Vorschrift lautet: 10 Teile Schellack werden in der Wärme in 100 Teilen 90%igen Alkohols gelöst. Damit die Tafeln nicht zu brüchig werden, kann man etwas venezianisches Terpentin oder auch einige Tropfen Glyzerin beimischen. Im Ludwigschen Laboratorium war eine besondere Vorrich-tung für die Fixierung im Gebrauch. Sie besteht aus einer halbzylindrischen Wanne, an deren tiefstem Punkt eine Röhre mit Schlauchverbindung zu einer tubulierten Flasche führt, die mit Schellack gefüllt ist. Wird die Flasche gehoben, so füllt sich die Wanne. Für gewöhnlich steht sie unterhalb der Wanne mit der abgeflossenen Schellacklösung gefüllt. Von Zeit zu Zeit muß die Schellacklösung filtriert werden. Die Papierstreifen können oberhalb der Wanne zum Abfließen des Schellacks und Trocknen an einer Stange aufgehängt werden.

E. Gegenseitige Verstellung der Registrierapparate und des Registrierzylinders.

An dem Ludwig-Baltzarschen Kymographion befindet sich eine Vor-richtung zum Heben und Senken des Zylinders (s. Fig. 1g). Durch sie wird es möglich, mehrere Kurven hintereinander auf demselben Registrierblatt zu schreiben, falls die Höhe der Trommel hierfür ausreicht. Die Schraube ohne Ende, die zur Verstellung des Zylinders benutzt wird, kann automatisch mit dem Uhrwerk des Kymographions verbunden werden (s. Fig. 1se). Die Kurvenabszissen steigen dann schraubenförmig auf dem Zylinder in die Höhe.

Marey zieht es vor, die Registrierapparate auf kleinen Wagen anzubringen, die mit einer gewissen selbständigen Geschwindigkeit oder mit dem Kymographion verkuppelt an dem Zylinder vorbeilaufen (S. Marey, La méth. graphique S. 458, und Katalog von Verdin, Paris 1890 S. 3, 6 u. 7). Mir scheint die Ludwigsche Konstruktion unbedingt richtiger.

Blix 1902. Neue Registrier-Apparate. Pflügers Arch. 90 S. 405.

Brodie 1901. A new form of kymograph. (Physiol. Kongr.) Arch. ital. d. biologie XXXVI, S. 161.

Engelmann 1894. Het pantokymographion en eenige darmee verrichte physiologische proeven. Mitteil. d. Niederl. Akad. Siehe auch Pflügers Arch. 52, S. 603.

Epstein 1896. Über ein neues Kymographion. Zeitschr. f. Instrumentenkunde. Nov. 1896.

Fitz 1898. A water motor for actuating kymograph drum. Journ. of the Boston Soc. of med. science. Vol. II. p. 244.

François-Franck et Galante 1894. Nouvel enregistreur à bande sans fin avec enfumage et vernissage automatique. Arch. de physiol. S. 749.

Hofmann, F. B. 1907. Eine neue Reguliervorrichtung für Kymographien. Zentralbl. f. Physiol. 21, S. 721.

Hürthle 1890. Beiträge zur Hämodynamik. 4. Technische Mitteilungen. Pflügers Arch. Bd. 47, S. 1.

Lohmann und Rinck 1908. Ein Kymographion mit elektrischem Antrieb. Zeitschr. f. biol. Techn. u. Method. Bd. I, S. 192.

Magnus 1902. Ein neues Kymographion für länger dauernde Versuche. (Pharmakol. Institut Heidelberg.) Zentralbl. f. Physiol. 16, S. 377.

Marey 1868. Du mouvement dans les fonctions de la vie. S. 124.

Porter 1903. Amer. Journ. of physiol. VIII, p. XXXV.

— 1904. Ebenda. X, p. XXXIX.

Straub 1900. Ein neues Kymographion mit Antrieb durch Elektromotor. Pflügers Arch. Bd. 81.

Wertheim-Salomonson. Pflügers Arch. 120, S. 618.

Kapitel 3.

Chronographie und Signalschreibung.

Außer den Kurven, die den Ablauf des untersuchten Vorganges darstellen, werden in den meisten Fällen noch andere zur Feststellung der Abhängigkeit des Vorganges von verschiedenen Variablen von der Registrierfläche aufgenommen.

So werden vor allem Zeitintervalle — hauptsächlich zur Kontrolle der gleichmäßigen Bewegung der Registrierfläche — je nach der Art der Registrierung von wechselnder Dauer verzeichnet. Diese Markierung bezeichnet man als Chronographie.

Aber auch andere Signale werden aufgenommen, so Anfang und Ende einer Reizung usw.

Diese Marken, die Zeitmarken, Reizmarken u. dgl. können unmittelbar aufgeschrieben werden, so durch Hebel bei dem Ludwigschen Kymographion ohne Ende, oder durch eine Stimmgabel oder den Jaquetschen Chronographen (das Nähere s. unten). Meistens zieht man vor, die Marken durch Lufttransmission oder elektrische Transmission zu verzeichnen. Bei der

ersteren Übertragungsart wird durch den Signalgeber — Schlüssel, Hebel, Stimmgabel, Metronom usw. — eine Mareysche Senderkapsel in Bewegung versetzt und die Bewegung durch Lufttransmission auf eine Registriercapsel übertragen. Bei der elektrischen Transmission wird allgemein durch den Signal- oder Zeitgeber ein Strom geschlossen und geöffnet und dadurch ein Markiermagnet in Funktion gesetzt.

Beide Signalübertragungen — durch Luft — oder elektrische Transmission — besitzen eine Latenzzeit, die unter Umständen bestimmt werden muß. Sie wird dadurch festgestellt, daß man die Bewegung des Unterbrechers und die Bewegung des Markiermagneten gleichzeitig auf die Trommel aufschreibt. Ganz ähnlich läßt sich die Latenz der Luftsignale bestimmen (vgl. Marey, Méth. graph. S. 478). Bei hämodynamischen Versuchen spielt die Latenz wohl nie eine Rolle. (Vgl. Marey, Méth. graph. S. 475 u. Langendorffs Graph. S. 157.)

A. Registriermagnete und Registriercapseln.

Zur Markierung der Zeitintervalle und anderer wichtiger Momente werden besondere Apparate benutzt. Am wenigsten Platz nehmen passend konstruierte Markiermagnete ein. (Nach Gscheidlen S. 111 ist das Prinzip der elektromagnetischen Signale von dem Physiker Locke in „The Americ. Journ. of science and arts Ser. II, Vol. VII, p. 206, 1849 zuerst angegeben worden.) Für die Konstruktion dieser Markiermagnete sind dieselben Prinzipien im Auge zu behalten, die in den nächsten Kapiteln und besonders in Kap. 4 näher auseinander gesetzt werden. Danach muß der Hebel möglichst kurz sein. Ein kurzer Hebel kann um so unbedenklicher angewandt werden, als die Zeitmarken nur durch niedrige, höchstens 2—3 mm hohe Ordinaten dargestellt zu werden brauchen, also die Krümmung der Ordinaten keine Rolle spielt. Der Pfeil-Kroneckersche Magnet (abgebildet Langendorff Graphik S. 154 Beruht auf dem Prinzip des Telephons“?) ist nach dieser Richtung nicht zweckmäßig konstruiert. Ob die Feder-Kraft, die den Anker in die Ruhelage wieder zurückführt, durch eine an einem Ende eingeklemmte Feder oder an beiden Enden eingeklemmte Feder, wie dies bei dem Pfeil-Kroneckerschen Magneten der Fall ist, geliefert wird, ist prinzipiell vollständig gleichgültig. Von den Schwingungsformen, in die die Feder gerät, kommt unter allen Umständen nur die eine, die Hauptschwingung, wesentlich in Betracht. Es hat also keinen Wert, die Konstruktion dem Telephon ganz oder teilweise nachzubilden. Durch die Kürze des Hebels wird wesentlich das geringe Trägheitsmoment der Vorrichtung bedingt. Die Masse des Ankers kann so gering gehalten werden, daß sie gegenüber der (reduzierten) Masse des Hebels nicht in Betracht kommt. Wenn man die ganze Vorrichtung kompendiös halten will, so sind die Drahtspulen so klein als möglich zu gestalten. Durch Verringerung des magnetischen Widerstands der Spule, d. h. durch Verkürzung der Luftstrecken erzielt man eine starke magnetische Wirkung und kann dann mit wenigen Windungen ausreichen. Der Schreibhebel läßt sich nach dem Prinzip der freien Hebel (s. Kapitel 4) einrichten. Der Versuch einer Theorie der Markiermagnete findet sich in Marey, Méth. graphique S. 472.

Zur Auslösung der Bewegung dieser Markiermagnete dienen in den Stromkreis geschaltete Kontakte, die durch verschiedenartige Uhrwerke, Stimmgabeln oder schwingende Federn getrieben werden (S. unter B.).

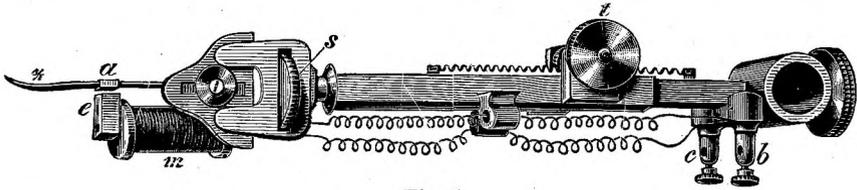


Fig. 5.

Signal von Marey. Schwingungszahl 50/Sec. Durch die Schraube *s* kann die Feder auf $N = 100/\text{Sec.}$ abgestimmt werden. (Nach Langendorff Graphik S. 139. Vgl. auch Marey Méth. graph. S. 139 u. 467.)

Auch Mareysche Kapseln (sog. Luftsignale Marey, Méth. graph. S. 141), die ihre Bewegung durch Lufttransmission von denselben Senderapparaten erhalten wie die Markiermagnete, können zur Markierung der Zeitintervalle usw. verwendet werden.

Ich nehme hier die Abbildungen von den bekannten von Verdin, Paris, ausgeführten Markiermagneten von Marey und Deprez auf, deren Konstruktion wohl ohne weiteres aus der Zeichnung hervorgeht. Auch der von der Harvard Co. sowie ein von mir angegebener kleiner Markiermagnet

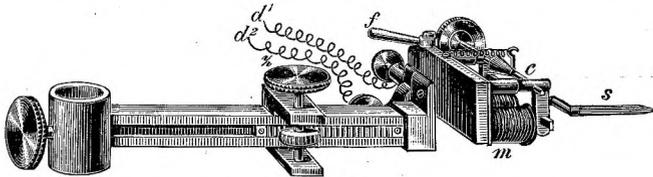


Fig. 6.

Signal von Deprez. (Nach Langendorff Graphik S. 153. Vgl. auch Marey, Méth. graph. S. 140 u. 467.)
Durch den Konus *c* Größe der Ankerbewegung, durch *f* Spannung der Feder zu regulieren.

sind prinzipiell recht konstruiert. (S. Petter, Leistungen des Sphygmographen.) Ältere Konstruktionen von Wittich und Brondgeest sind in Langendorffs Graphik S. 127–130 angeführt und abgebildet. Hier findet sich auch S. 155 ein Doppelsignal. Die dem Ludwigschen Kymographion beigegebene Vorrichtung (s. Cyon Atlas XVIII, Fig. 3) besteht aus einem direkten Signalhebel und einem Markiermagneten. Eine eigentümliche Konstruktion für intermittierende Registrierung ist in Marey, Méth. graphique S. 468 abgebildet. Für die automatische Hervorhebung der Striche 5, 10, 15 usw. hat Ludwig die in Cyon, Atlas XIX, Fig. 1 u. 2 abgebildete Vorrichtung konstruiert.

B. Zeitgeber.

Als Zeitgeber für die Auslösung der Bewegungen der Markiermagnete oder der Mareyschen Kapsel, teilweise auch als selbständige Apparate, finden folgende Vorrichtungen Verwendung:

a) Ein Pendel mit Kontaktvorrichtungen. Es kann natürlich nur für kürzere Versuche benutzt werden. (vgl. u. a. Langendorff Graphik S. 121

Pendel mit Quecksilberkontakt, ferner das Buffsche Pendel mit Platinkontakt S. 122 oder den Quecksilber-Unterbrecher von Krille S. 123.)

b) Ein Pendel-Uhrwerk. Hierzu kann jede gutgehende Uhr oder auch ein Metronom (vgl. das Metronom mit Quecksilberkontakt, Langendorff, Graphik S. 124) verwendet werden. Um bequem verschiedene Marken hervorzuheben und zugleich die Minuten durch besondere Intervalle von 1 Sekunde aufwärts zu markieren, hat Bowditch 1871 ein Uhrwerk angegeben, das von Baltzar im Ludwigschen Laboratorium ausgeführt worden ist. Das Uhrwerk ist von Garten in dem 2. Bd. 3. Abt. S. 368 an der Hand einer Abbildung beschrieben. (Vgl. auch Cyon, Atlas, Taf. XXXIX. Fig. 1.)

c) Die Brodiesche Uhr. Sie wird elektromagnetisch betrieben. Mit ihr können die Intervalle in ähnlicher Weise wie bei der Baltzarschen Uhr variiert werden. (Verfertiger: C. Palmer, Upper Tilse Hill London.)

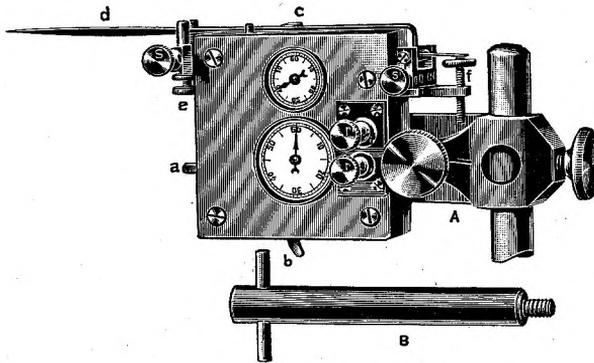


Fig. 7,

Chronometer von Jaquet.

Hebel a zum Auslösen und Arretieren, b zum Einstellen auf den 0-Punkt.

d) Jaquet (1891) beschreibt das graphische Chronometer, das im wesentlichen aus einer großen Ankeruhr besteht, deren Ankerrad einen Schreibhebel anstößt. Der Schreibhebel kann auch als Kontaktgeber fungieren und so zur elektrischen Übertragung der Zeitmarkierung dienen, die je nach der Stellung eines Stiftes c in $\frac{1}{5}$ oder ganzen Sekunden-Intervallen erfolgt. Das Chronometer wird ähnlich wie bei den Sportsuhren durch Druck auf einen Knopf ausgelöst oder wieder gehemmt. Jaquet hat die Genauigkeit dieses Chronometers durch verschiedene Methoden geprüft. Ich gebe hier seine Kritik wieder. Besonders wenn man immer je zwei aufeinander folgende Fünftelsekunden verwendet, ist die Genauigkeit für physiologische Versuche vollständig hinreichend. Daß aber zwischen einem Hin- und einem Hergang der Unruhe Differenzen auftreten, hat Blix (1902) konstatiert. Nach ihm zeigt der Jaquetsche Chronograph in horizontaler Lage 4% Verzögerung. Viel größer hat Jaquet die Fehler einer elektrisch betriebenen Stimmgabel, nämlich bis zu 1% gefunden. Noch ungenauer ist der auf Anregung von Kronecker durch Grunmach veröffentlichte Zungenpfeifenchronograph. Ein Sekundenpendel, das zur elektrischen Registrierung verwendet wird, ist nur unter gewissen Vorsichtsmaßnahmen, nämlich, wenn es richtig senkrecht

aufgehängt wird, und wenn immer nur volle Schwingungen verwendet werden (ein Hin- und Hergang), hinreichend genau. Der Jaquetsche Chronograph ist ein vielseitig verwendbares Instrument.

e) Eine Stimmgabel, die am besten elektromagnetisch betrieben wird. Die Abbildung zeigt die Einrichtung einer von Zimmermann in Leipzig konstruierten Form der Elektromagnete und der Kontakte dieses viel gebrauchten Apparates. Er besitzt alle wünschenswerten Möglichkeiten der Verstellung, so daß er für eine bestimmte Stromstärke zum gleichmäßigen

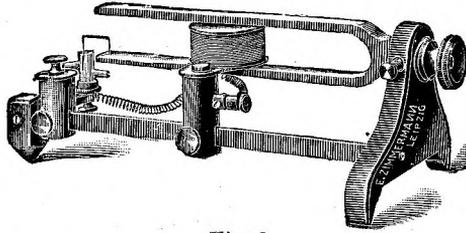


Fig. 8.
Elektromagnetisch betriebene Stimmgabel als Zeitgeber.

Arbeiten gebracht werden kann. Der Markiermagnet, der hier direkt in den Erregungsstrom eingeschaltet wird, muß natürlich sehr kurze Schwingungen ausführen. Am besten wird dies durch kurzhebelige Markiermagnete erreicht (s. oben und das Kapitel über die Schreibhebel). Unhandlich wird der Apparat, wenn man zur Registrierung der Schwingungen der selbsttätigen Stimmgabel eine zweite Registrierstimmgabel benutzt, die durch die Schwingungen der ersten Stimmgabel in Bewegung wie ein Markiermagnet versetzt wird. Die Registrierstimmgabel muß auf die erste so abgestimmt sein, daß die Zahl ihrer Eigenschwingungen ein einfaches Multiplum der Schwingungen der ersten ist. Auch eine derartige Stimmgabel ist hier abgebildet.

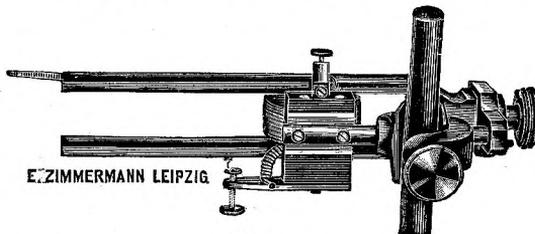


Fig. 9.
Registrierende elektromagnetische Stimmgabel (selbsttätig oder resonierend).

Die Stimmgabel kann nach Ewald (1889) auch durch einen saugenden Luftstrom ständig in Schwingungen versetzt werden. Die in dem Luftstrom durch die Schwingungen entstehenden Druckschwankungen werden durch eine Mareysche Kapsel registriert, die seitlich durch einen Schlauch angeschlossen ist. Nach Hürthle (1898) ist die Membran der Trommel am besten straff gespannt. Statt des Hebels der Kapsel bringt Hürthle eine kleine Stahlfeder an, die synchron mit der Stimmgabel schwingt. (Nach Marey, Méth. graph. S. 136 ist die Stimmgabel zuerst von dem Physiker Young zu

chronographischen Zwecken verwendet worden. Helmholtz hat wohl die erste elektromagnetisch betriebene Stimmgabel konstruiert.)

f) Der Bernsteinsche Unterbrecher. Der Apparat ist von Garten in Bd. II S. 368 beschrieben.

g) Die von Kagenaar konstruierten schwingenden Stäbe, das Chronoskop, die von Engelmann zur Registrierung der Zeitintervalle verwendet wurden. Mir scheinen sie den Vorzug vor dem Bernsteinschen Unterbrecher (s. Langendorffs Graphik, S. 141) zu verdienen. Man braucht ja nicht die Zeitintervalle ganz allmählich abtufen zu können, sondern nur Intervalle zu registrieren etwa in Stufen von $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{20}$, $\frac{1}{50}$, $\frac{1}{100}$ usw. Sekunden. Die Instrumente müssen in bezug auf die magnetische Kraft und die elastische Kraft stets speziell für diese Intervalle konstruiert werden; sonst funktionieren sie nicht regelmäßig. Man wird sich also am besten, wie dies bei dem Kagenaaarschen Chronoskop der Fall ist, eine Serie von — 6 — speziell auf diese Intervalle abgestimmten Stäben vorrätig halten. (Vgl. Langendorffs Graphik S. 141.)

h) Durch in regelmäßigen (durch Hahn regulierbaren) Intervallen ausfließende Tropfen kann nach Grützner (1887) auch eine Zeitregistrierung bewirkt werden.

i) Grunmach (1880) verwendet zur Zeitregistrierung einen Zungenpfeifenchronographen, den er auf Anregung von Kronecker konstruiert hat. Die Zunge einer passend konstruierten Zungenpfeife ist mit einer Schreibspitze versehen, welche die Schwingungen aufschreibt. An die Zungenpfeife ist ein Resonator angeschlossen, der auf einen bestimmten, nämlich den dritten Oberton der Pfeife abgestimmt sein soll. Die Pfeife wird durch einen Apsirator in Gang gesetzt. Dieser Apparat bildet einen Teil eines Polygraphions. Die Zungenpfeife kann auch als Unterbrechungsapparat konstruiert werden zum Anregen eines Markiermagneten. Der Apparat ist ebenfalls in dem 2. Band 3. Abt. S. 371 dieses Handbuchs von Garten beschrieben und abgebildet. Eine Kritik siehe oben unter d).

k) Die Funkenchronographie (s. Langendorffs Graphik, S. 142—144), die darauf beruht, daß man in bestimmten Intervallen Funken von der mit einem Pol eines Induktoriums in Verbindung stehenden metallischen Schreibspitze des Registrierapparates durch das Schreibpapier auf die mit dem anderen Pol des Induktionsapparates verbundene Trommel des Kymographions überspringen läßt, hat nur selten Anwendung gefunden und ist auch nicht zu empfehlen, weil die metallische Schreibspitze des Hebels eine außerordentliche Vergrößerung des Trägheitsmomentes des Hebels bedingt. Dagegen ist die Anbringung von Zeitmarken in der registrierten Kurve bei den optischen Verfahren sehr einfach durchzuführen ohne Schädigung wesentlicher Eigenschaften des Registrierapparates, dadurch daß man den Lichtstrahl durch einen von einem Uhrwerk oder dgl. getriebenen Hebel periodisch unterbricht. Die Registrierung der Kurven auf schwingender Stimmgabelplatte, wie sie von Landois durchgeführt worden ist, hat offenkundige Nachteile, so daß eine nähere Diskussion des Verfahrens nicht notwendig erscheint. (Vgl. Langendorffs Graphik, S. 144—147.)

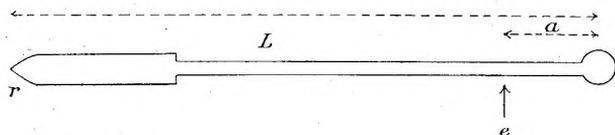
- Bernstein 1871. Untersuchungen über den Erregungsvorgang im Nerven- und Muskel-systeme. Heidelberg.
 Blix 1902. Neue Registrierapparate. Pflügers Archiv 90 S. 405.
 Bowditch 1871. Über die Eigentümlichkeiten der Reizbarkeit, welche die Muskelfasern des Herzens zeigen. Arbeiten aus der physiologischen Anstalt zu Leipzig.
 Grunmach 1880. Ein neues Polygraphion. Du Bois-Reymonds Archiv S. 439.
 Grützner 1887. Ein neuer Zeitmarkierungsapparat. Pflügers Archiv 41. S. 290.
 Jaquet 1891. Studien über graphische Zeitregistrierung. Zeitschr. f. Biologie XXVIII, S. 3.

Kapitel 4.

Hebelapparate.

A. Einleitung und Theorie.

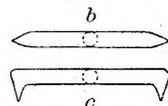
Bei den meisten Registrierapparaten wird eine fortschreitende Bewegung am Ende in die drehende eines Hebelsystems verwandelt. Von den bekannteren Registrierapparaten macht allein das Quecksilbermanometer in Verbindung mit einem Schwimmer eine Ausnahme. Als solche Endapparate dienen entweder mit einer Schreibspitze versehene Stäbe, die Schreibhebel,



r Registrierpunkt
e Angriffspunkt
L Länge des Hebels
a Kurzer Hebelarm

Fig. 10a.

Hebelschema



Hebelachsen
 Fig. 10b, c

oder bei der wichtigsten optischen und photographischen Registrierung die Registrierspiegel. In manchen Fällen bildet der Hebel in Verbindung mit einem unausdehnbaren Faden das ganze Registrierinstrument, so bei dem Längenschreiber der Muskelzuckungen oder bei den kardiographischen Methoden, wie z. B. dem sogenannten Suspensionsverfahren.

Es ist von der höchsten Bedeutung, die mechanische Wirkungsweise dieser viel gebrauchten Instrumente zu analysieren. Zunächst verweise ich hierfür auf die Erörterungen S. 113 des Abschnittes Muskelphysiologie dieses Handbuchs von M. v. Frey. Ich ergänze sie durch einen Auszug aus meiner Abhandlung „Prinzipien der Konstruktion von Schreibhebeln“ in Zeitschr. f. Biol. 45, S. 480.

An dem Hebel sind folgende ausgezeichnete Punkte zu beachten (vgl. Fig. 10 a, b, c): die Achse, ferner der Punkt, an dem die Kraft angreift, d. h. der Angriffspunkt und der Registrierpunkt, die Schreibspitze. Der Angriffspunkt der Bewegung oder der Kraft ist bei den komplizierteren Systemen meist der Endpunkt des Systems, d. h. der Punkt, an dem die elastischen Übertragungsmittel endigen (s. Kap. 6, S. 35).

Die Achse kann in zweierlei Weise gelagert sein. Gewöhnlich sind ihre Enden zugespitzt und lagern in konischen Vertiefungen, deren Achse mit der

Richtung der Hebelachse übereinstimmt (s. Fig. 10b). Man kann eine derartige Lagerung als eine zwangsläufige bezeichnen. Mit viel weniger Reibung arbeitet eine Lagerung, bei der die Spitzen senkrecht zu der Hebelachse stehen (s. Fig. 10c), sich der Hebel also wie ein Wagebalken auf den konischen Lagern dieser Spitzen dreht. Wenn man es irgendwie einrichten kann, soll man die letztere Lagerung anwenden. Der Nachteil der ersten Anordnung besteht weniger darin, daß ihre Reibung größer, als daß sie unregelmäßig ist. Nähert man die konischen Lager einander zu sehr, so wird die Achse festgeklemmt. Dies kann schon durch Temperatureinflüsse bewirkt werden. Entfernt man sie zu weit voneinander, so schlottert die Achse. Die Anordnung stellt also außerordentliche Anforderungen an die Technik. Die Achsen, die sich nach der zweiten Anordnung drehen, habe ich als freie Achsen bezeichnet. Die Spitzen der freien Achsen müssen natürlich durch eine genügend große Kraft an die Unterlage angedrückt werden, sonst werden sie bei der Bewegung abgeschleudert. Diese Trägheitskraft hängt von der Beschleunigung, die dem Hebel erteilt wird, ab. Die Kraft, mit der der Hebel angedrückt wird, muß also immer größer sein als diese Trägheitskräfte¹⁾. Es ist daher sehr wichtig, den Auflagerungsdruck zu bestimmen, der durch die Trägheitskräfte erzeugt wird. Durch ihn wird die Kraft, mit der eine Feder oder die Schwere die Spitze andrücken muß, bedingt. Man wird diese Kraft nicht unnötig vergrößern, weil sonst die Spitze in die konische Vertiefung eingepreßt wird. Derartige freie Achsen wird man auch bei der Verbindung des Endpunktes eines komplizierteren Systems mit dem Hebel, die zur Verwandlung der gradlinigen in die drehende notwendig ist, anwenden, wie Petter und ich dies bei unserem Sphygmographen konsequent durchgeführt haben. Für diese Verbindung ist die Herstellung zwangsläufiger Lagerungen wegen der Kleinheit der Teile im allgemeinen noch schwieriger als bei der Lagerung der Hebelachse. Man konstruiert also hier viel besser diese Gelenke als freie Schlottergelenke und hält den an diesen Stellen entstehenden durch die Trägheitskräfte hervorgebrachten Auflagedrücken durch die Schwere oder durch Federkraft das Gleichgewicht. Wolff hat solche Verbindungen kraftschlüssige Gelenke genannt (s. Bd. II, Abt. III, S. 95 dieses Handbuchs, Artikel von v. Frey).

Danach kommt es für die Hebel auf folgende Größen an, die sämtlich von Bedeutung sind:

a) Das Drehungsmoment der bewegenden Kraft.

Es ist gleich der Größe der bewegenden Kraft, multipliziert mit der Entfernung des Angriffspunktes von der Achse.

b) Das Trägheitsmoment des Hebels.

Das Trägheitsmoment ist gleich dem Ausdruck $\Sigma(mr^2)$. In manchen Fällen kann es experimentell bestimmt werden, so bei solchen Apparaten, die durch die Schwere in Schwingungen versetzt werden können. Will man auf diese Weise z. B. bei einem gewöhnlichen Schreibhebel das Trägheitsmoment bestimmen, so lockert man seine Achse möglichst in den Lagern,

1) Die Reibung kann wohl stets vernachlässigt werden.

daß er leicht beweglich wird, und läßt ihn einige Schwingungen ausführen, deren Dauer entweder direkt durch Registrierung der Schwingungen auf einer beruhten Trommel aufgeschrieben wird, oder optisch dadurch, daß man ihn vor einem beleuchteten Spalt schwingen läßt. Es entstehen dann entsprechend den Durchgangszeiten des Hebels durch den Spalt helle Striche auf der hinter dem Spalt sich bewegenden photographischen Platte. Außer der Schwingungsdauer hat man zu bestimmen die Entfernung s des Schwerpunkts von der Achse. Ich führe das so durch, daß ich den Hebel an einer Fadenschlinge aufhänge und ihn so lange in der Schlinge hin und her schiebe, bis er horizontal schwebt. Bei diesem Aufhängepunkt liegt der Schwerpunkt. Das Trägheitsmoment berechnet sich dann nach der Formel:

$$\Theta = \frac{T^2 M g s}{4 \pi^2} \dots \dots \dots (1)$$

In einer Reihe von Fällen wird es nicht möglich sein, auf diese Weise das Trägheitsmoment zu bestimmen, da der Apparat nicht in Schwingungen versetzt werden kann. So müßte man die Achse der freien Hebel (s. unten) immer erst passend umgestalten, wenn man mit ihnen Pendelschwingungen erzeugen wollte. Bei den Spiegelapparaten (s. Kap. 5) ist das ganze System so klein, daß es nur selten möglich sein wird, das Trägheitsmoment experimentell zu ermitteln. In allen diesen Fällen wird man am besten das Trägheitsmoment aus den Dimensionen und der Massenverteilung berechnen. Selbst wenn die Form des Körpers und die Massenverteilung nicht ganz genau bestimmbar ist, wird die Berechnung doch für die Schätzung der Leistung des Apparates genügend genau. Meistens reicht eine Genauigkeit bis auf 20 %. Die Ausdrücke für die Trägheitsmomente von häufig vorkommenden Körperformen finden sich in vielen Lehrbüchern der Mechanik. Ich habe einige der wichtigsten, wie sie für die Berechnung von Hebelachsen und Hebeln in Betracht kommen, in meiner oben zitierten Abhandlung (1903 S. 481) zusammengestellt. Sie werden für denjenigen, der sich über die Leistung seiner Apparate unterrichten will, sehr nützlich sein. Man sollte nie versäumen, auf Grund dieser Formeln die einfache Schätzung des Trägheitsmoments durchzuführen und die berechneten Werte zu protokollieren. Die Masse des Hebels allein anzugeben, hat keinen Sinn.

Ich gebe hier die wichtigsten Formeln wieder:

a) In den meisten Fällen kann der Hebel als eine gerade Strecke L mit gleichförmig verteilter Masse aufgefaßt werden. Seine Drehachse liegt senkrecht zu dieser Strecke an ihrem einen Ende. Masse der Längeneinheit = μ . Gesamtmasse = M . Die Masse der Achse kommt hier nicht in Betracht. Trägheitsmoment:

$$\Theta = \frac{L^3}{3} \mu = \frac{M L^2}{3} \dots \dots \dots (2)$$

b) Kreisfläche (Radius r) gleichmäßig mit Masse belegt. Masse der Flächeneinheit = μ . Achse ein Durchmesser des Kreises. So ist ein Registrierspiegel gestaltet.

$$\Theta = \frac{r^4 \pi}{4} \mu = \frac{M r^2}{4} \dots \dots \dots (3)$$

c) Parallelepipid von den Seiten 2a, 2b, 2c. Achse parallel durch die Mitte der zu a senkrechten Fläche. Dichte = σ .

$$\Theta = \frac{8abc(b^2 + c^2)\sigma}{3} = \frac{M(b^2 + c^2)}{3} \dots \dots \dots (4)$$

d) Moment eines Zylinders. Radius = r. Höhe = h. Drehachse die geometrische Achse.

$$\Theta = \frac{r^4 \pi h \sigma}{2} = \frac{Mr^2}{2} \dots \dots \dots (5)$$

e) Moment eines Zylinders. Drehachse am Ende des Zylinders senkrecht zu seiner geometrischen Achse.

$$\Theta = M \left(\frac{h^2}{3} + \frac{r^2}{4} \right) \dots \dots \dots (6)$$

Ist r klein gegenüber h, so kann man die Formel (1) benutzen.

f) Moment eines Konus von der Höhe h und dem Radius r der Grundfläche. Drehachse die geometrische Achse des Konus.

$$\Theta = 0,3 Mr^2 \dots \dots \dots (7)$$

g) Moment eines Konus. Drehachse senkrecht zu der geometrischen Achse durch die Spitze des Konus.

$$\Theta = 0,6 M \left(h^2 + \frac{r^2}{4} \right) \dots \dots \dots (8)$$

c) Reduzierte Masse des Hebels.

Wie oben auseinandergesetzt wurde, handelt es sich bei den Registrierungen fast immer um die Umwandlung einer geradlinig fortschreitenden Bewegung in eine drehende Bewegung. So wird z. B. die geradlinige Bewegung des Mittelpunktes einer Manometermembran in eine drehende des Hebels verwandelt. An der Verbindungsstelle dieser beiden Apparate müssen entsprechende Schaltstücke für die Umwandlung der einen Bewegung in die andere angebracht sein. Für die Analyse des Systems ist es von grundlegender Bedeutung, die Massenwirkung der einen Bewegung zu derjenigen der anderen summieren zu können. Da die Winkelbewegung des Hebels immer nur klein ist, so kommen die Änderungen, die der im allgemeinen rechte Winkel zwischen geradliniger Bewegung um den Hebel erfährt, nicht in Betracht. Es ist die Massenwirkung des Hebelsystems zu ersetzen durch die Wirkung einer Masse, die sich ebenso bewegt wie der Angriffspunkt (s. Kritik S. 554). Der wichtige Ausdruck für diese reduzierte Masse lautet einfach: Die reduzierte Masse des Hebels, d. h. diejenige Masse, die, an der Verkoppelungsstelle der fortschreitenden und der drehenden Bewegung angebracht, dieselbe Wirkung auf die Bewegung des Systems ausübt wie der Hebel, ist gleich dem Trägheitsmoment Θ des Hebels, dividiert durch das Quadrat der Entfernung der Verkoppelungsstelle von der Achse a.

$$m = \frac{\Theta}{a^2} \dots \dots \dots (9)$$

Durch die Aufstellung dieses Begriffes wird die mechanische Analyse aller Hebelapparate, so der Muskelhebel, des Sphygmographen, der Hebelmanometer und der Mareyschen Kapsel, außerordentlich erleichtert.

Aus der Formel kann man eine für die Konstruktion der Schreibhebel sehr wichtige Folgerung ziehen. Berechnet man die reduzierte Masse eines Hebels mit gleichförmig verteilter Masse — im allgemeinen kann man alle Schreibhebel als solche Gebilde auffassen (s. Formel 2) — so erhält man folgenden Wert: (v = Hebelvergrößerung)

$$m = \frac{v^2 L \cdot \mu}{3} \dots \dots \dots (10)$$

Man sieht, daß die Größe der reduzierten Masse nicht allein von der Hebelvergrößerung abhängt, sondern auch noch von der Länge. Es resultiert hieraus die Vorschrift, die Hebel möglichst kurz zu gestalten. Sehr klar wird dies, wenn man die Güte des Hebelsystems, dieses als bewegungsregistrierendes System aufgefaßt, nach der Definition in Kapitel 6, Formel 31 berechnet. Sie wird zu:

$$G = \frac{v}{m} = \frac{3}{v L \mu} \dots \dots \dots (11)$$

Die Verkürzung des Hebels findet aus technischen Gründen ihre Grenze dadurch, daß man, um die nötige Vergrößerung zu erzielen, den kurzen Hebelarm a (s. Fig. 10a) zu klein machen muß. Wie Petter gezeigt hat („Kritische Studie“ S. 34), kann, um diesen technischen Schwierigkeiten zu entgehen, ein Doppelhebel angewandt werden, dessen reduzierte Masse bei zweckmäßiger Konstruktion nicht wesentlich größer zu sein braucht als diejenige des einfachen kurzen Hebels. Die reduzierte Masse dieses Systems bestimmt sich nämlich nach der Beziehung

$$m = \frac{\mu}{3} v^2 \left(\frac{L_1}{v^2} + L_2 \right).$$

Sie ist also nur unwesentlich größer als in dem Fall, wenn nur der einfache zweite Hebel die ganze Vergrößerung v übernimmt. Diese Konstruktion besitzt alle Vorteile eines einfachen kurzen Hebels. Der kurze Hebel ist um so vorteilhafter, als er, ohne die Gefahr von dynamischen Durchbiegungen (s. unten) befürchten zu müssen, wesentlich dünner gehalten werden kann als der lange Hebel, d. h. seine spezifische Masse kann wesentlich kleiner als bei diesem genommen werden. Wenn also die Krümmung der Ordinaten, die stets bei der Registrierung durch Seitenschreibung vorhanden ist, nicht zu sehr stört, wird man immer einen kurzen Hebel einem langen vorziehen.

d) Das Drehmoment, das durch die Schwere hervorgebracht wird.

Das Drehmoment, das durch die Schwere des Hebels erzeugt wird, ist gleich dem Produkt aus dem Gewicht des Hebels mit der Entfernung des Schwerpunktes von der Drehachse in horizontaler Richtung gemessen. Es ist also für den horizontal gelagerten Hebel

$$= Mg \cdot s, \dots \dots \dots (12)$$

wenn s die Entfernung des Schwerpunktes von der Achse beträgt.

e) Der Auflagedruck an der Achse.

Durch eine in der Entfernung p von der Achse angrëfende Kraft P wird an der Achse der Auflagedruck hervorgerufen:

$$A = \frac{P(a-p)}{a} \dots \dots \dots (13)$$

Die Schwere des Hebels bringt folgenden Auflagedruck hervor:

$$A = \frac{Mg(a-s)}{a} \dots \dots \dots (14)$$

Die Trägheitskräfte, die aus der dem Hebel erteilten Geschwindigkeit oder der Beschleunigung resultieren, rufen einen Auflagedruck hervor. Seine Horizontalkomponente, durch die Zentrifugalkraft erzeugt, ist gleich:

$$A = \left(\frac{d\vartheta}{dt}\right)^2 Ms = \left(\frac{da}{dt}\right)^2 \frac{Ms}{a^2} \dots \dots \dots (15)$$

$\left(\frac{d\vartheta}{dt} = \text{Winkelgeschwindigkeit, } \frac{da}{dt} = \text{Geschwindigkeit des Angriffspunktes}\right).$

Die senkrechte Komponente des durch die Trägheitskräfte erzeugten Auflagedrucks ist gleich:

$$\frac{1}{a} \frac{d^2\vartheta}{dt^2} = (\Theta - Ms a) = \frac{d^2 a}{dt^2} \left(\frac{\Theta}{a^2} - \frac{Ms}{a}\right) \dots \dots \dots (16)$$

Liegt die Achse in einer Vertiefung, so muß man die Kraft, welche die Achse entlang der Seitenflächen der Vertiefung zum Gleiten zu bringen sucht, durch Zerlegung des horizontalen und senkrechten Auflagedrucks in die entsprechenden Komponenten berechnen.

f) Der Auflagedruck an dem Angriffspunkt (Rückwirkung).

Durch die oben definierte Kraft P wird ein Auflagedruck erzeugt, gleich:

$$\frac{Pp}{a} \dots \dots \dots (17)$$

Die Schwere des Hebels bewirkt einen Auflagedruck von:

$$\frac{Mgs}{a} \dots \dots \dots (18)$$

Die Trägheitskräfte erzeugen einen Druck von:

$$-\frac{\Theta}{a^2} \frac{d^2 a}{dt^2} \dots \dots \dots (19)$$

Spezielle Beispiele für diese wichtigen Größen sind in der zitierten Abhandlung (1903) angegeben.

g) Die dynamischen Durchbiegungen des Hebels.

In meiner Abhandlung über die Hebel ist abgeleitet, daß die dynamischen Durchbiegungen des Hebels, die theoretisch immer entstehen, wenn dem Hebel eine bestimmte ungleichförmige Bewegung erteilt wird, die sogenannten Erzitterungen, um so kleiner ausfallen, je kürzer die Dauer der Grundschwingung des eingeklemmten Hebels und um so größer seine Reibung, besonders die innere, ist.

Eine einfache Berechnung ergibt nun, daß die Grundschwingung für einen hohlen Stab, der denselben äußeren Durchmesser wie ein massiver Stab hat, nicht eine größere Dauer, sondern eine kleinere als für den massiven besitzt. Die beiden Werte sind nämlich:

$$T = 3,594 \frac{L^2}{r} \sqrt{\frac{\sigma}{E}} \quad \text{und} \quad 3,594 L^2 \sqrt{\frac{\sigma}{E(R^2 + r^2)}} \quad \dots \quad (20, 21)$$

Ein hohler Stab ist also einem massiven in bezug auf die geringe Entstellung der Kurven durch die dynamischen Durchbiegungen überlegen. Da ein hohler Stab aber ein wesentlich geringeres Trägheitsmoment besitzt als ein massiver, so ist er dem letzteren stets vorzuziehen. Das ist auch der Grund, warum Strohhalme so geeignete Materialien für die Herstellung von Schreibhebeln darstellen. Die Verwendung von organischem Material empfiehlt sich überhaupt, weil es relativ zur Dichte einen großen Elastizitätskoeffizienten und vor allem eine starke innere Reibung besitzt. Metalle sind ungeeignet.

B. Praktische Folgerungen aus der Theorie.

Die wichtigste Konsequenz, die sich aus den mathematischen Beziehungen ergibt, ist die, daß die Hebel möglichst kurz zu halten und daß sie aus organischem Material, am besten aus hohlen Strohhalmen zu bilden sind. Hebellängen von 15 oder gar 25 cm sind jedenfalls zu vermeiden. Wie stark die reduzierte Masse verkleinert werden kann, geht aus folgendem Beispiel hervor. Für einen 10 cm langen Hebel wende ich einen Strohhalme an, dessen spezifische Masse = 0,01 g pro Zentimeter Länge beträgt. Er macht festgeklemmt ca. 100 Schwingungen in der Sekunde. Wendet man einen nur 5 cm langen Hebel an, so kann man ihn so dünn machen, daß seine spezifische Masse nur noch 2 mg pro Zentimeter beträgt, ohne daß die Erzitterungen mehr hervortreten würden. Seine reduzierte Masse beträgt bei der gleichen Hebelvergrößerung im letzteren Fall nur den zehnten Teil derjenigen des langen Hebels. Bei einer Vergrößerung von über 20 wird man in diesem Fall doppelte Hebelübersetzung anwenden. Wenn die Vergrößerung verändert wird, ist zu beachten, daß dadurch die reduzierte Masse verändert wird (s. Formel 10). Gegengewichte müssen immer nahe der Achse angebracht werden, damit das Trägheitsmoment nicht wesentlich verändert wird.

Will man bestimmen, mit welcher Kraft die Achse an die Lager oder der Angriffspunkt an die Unterlage (z. B. an die Platte einer Manometermembran usw.) angedrückt werden muß, so muß man bei den Kurven, die man mit dem Instrument erhalten hat, die maximale Beschleunigung (an

den Wendepunkten der Kurve) bestimmen und nach den Formeln (15), (16) und (19) die Auflagedrucke berechnen. Die Kräfte, mit denen das Hebelsystem angedrückt werden, müssen größer als diese Auflagedrucke sein.

Die Schreibspitze soll mit einer gewissen Kraft an die Papierfläche ange drückt werden, so daß sie nicht weggeschleudert werden kann. Der Druck darf aber auch nicht unnötig hoch sein. In der Richtung der Bewegung des Schreibhebels darf die Spitze nicht durchgebogen werden. Am besten scheinen Schreibspitzen aus dünnem Papier (Pergamin) gebildet zu werden. Von Herrn Bayliss ist mir eine Spitze empfohlen worden, die folgendermaßen zusammengesetzt ist. An den eigentlichen Hebel ist zunächst ein etwas dickeres Papierblättchen angesetzt. Daran angeklebt ist ein Streifen von getrocknetem Kalbsperitoneum oder Goldschlägerhäutchen, und weiter die eigentliche Schreibspitze, aus einem dreieckigen Zelluloidplättchen bestehend. Die Einschaltung des Peritoneums macht die Spitze außerordentlich biegsam. Ich habe die Überzeugung, daß man mit einer derartigen Kombination in jedem einzelnen Fall die Bedingungen für die Herstellung einer guten Schreibspitze erfüllen kann.

Die zur graphischen Registrierung benutzten Hebel werden im allgemeinen am besten so konstruiert, daß ihre Richtung tangential zu dem Registrierzylinder steht. Die Schreibfeder liegt dann von der Seite an. Man nennt diese Art der Hebelschreibung tangentielle oder Seitenschreibung. Die Seitenschreibung hat einen Nachteil, der aber nicht als wesentlich zu betrachten ist: Die Ordinaten stellen Kreisbögen dar. Ferner hebt sich die Schreibspitze bei dem Heben oder Senken des Hebels gegen die Horizontale (senkrechte Trommel) etwas von der Zylinderfläche ab, auch wenn der Hebel in der tangentialen Richtung steht. Der letztere Umstand kommt, wie schon Rollett nachgewiesen hat, gar nicht in Betracht. Ich berechne für das Abheben eines 10 cm langen Hebels bei einer Exkursion der Spitze von 1 cm von der Horizontalen: 0,01 mm und für einen 5 cm langen Hebel und denselben Ausschlag: 0,02 mm, wenn der Registrierzylinder wie gewöhnlich einen Umfang von 56 cm hat. Diese Entfernung wird selbstverständlich leicht von dem Druck der Schreibspitze gegen die Zylinderfläche ausgeglichen. Unregelmäßigkeiten in dem Papiere dürften etwa von derselben Größenordnung sein. Dagegen ist die Bogenschreibung zu berücksichtigen, besonders wenn es sich darum handelt, in verschiedenen gleichzeitig aufgeschriebenen Kurven die Punkte gleicher Zeiten festzustellen. Die Verkürzung der Hebellänge in der Abszissenrichtung beträgt für dieselben Hebellängen und denselben Ausschlag 1,1 und 2,3 mm. Man muß, wenn man die Punkte gleicher Zeiten feststellen will, entweder nach der Aufnahme auf der Trommel mit dem benutzten Hebel bei stillstehender Trommel Bogenordinaten durch die Kurven ziehen oder man kann sich auch einen Talon machen lassen, mit dem man auf dem von dem Zylinder abgeschnittenen Blatt die Ordinaten zieht. Die Krümmung der Ordinaten macht sich natürlich relativ am meisten bei langsamem Trommelgang bemerkbar.

Man hat besonders in früheren Zeiten versucht, den Nachteil der Bogenordinaten, den die Tangentialschreibung hat, durch Konstruktion von sogenannten Stirnhebeln zu beseitigen. Der Hebel steht hierbei radiär. Die

Spitze schreibt bei stillstehender Trommel gerade Linien in der Richtung der Zylinderachse. Aber diese Schreibung hat viel größere Nachteile als die erste. Unwesentlich ist der Umstand, daß keine Proportionalität zwischen der Winkeldrehung und der Größe der Ordinate vorhanden ist. Das ist für die Höhe der Ordinate bei der Seitenschreibung auch nicht der Fall. Höchst wichtig ist dagegen, daß sich die Spitze, und zwar in denselben Beträgen, wie oben für die Verkürzung ausgerechnet worden ist, bei dem Heben oder Senken von der Zylinderfläche abhebt, also um 1,1 bzw. 2,3 mm. Dieses Abheben der Schreibspitze muß durch eine federnde Vorrichtung ausgeglichen werden. Und mit dieser Vorrichtung kommen im allgemeinen große Massenwirkungen ins Spiel. Kann man wie bei dem Frank-Petterschen Sphyg-

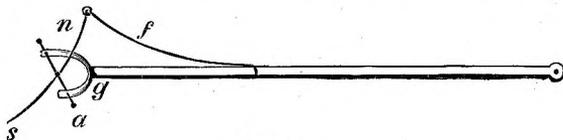


Fig. 11a.



Fig. 11b.

Zwei Formen von Stirnhebeln (nach Ludwig und Fick aus Langendorffs Graphik S. 52).

mographen die kleine Schreibfläche nach dem Kreis krümmen, den die Hebelspitze beschreibt, so läßt sich die Schreibspitze aus Papier anfertigen. Es genügt die Spannung des Papiers, um die Schreibspitze ebenso wie bei der tangentialen Schreibung, von der sich diese Stirnschreibung nicht mehr prinzipiell unterscheidet, anzudrücken. Im anderen Fall sind komplizierte Vorrichtungen notwendig, die das Trägheitsmoment so stark vergrößern, daß man auf die teilweisen Vorteile der Stirnschreibung verzichten wird. Die Federvorrichtung, die man zum dauernden Anlegen der Spitze des Stirnhebels notwendig hat, funktionieren auch technisch nicht gut. Um das Prinzip der Stirnschreibung zu veranschaulichen, bilde ich hier zwei Stirnhebel ab.

Otto Frank 1903. Prinzipien der Konstruktion von Schreibhebeln. Zeitschr. f. Biol., Bd. XLV, S. 480.

Ignaz Petter 1906. Kritische Studie zur Entwicklung des Sphygmographen. Dissertation Gießen.

Kapitel 5.

Optische Hilfsmittel der Registrierung. Spiegelapparate.

In vielen Fällen werden die Leistungen eines Apparates, bei dem Hebel verwandt worden sind, durch deren Massenwirkung wesentlich bestimmt. Will man ihre Leistung erhöhen, so muß man statt der Hebel

Spiegelsysteme anbringen, deren Trägheitsmoment man wesentlich kleiner als dasjenige von Hebeln bemessen kann.

Man kann die Spiegel in zweierlei Form anwenden, wie ich in einer Abhandlung (1904) auseinandergesetzt habe.

Entweder man bringt den Spiegel auf einem besonderen Gestell an, das sich ähnlich wie ein Hebel um eine Achse dreht. Von dem Gestell geht ein kurzer Hebelarm aus, dessen vorderes Ende bis zum Angriffspunkt der Kraft reicht. Wegen der Ungenauigkeit von zwangsläufigen Verbindungen ist es absolut notwendig, an diesen Stellen, der Achse und dem Angriffspunkt, das Prinzip der freien Achsen (s. Kap. 4 Fig. 10 c) durch kraftschlüssige Verbindungen anzuwenden, so wie es aus dem Schema der Figur 12

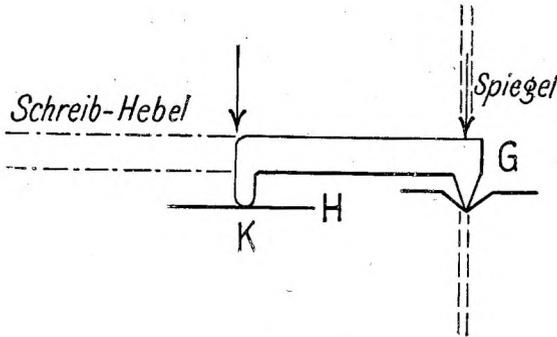


Fig. 12.

Schema des Registrierspiegels. (G Gestell, H Hebel, K Knopf.)

hervorgeht. In ihr bezeichnet G das eigentliche Gestell, H den kurzen Hebel, K den Knopf des Hebels, mit dem er an die Unterlage angedrückt wird. Die gestrichelten Linien, „Schreibhebel“, sollen andeuten, daß die eigentlichen Hebelsysteme sich an dieser Stelle weiter fortsetzen.

Man kann zeigen, daß selbst, wenn man das Trägheitsmoment des Gestells so klein wie möglich gestaltet, wie dies bei dem unten beschriebenen der Fall ist, es doch noch so groß bleibt, daß ihm gegenüber das Trägheitsmoment der kleineren Spiegel verschwindet. Man kann also einen kleineren Spiegel vorteilhaft nur dann anwenden, wenn man ihn unmittelbar auf die Membran selbst aufklebt.

Ich bespreche die wesentlichen Eigenschaften der verschiedenen Registrierspiegel und die Momente, die für ihre Konstruktion in Betracht kommen, die optischen Verhältnisse der Spiegelregistrierung und die Vorsichtsmaßregeln, die man bei dem Aufkleben der Spiegel gebrauchen muß.

A. Trägheitsmoment der Spiegel allein.

Nur in seltenen Fällen wird man Spiegel anwenden, die eine geringere Dicke als 0,2 mm besitzen. Sie verspannen sich sonst zu leicht. Der Spiegel wird im allgemeinen so gelagert, daß sein Durchmesser mit der Drehachse zusammenfällt.

Ein rückwärts versilberter und lackierter Spiegel von 0,2 mm Dicke besitzt nach meinen Wägungen, deren Resultate auch mit der Berechnung übereinstimmen, eine spezifische Masse von 0,06 pro qcm.

Das Trägheitsmoment derartiger kreisrunder Spiegel beträgt für einen Durchmesser von

D = 0,2 cm	=	4,7	$\times 10^{-6}$
= 0,3	=	23,9	$\times 10^{-6}$
= 0,4	=	75,4	$\times 10^{-6}$
= 0,5	=	184	$\times 10^{-6}$
= 1,0	=	2940	$\times 10^{-6}$

in absoluten Einheiten (s. Kap. 5 Formel 3).

Größere Spiegel wird man im allgemeinen nicht verwenden. Für Spiegel von anderer Dicke läßt sich das Trägheitsmoment leicht aus der Tabelle berechnen. Es ist proportional der Dicke.

B. Reduzierte Masse eines auf einem Gestell befestigten Registrierspiegels.

In der angezogenen Abhandlung habe ich ein Spiegelgestell angegeben, dessen Dimensionen so gewählt sind, daß sein Trägheitsmoment so klein ist, als es die technische Konstruktion erlaubt. Das Material ist überall dort eingespart, wo es möglich ist. Seine Achse ist eine freie, auf Spitzen gelagerte. Der Spiegel wird an dem Gestell so befestigt, daß sein Durchmesser mit der Drehachse zusammenfällt.

Der Abhandlung entnehme ich die Zahlen für die reduzierte Masse dieses Spiegelgestells von minimalem Trägheitsmoment. Die reduzierte Masse hängt ab von dem Material und von der Länge des kurzen Hebelarms. Das Material des Gestells ist Aluminium, wenn in der Tabelle nichts Besonderes angegeben ist. Der Knopf des Hebels ist 0,1 cm hoch, wenn nichts Besonders angegeben ist. Die Werte gelten für einen Spiegel von 1 cm Durchmesser.

Reduzierte Masse der Spiegelkonstruktionen in 10^{-3} g Einheiten = mg.

	Spiegel	Gestell	Hebel	Knopf	Total
1 cm Spiegel.					
a) Hebel 0,5 cm Länge 1.	11,8	9,1	2,1	2,0	25,1
Knopf 0,5 cm Höhe 2.	—	—	—	10,2	33,2
b) Hebel 1,0 cm 3.	2,9	2,3	6,8	2,0	14,1
Gestell Messing 4.	—	7,5	—	—	19,3
Hebel Hartgummi 5.	—	—	3,2	0,9	9,3
c) Hebel 2,0 cm 6.	0,7	0,6	13,6	2,0	17,0
Gestell Messing 7.	—	1,9	—	—	18,3
Hebel Hartgummi 8.	—	—	6,3	0,9	8,5

Man entnimmt aus der Tabelle, was oben gesagt worden ist, nämlich daß eine weitere Verkleinerung des Spiegels die reduzierte Masse dieses Systems nicht wesentlich verringert, weil schon bei dem 1 cm großen Spiegel die reduzierte Masse des Spiegels gegenüber den übrigen Massen des Hebels und des Gestells zurücktritt. Der Spiegel muß also bei Membransystemen direkt auf die Membran aufgeklebt werden, wenn durch seine Verkleinerung die Trägheitskräfte verringert werden sollen.

C. Auf die Membran aufgeklebter Spiegel der „Segment- oder Herztonkapsel“.

Ich habe zuerst eine Methode angegeben, die es ermöglicht, die Bewegung einer Membran durch einen auf sie unmittelbar aufgeklebten Spiegel zu registrieren. Dem Rand der Trommel, auf welche die Membran aufgespannt ist, habe ich eine eigentümliche Form gegeben, durch die erreicht wird, daß die Bewegungen des Spiegels fast streng um eine Achse erfolgen. Der Rand bildet nämlich nicht einen vollen Kreis, sondern einen mindestens 180 Grad umfassenden Bogen, der durch eine Sehne geschlossen wird. Der Spiegel wird so aufgeklebt, daß er sich um diese Sehne als Achse dreht. Es gelingt zwar auch mit einer kreisrunden Trommel¹⁾, die seitlichen Exkursionen des Spiegels zu verhindern, wesentlich sicherer aber mit der von mir beschriebenen Vorrichtung. Sie wird im Abschnitt Hämodynamik Kap. „Lufttransmission“ näher beschrieben.

Czermak und später Bernstein haben für die Sphygmographie einen Spiegel unmittelbar auf die pulsierende Stelle aufgeklebt. Das Nähere findet sich im Abschnitt: „Hämodynamik“ Kap. „Sphygmographie“.

D. Die optischen Verhältnisse eines Registrierspiegels. Die optische Vergrößerung.

Die Bewegungen des Spiegels setzen einen auf ihn fallenden Lichtstrahl in drehende Bewegung. Die Spitze des Lichtstrahls, der Registrierpunkt, zeichnet die Kurve auf dem photographischen Film auf.

Ist der kurze Hebelarm des Spiegels = a und die Länge des Lichtstrahls = L , so beträgt die Vergrößerung im allgemeinen $2L/a$.

Aber dies ist nicht immer der Fall. Nämlich nur dann, wenn der auffallende Lichtstrahl in derselben Ebene liegt, in der sich das Einfallslot des Spiegels bewegt. Der reflektierende Strahl liegt dann auch in derselben Ebene. Die von dem Lichtstrahl beschriebenen Ordinaten sind gerade Linien.

Anders, wenn der einfallende Strahl nicht in dieser Ebene liegt. Dann beschreibt die Spitze des Lichtstrahls nicht mehr eine gerade Linie bei stillstehender Platte, sondern Kreisbogen, und die Vergrößerung ist geringer als in dem ersten Fall, nämlich gleich $2L/a$, multipliziert mit dem Kosinus des Winkels, den der auffallende Strahl mit der Ebene bildet, in der sich das Lot bewegt.

Ist dieser Winkel klein, so sind die Abweichungen der Ordinaten von der Geraden nur gering.

E. Befestigung von Registrierspiegeln auf der Unterlage.

Bei der Befestigung der Registrierspiegel hat man sehr darauf zu achten, daß sich die dünnen Spiegel nicht „verspannen“. Je größer der

1) Hürthle hat nach meiner ersten Mitteilung über die Konstruktion angegeben, daß er eine ähnliche kreisförmige schon früher in Auftrag gegeben habe, daß er aber nur unbefriedigende Resultate, besonders wegen der seitlichen Exkursionen erhalten habe, s. Zentralbl. f. Physiol. 18, S. 617.

Spiegel ist, um so leichter verspannt er sich. Ich klebe den Spiegel immer nur an zwei kleinen Flächen etwa von der Größe 1 qmm mit dem aufgelösten Gummi auf, wie er zum Reparieren der Gummireifen verwendet wird. Gummi arabicum wird zu hart und verspannt bei dem Trocknen den Spiegel.

Die Güte des Objektivs spielt nur eine geringe Rolle.

Die Vergrößerung des Ausschlags kann auch durch optische Methoden, durch mikroskopische Projektion oder durch Registrierspiegel nicht beliebig gesteigert werden. Bei stärkerer mikroskopischer Vergrößerung wird die Einstellung zu schwierig, das Bild lichtschwach und der Rand der Marken unscharf. Macht man bei Spiegeln den reflektierenden Strahl zu lang, so treten dieselben Übelstände auf, besonders die Unschärfe bei den durch Verspannung gekrümmten Spiegeln.

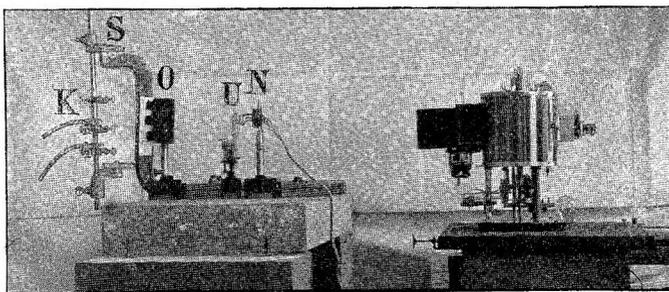


Fig. 13.

Anordnung der Spiegelregistrierung mit Kymographion.

F. Die Anordnung des optischen Apparates.

Wendet man eine Vergrößerung des Ausschlags durch das Mikroskop an, so wird der Apparat so angeordnet wie bei der Registrierung der Kapillarelektrometerschwankungen oder Bewegungen des Saitengalvanometers. Ich verweise hier auf die betreffenden Kapitel.

Viel bequemer sind Spiegelapparate. Sie sind bei hämodynamischen und ähnlichen Untersuchungen nach meiner Erfahrung am besten anzuwenden. Die Anordnung, die ich auf Grund vieler Versuche als zweckmäßig betrachte, ist in der Zeitschrift für biologische Technik und Methodik Bd. I beschrieben. Der Hauptteil ist das glühende Stäbchen einer Nernstlampe N, von dem durch ein, oder bei mehreren gleichzeitigen Registrierungen mehrere, photographische Objektive O vergrößerte Bilder in der Ebene der photographischen Platte entworfen werden (Fig. 13). Die Strahlen passieren von dem glühenden Stäbchen ausgehend zunächst einen Hebel U, der mit dem Anker einer Weckeruhr verbunden, den Lichtstrahl in zur Zeitmarkierung geeigneten Intervallen unterbricht. Dann gelangen sie durch die Öffnung der Objektive zu den Spiegeln K, werden von ihnen reflektiert und beschreiben mit ihrer Spitze auf der photographischen Platte die Kurven. Vorher wird durch einen Spalt aus dem Bild des glühenden Stäbchens ein möglichst schmaler Streifen ausgeschnitten. Durch Einschaltung einer Zylinderlinse

hinter dem Spalt erreicht man, daß die Lichtstärke dieses schmalen Streifens nicht zu klein wird. Wie man aus der Beschreibung der Anordnung entnimmt, kann man zu gleicher Zeit drei und mehr Spiegelbewegungen registrieren, was bei der Anwendung der mikroskopischen Projektion wohl möglich ist, aber mit großen Schwierigkeiten verknüpft ist. Die Beschreibung der einzelnen Apparate, bei denen Spiegelregistrierung verwendet wird, findet sich in den entsprechenden Teilen des Handbuchs.

Frank, O., 1904. Konstruktion und Durchrechnung von Registrierspiegeln. Zeitschr. f. Biol. Bd. XLVI, S. 421—440.

Kapitel 6.

Prinzipien der graphischen Registrierung.

A. Allgemeine Mechanik.

In den einschlägigen Abschnitten des Handbuchs werden die Leistungen der einzelnen Registriermethoden eingehend gewürdigt. In dem vorliegenden Kapitel diskutiere ich die allgemeinen Prinzipien der graphischen Registrierung, die Theorie der Registrierinstrumente. Die Vorrichtungen zur Bewegung der Schreibfläche sind schon in einem früheren Kapitel beschrieben worden.

Auf Grund einiger Vorarbeiten läßt sich jetzt eine ausreichende Theorie für alle Methoden der graphischen Registrierung entwickeln. Befriedigend durchgeführt war sie bis jetzt nur für die elastischen Manometer, während die Lufttransmission und die übrigen Registriermethoden noch nicht nach allgemeinen Grundsätzen behandelt sind.

Durch die graphische Registrierung sollen die zeitlichen Verhältnisse eines mechanischen Vorgangs in Form einer Kurve oder eines Kurvensystems aufgezeichnet werden. Das System, in dem sich dieser Vorgang abspielt, heißt das beobachtete System. Mit ihm muß ein System, das Registriersystem, gekoppelt werden, das die Aufzeichnung ermöglicht. Enthält das Registriersystem wie fast stets träge Massen und erfolgen seine Bewegungen nicht reibungslos, so gibt die registrierte Kurve nicht ein getreues Abbild des mechanischen Vorgangs wieder, sondern sie ist durch die Wirkung der Trägheitskräfte und der Reibungskräfte des Registriersystems entstellt. Man kann die Beziehungen zwischen dem Vorgang und der registrierten Kurve nicht mehr aus statischen Verhältnissen feststellen, indem man den Ausschlag des Systems für bekannte mechanische Vorgänge ermittelt, oder wie man sich ausdrückt, das Registriersystem eicht, sondern man muß die dynamischen in Betracht ziehen. Nur bei rein optischer Registrierung, etwa bei dem Kinematographen, findet eine derartige Entstellung nicht statt.

Durch den mechanischen Vorgang, der sich in dem beobachteten System abspielt, wird das Registriersystem in Bewegung, Mitbewegung, versetzt. Zugleich übt aber die Verkoppelung des Registriersystems mit dem beobachteten auch eine Rückwirkung auf das beobachtete System aus.

Die Aufgabe der Theorie ist es, das System als mechanisches zu charakterisieren, diejenigen Größen allgemein anzugeben, von denen die Entstellung und die Rückwirkung abhängt, und die Beziehung zwischen ihnen, der Entstellung und der Rückwirkung, in eine leicht übersehbare Form zu bringen. Ist dies geschehen, so wird es möglich, für jedes Registriersystem die Entstellung des Vorgangs durch das Registriersystem zu ermitteln oder die Kurven zu korrigieren sowie die Rückwirkung festzustellen. Ferner gibt die Theorie die Mittel an die Hand, Registriersysteme zu bilden, die ein Minimum von Entstellung oder von Rückwirkung aufweisen, so daß beide für bestimmte experimentell zu ermittelnde Anforderungen bedeutungslos werden.

Ohne eine Theorie der Instrumente ist es in den meisten Fällen, wie die geschichtliche Entwicklung gelehrt hat, nicht möglich, die mit großer Schnelligkeit sich abspielenden mechanischen Vorgänge im tierischen Körper festzustellen oder bei der Konstruktion der Instrumente einen fortschreitenden Gang einzuschlagen. Die Geschichte dieser Bestrebungen zeigt, daß ohne den Leitfaden dieser Theorie nur ein planloses Arbeiten stattfindet.

Ein mechanischer Vorgang ist als bekannt zu betrachten, wenn die wirkenden Kräfte und die resultierenden Bewegungen, oder die beiden Faktoren der Arbeit, festgestellt sind. Die graphische Registrierung hat die Aufgabe, die zeitlichen Veränderungen dieser Faktoren in dem beobachteten System zu ermitteln. Danach wird man die Instrumente einteilen in kraftregistrierende und bewegungsregistrierende.

Der Kraftfaktor kann als Kraft im gewöhnlichen Sinn, Punkt- oder Massenkraft auftreten oder auch als Flächenkraft, spezifische Spannung, hydrostatischer Druck. Auf der anderen Seite handelt es sich um lineare Bewegungen oder um Volumveränderungen bzw. Bewegungen.

Kraftregistrierende Instrumente sind z. B. der Hebel, der die Spannungen des Muskels aufschreibt, die Manometer und der Sphygmograph. Bewegungsregistrierende Instrumente sind die Längenschreiber für die Muskelzuckung, ferner die Mareysche Kapsel in Verbindung mit der Lufttransmission, der Pistonrekorder usw. (s. unten).

Bei den kraftregistrierenden Instrumenten wird die messende Kraft des beobachteten Systems in das Gleichgewicht mit einer anderen bekannten gesetzt. Diese bekannte Kraft muß entsprechend der einwirkenden Kraft sich ändern, damit das geforderte Gleichgewicht eintritt. Die in dem Registriersystem wirkende Kraft muß also den Charakter von elastischen Kräften haben. Aus den Deformationen des zur Messung verwendeten Teils des Registrierinstrumentes wird auf die Größe der einwirkenden beobachteten Kraft geschlossen. So werden bei dem Spannungsschreiber eine Feder zur Erzeugung der Gegenkraft, bei den elastischen Manometern im engeren Sinn elastische Membranen verwendet. Daß auch das Quecksilbermanometer als ein elastisches aufzufassen ist, wird noch gezeigt werden.

Die bewegungsregistrierenden Instrumente sind leicht bewegliche Systeme, d. h. solche, die durch das beobachtete System in Mitbewegung gesetzt werden, ohne daß eine merkbare Rückwirkung durch die Bewegung in Form einer Kraft ausgeübt wird.

Die Kräfte und Bewegungen des beobachteten Systems müssen möglichst so aufgezeichnet werden, wie sie ohne die Verkoppelung mit dem Registrierungssystem vorhanden sind. Die Rückwirkung auf das beobachtete System muß möglichst klein sein. Das Anlegen eines kraftregistrierenden Instrumentes an das beobachtete System darf an dessen Bewegungen keine wesentlichen Änderungen hervorbringen. Auf der anderen Seite darf das Ankoppeln eines bewegungsregistrierenden Systems keine Kraftveränderung in dem beobachteten erzeugen.

Die Rückwirkung eines kraftregistrierenden Systems bemißt sich nach der Änderung der Bewegung, die es hervorruft, die Rückwirkung eines bewegungsregistrierenden Systems nach der Kraftveränderung, die es erzeugt.

Ein kraftregistrierendes System muß deshalb möglichst isometrisch funktionieren, d. h. seine Deformationen, die durch die einwirkende Kraft hervorgebracht werden, müssen möglichst gering sein.

Umgekehrt muß ein bewegungsregistrierendes Instrument möglichst isotonisch funktionieren. Dies sind die statischen Vorbedingungen für die Konstruktion dieser Instrumenttypen. Die gesamte Rückwirkung, die statische und dynamische, bemißt sich nach den unten entwickelten Beziehungen.

Die mathematische Analyse der Bewegungen der Registriersysteme beruht auf der Theorie der Mitschwingungen. Die periodisch veränderliche Kraft oder Bewegung des beobachteten Systems versetzt das Registrierungssystem in Mitschwingungen, sie bewirkt „erzwungene Schwingungen“ des Registriersystems.

Die allgemeine Beziehung für die Bewegung derartiger Systeme läßt sich durch folgende Gleichung ausdrücken: Die einwirkende Kraft ist gleich der Summe aus der elastischen Kraft, der Trägheitskraft und der dämpfenden Kraft. Sie nimmt die Form einer Differentialgleichung an, die integriert werden kann, wenn die zeitlich veränderliche einwirkende Kraft in einer Fourierschen Reihe entwickelt ist. Wichtiger als die Diskussion dieses Integrals, das jedoch einige bemerkenswerte Folgerungen zuläßt, ist die Diskussion der ursprünglichen Differentialgleichung. Die Gleichungen werden in der allgemeinen Dynamik (s. Abschnitt E unten) entwickelt. Sie ermöglichen die Berechnung der Korrekturen der von dem Instrument aufgeschriebenen Kurven und der Rückwirkung, welche durch die Bewegung des Registriersystems auf das beobachtete ausgeübt wird.

Eine anschauliche Übersicht über die Verhältnisse wird am besten erhalten, wenn man von einem besonderen Fall dieser erzwungenen Schwingungen ausgeht, dem Fall der Resonanz. Resonanz tritt dann ein, wenn die Periode der einwirkenden Schwingung, der Veränderung der Kraft oder der Bewegung, übereinstimmt mit der Periode der Eigenschwingung des in Mitschwingung versetzten Systems. Eine Eigenschwingung führt dieses aus, wenn es, durch irgendeinen Anstoß in Bewegung versetzt, sich selbst überlassen bleibt, ohne daß eine veränderliche Kraft oder Bewegung einwirkt. Im Fall der Resonanz wird der schwingende Körper bei mäßiger Dämpfung in stärkere Bewegung versetzt, als sie aus der statischen Einwirkung der Kraftveränderung oder der Bewegung resultieren

würde. Das ist jedenfalls ein Verhältnis, wie es bei der graphischen Registrierung vermieden werden soll, wenn es auch sehr oft herbeizuführen gesucht worden ist, um möglichst große Ausschläge zu erhalten. Ein weiterer Fall ist der, daß die Periode der Eigenschwingung des registrierten Systems länger ist als diejenige der einwirkenden Schwingung. Dann tritt, wie die Theorie lehrt, auch wenn man dem Punkt der Resonanz sich noch nahe befindet, eine Abschwächung der Bewegungen des mitschwingenden Systems ein. Sie werden kleiner, als sie nach den statischen Verhältnissen zu erwarten wären. So darf das Registriersystem auch nicht gestaltet sein. Ist zum Schluß die Dauer der Eigenschwingung des registrierenden Systems wesentlich kürzer als diejenige des beobachteten Systems, so verzeichnet das Registriersystem, nicht unendlich kleine Dämpfung vorausgesetzt, die einwirkende Schwingung richtig.

Berücksichtigt man hierbei, daß jede noch so komplizierte periodische Bewegung in Fouriersche Reihen auflösbar ist, d. h. aus Teilschwingungen zusammengesetzt gedacht werden kann, so kann man den Satz aussprechen: eine richtige Registrierung wird bei einer derartigen Bewegung dann erfolgen, wenn die Eigenschwingung des Registrierinstrumentes wesentlich kürzer ist als irgendeine der Teilschwingungen der Fourierschen Reihe.

Das Prinzip kann man sich leicht durch folgendes Experiment veranschaulichen. Man suche ein Schnurpendel, das man in der Hand hält, durch Bewegungen der Hand in Schwingungen zu versetzen. Man bewegt zunächst die Hand langsam hin und her, langsamer als die Eigenschwingungen des Pendels selbst sind. Das Pendel wird, ohne daß es in Eigenschwingungen gerät, den Bewegungen der Hand folgen. Dann beschleunige man die hin und her gehenden Bewegungen der Hand. Stimmt die periodische Bewegung der Hand überein mit der Dauer einer Pendelschwingung, so wird das Pendel in immer lebhafter werdende Schwingungen geraten. Jetzt ist der Punkt der absoluten Resonanz erreicht. Bewegt man die Hand noch rascher hin und her, so gerät das Pendel allmählich wieder in Ruhe. Bei genügend raschen Bewegungen der Hand wird es in Ruhe verharren und wird keine Andeutung von den Bewegungen der Hand geben. Genaueres hierüber siehe Winkelmanns Handbuch der Physik I, S. 408. Der erste der soeben geschilderten Fälle ist derjenige, der bei der Registrierung verwirklicht sein muß, die Eigenschwingungen des Registriersystems müssen kürzer als diejenigen der Bewegung sein. Selbstverständlich spielt die Dämpfung, deren Bedeutung in den Gleichungen der Dynamik gewürdigt wird, eine Rolle bei diesen Bewegungen, aber vor allem muß dem soeben entwickelten Prinzip Genüge geleistet sein. Die Feststellung der Eigenschwingungen der registrierenden Systeme ist deshalb von allergrößter Bedeutung.

B. Allgemeine Beschreibung der Registriersysteme.

Die registrierte Kurve wird auf einer gleichmäßig bewegten Fläche aufgeschrieben. Sie entsteht durch die lineare Bewegung der Schreibspitze auf der beruhten Fläche oder bei Registrierung unter Benutzung von photographischen Hilfsmitteln, der optischen Registrierung, durch lineare Bewegung der Spitze eines Strahlenbündels. Diesen Punkt, dessen Bewegung die Kurve aufschreibt, nenne ich den Registrierpunkt.

Auf ihn soll die Bewegung von der Stelle aus, an der sich der mechanische Vorgang abspielt, übertragen werden. Diese Stelle heiße ich die Koppelstelle. Das Registrierensystem reicht von der Koppelstelle bis zum Registrierpunkt.

Ist die Bewegung die am Anfang¹⁾ des Systems, an der Verkoppelungsstelle, erfolgt, nicht linear, sondern eine Volumbewegung, so muß sie durch eine an irgendeiner Stelle des Systems befindliche Übersetzung — Volumübersetzung — in eine lineare verwandelt werden. Derartige Übersetzungen können durch einen in einem Zylinder gleitenden Kolben oder durch eine Membran hergestellt werden, welche die beiden Teile des Systems, den Volumverschiebungen und den lineare Verschiebungen ausführenden, voneinander trennt. Für die Übertragung einer Volumverschiebung werden flüssige Medien angewendet, und zwar entweder Flüssigkeiten im gewöhnlichen Sinn, d. h. als inkompressibel aufzufassende, wie Wasser und dergl., oder elastische, wie Luft. Diese Flüssigkeiten werden in Röhrensysteme eingeschlossen. Bei den Manometern kommuniziert im allgemeinen die Flüssigkeit unmittelbar mit der Flüssigkeit, deren Druck gemessen werden soll, d. h. mit dem Inneren des Kreislaufsystems. In einigen Fällen, wie z. B. der unblutigen Druckmessung beim Menschen, ist eine direkte Kommunikation nicht vorhanden. Dann und bei der Übertragung von reinen Volumbewegungen, etwa bei der Plethysmographie oder der Kardiographie, findet eine Abdichtung des Anfangs des Röhrensystems an der Verkoppelungsstelle durch Membranen und andere Abdichtungsmittel statt. Die Verwendung von Flüssigkeiten, besonders der luftförmigen, als Übertragungsmittel ist äußerst bequem, weil dem Röhrensystem, den Schlauchverbindungen, leicht eine beliebige Form gegeben werden kann, so daß die Lage des Registrierpunktes und der Registrierfläche in weiten Grenzen unabhängig von der Lage der Verkoppelungsstelle bleiben kann. Eine derartige Übertragung findet als Lufttransmission vielfältige Anwendung. Die Bequemlichkeit der Anwendung dieses Verfahrens läßt es auch dann vorteilhaft erscheinen, wenn eine lineare Bewegung der Verkoppelungsstelle übertragen werden soll, wie z. B. bei dem Transmissionssphygmographen und ähnlichen Vorrichtungen. Ich nenne diese Übertragung die lineare Lufttransmission. Sie muß natürlich zwei Volumübersetzungen enthalten.

Im übrigen erfolgt die Übertragung der Bewegungen durch Fäden, d. h. leicht biegbare dünne Zylinder von festen Stoffen, die in den meisten Fällen als unausdehnbar aufzufassen sind, oder durch Hebel, d. h. durch unbiegsame Stangen.

Zu beachten ist, daß in manchen Fällen eine Flüssigkeit nicht mehr als inkompressibel, ein Faden als unausdehnbar und ein Hebel als unbiegsam betrachtet werden kann. Man muß sich immer vergewissern, ob diese in Wirklichkeit nie streng erfüllten Voraussetzungen zulässig sind.

In jedem System sind also im allgemeinen elastische Faktoren enthalten, ferner kommt für die Analyse der Bewegungen noch in Betracht die Größe der Massen und der Reibungswiderstände.

1) In der „Kritik“ habe ich die Koppelstelle das Ende des Systems genannt.

C. Bezeichnungen.

Um eine rasche Übersicht der in den Formeln ausgedrückten Beziehungen zu ermöglichen, habe ich die Bezeichnungen für die einzelnen Größen nach allgemeinen Prinzipien vorgenommen¹⁾.

Die Verkoppelungsstelle des Systems wird durch den Index k angegeben, die Registrierstelle durch den Index r . Der Anfang des Systems befindet sich auf der Verkoppelungsseite, das Ende auf der Registrierseite. Die Endübertragung der Bewegung erfolgt fast ausnahmslos durch einen Hebel im gewöhnlichen Sinn oder durch den Lichtstrahl. Beide sind als starr zu betrachten. Sie vergrößern die Bewegungen eines Punktes des Systems, an dem das elastische Übertragungsmittel endet. Die mechanische Analyse wird in einigen Fällen durchsichtiger, wenn man die Bewegungen dieses Punktes betrachtet. Ich bezeichne ihn als Endpunkt mit dem Index e . Die Hebelvergrößerung wird mit v , der kleine Hebelarm mit a , die Länge mit L (also $v = \frac{L}{a}$) bezeichnet. Bisweilen, z. B. bei der linearen Lufttransmission, wird die Bewegung der Verkoppelungsstelle durch Hebelübersetzung auf den Anfangspunkt des elastischen Teils übertragen. Er erhält den Index a , Zwischenstellen des Systems werden mit 1, 2 bezeichnet.

B = Bewegung im allgemeinen,

f = lineare Verschiebung, V = Volumverschiebung,

H = Kraft im allgemeinen,

P = Massenkraft, p = spezifische Flächenkraft (hydrostatischer Druck

M = Masse im allgemeinen, [usw.],

m = reduzierte Masse eines Hebels,

M' = wirksame Masse einer Flüssigkeit,

E = Elastizitätskoeffizienten im allgemeinen,

E' = Volumelastizitätskoeffizient, d. h. der Zuwachs des hydrostatischen Drucks, dividiert durch die ihn erzeugende Volumverschiebung,

η = linearer Elastizitätskoeffizient, d. h. der Zuwachs der Kraft durch die ihre erzeugende lineare Verschiebung.

$\epsilon_{r,e}$ = Empfindlichkeit für den Registrier- oder Endpunkt im allgemeinen, d. h. die Verschiebung dieser Stellen, dividiert durch die zu erzeugende Bewegung oder Kraftänderung an dem Verkoppelungspunkt des Systems,

$\gamma_{r,e}$ = Kraftempfindlichkeit, d. h. Verschiebung des Registrier- oder Endpunktes dividiert durch die Veränderung der Kraft (Massen- oder Flächenkraft) an dem Verkoppelungspunkt,

$\beta_{r,e}$ = Bewegungsempfindlichkeit, d. h. der Ausschlag dividiert durch die lineare oder Volumverschiebung an dem Verkoppelungspunkt,

T = Schwingungszeit, N = Schwingungszahl des Registriersystems,

Q = Querschnitt, L = Strecke, I = Inhalt,

l = Länge als Variable,

$U = \frac{V}{f}$ = Volumübersetzung.

1) Diese Bezeichnungen lehnen sich zum Teil an die früher angewandten an, weichen aber im einzelnen davon ab.

D. Allgemeine Statik der Registriersysteme.

Die Statik liefert die Beziehungen zwischen den Bewegungen und den Kräften des Registriersystems, wenn die Bewegung unendlich langsam vor sich geht. Durch einen derartigen Vorgang werden die Empfindlichkeiten des Systems ermittelt, der Ausschlag des Systems bestimmt, das System wird geeicht. Die Empfindlichkeit des Systems soll im allgemeinen in dem ganzen Bezirk der Ausschläge konstant bleiben, d. h. zwischen dem Ausschlag des Registrierpunkts und der Größe des Vorgangs an der Koppelstelle soll Proportionalität bestehen. Daß dies niemals ganz streng der Fall ist und sein kann, ist selbstverständlich. Daß auf der anderen Seite starke Disproportionalität das Kurvenbild vollständig entstellen kann, ist besonders von v. Frey (1893) hervorgehoben worden. Man muß in solchen Fällen jedenfalls aus den Eichungen das Kurvenbild konstruieren, bei dem vorausgesetzt wird, daß die Ordinaten der zu bestimmenden Größe proportional sind. Geringe Disproportionalität von wenigen Prozenten stört bei der Betrachtung der Kurve nicht. Die Feststellung dieser Konstanten ist notwendig für die Verwertung der registrierten Kurve zur Bestimmung des Ablaufes der Bewegung oder der Kraftveränderung an der verkoppelten Stelle. Die allgemeine Statik behandelt ebenso wie die allgemeine Dynamik nur die Verhältnisse des ganzen Systems ohne Rücksicht auf seine Zusammensetzung aus den einzelnen Bestandteilen.

Wichtig ist zunächst die Feststellung der Kraft- und Bewegungsempfindlichkeit.

Die erstere bemißt sich nach der Definition aus der Beziehung

$$\frac{f_r}{II} = \gamma, \dots \dots \dots (1)$$

worin f_r den Ausschlag des Registrierpunktes und II die an dem Verkoppelungspunkt einwirkende Kraft (Massen- oder Flächenkraft) bedeutet.

Für die Bewegungsempfindlichkeit gilt die ähnliche Beziehung:

$$\beta = \frac{f_r}{B} \dots \dots \dots (2)$$

Zur Berechnung der Rückwirkung ist noch die Bestimmung von weiteren Konstanten notwendig. Man muß hierzu die Kraft kennen, die notwendig ist, die Verkoppelungsstelle um einen gewissen Betrag nach der Registrierstelle hinzubewegen, wenn zugleich die Registrierstelle um einen bestimmten Betrag nach der Verkoppelungsstelle hinbewegt wird. Die Änderung der Kraft II als totales Differential ist gleich der Summe der partiellen Änderungen, d. h. es gilt folgende Gleichung:

$$dII = \frac{\partial II}{\partial B} dB + \frac{\partial II}{\partial f_r} df_r \dots \dots \dots (3)$$

Hierin bedeutet $\frac{\partial II}{\partial B}$ die Änderung der Kraft an der Verkoppelungsstelle, wenn sich die Verkoppelungsstelle allein nach der festgehaltenen Registrierstelle um einen gewissen Betrag hinbewegt. Ich bezeichne diesen Elastizitätskoeffizienten mit

$$E_K \dots \dots \dots (4)$$

Weiter bedeutet $\frac{\partial \Pi}{\partial f_r}$ den Kraftzuwachs an der Verkoppelungsstelle, wenn die Registrierstelle allein bewegt wird, während sie selbst festgehalten wird. Ich bezeichne diesen Elastizitätskoeffizienten mit

$$E_r \dots \dots \dots (5)$$

Danach haben wir folgende Beziehung unter der Voraussetzung, daß die Bewegung an der Verkoppelungsstelle und der Registrierstelle im gleichen Sinne erfolgt:

$$\left(\frac{f_r}{\beta} \cdot E_K - f_r \cdot E_r \right) = \Pi \dots \dots \dots (6)$$

Da $\frac{f_r}{\Pi} = \gamma$ ist, läßt sich noch folgendes ableiten:

$$\gamma = \frac{\beta}{E_K - \beta \cdot E_r}; \quad \beta = \frac{\gamma \cdot E_K}{1 + \gamma \cdot E_r}; \quad E_r = \frac{E_K}{\beta} - \frac{1}{\gamma}; \dots \dots (7)$$

d. h. der Koeffizient E_r braucht nicht besonders bestimmt zu werden, er läßt sich aus den drei anderen ermitteln.

Zu diesen Entwicklungen füge ich einige erläuternde Bemerkungen. Bei oberflächlicher Betrachtung könnte es scheinen, als ob die beiden Koeffizienten E_K und E_r identisch wären. Dies ist der Fall bei einigen einfacheren Systemen, so bei einem System, in dem sich zwischen dem Verkoppelungspunkt und dem Registrierpunkt nur ein elastisches Medium befindet, z. B. eine Spiralfeder. Liegen dagegen Übersetzungen zwischen den beiden Punkten, so sind die Koeffizienten nicht mehr gleich. Man denke beispielsweise an das Chauveau-Mareysche Manometer. Bei ihm erfordert die Bewegung der Verkoppelungsstelle um einen bestimmten Betrag eine viel größere Kraft, als die Druckwirkung beträgt, wenn man die Registrierstelle um denselben Betrag nach der Verkoppelungsstelle hin bewegt.

Eine besondere Beachtung verdienen die Volumübersetzungen, die durch Membranen bewirkt werden. Sie hängen von der Art der Deformation der Membran ab, d. h. davon, ob die Membran paraboloid oder logarithmische Form annimmt (s. Bd. II, 4). Nun berücksichtigen die folgenden Entwicklungen bei der Berechnung der Rückwirkung naturgemäß nicht die Partial-schwingungen. Die Deformationen werden also gerade so angenommen wie bei den statischen Verhältnissen. Bei optischen Registrierinstrumenten, deren Schlußteil aus einer Membran besteht, die nur mit verschwindenden Massen belastet ist, ist auch bei der Bewegung die Form nicht logarithmisch. Ge-setzt den Fall, es handle sich um die lineare Lufttransmission, so besteht das System aus folgenden Teilen. Die Bewegung am Anfangspunkt wirkt durch die Platte der Senderkapsel auf die Membran, von hier durch die Luft auf die Membran, die Platte und den Hebel der Registrierkapsel und erzeugt die Bewegung f_r der Hebelspitze. Die Membran der Registrierkapsel nimmt dabei paraboloid Form an. Wenn man also den Koeffizienten E_K bestimmen will, so hat die Membran der Registrierkapsel ihre paraboloid Form beizubehalten. Da f_r und damit die Membran nach der Definition des Koeffizienten E_K festgehalten werden soll, so muß sie durch eine feste ebene Platte bei der Bestimmung ersetzt werden.

E. Allgemeine Dynamik der kraftregistrierenden Instrumente.

a) Korrektur der Entstellungen.

Die dynamische Grundgleichung lautet:

$$H = \frac{f_r}{\gamma} + M \frac{d^2 f_r}{dt^2} + K \frac{df_r}{dt} \quad \dots \quad (8)$$

Die Dauer der Eigenschwingungen und die Größe der Dämpfung des Systems wird erhalten, wenn wir die Kraftänderung $= 0$ setzen. Dann erhalten wir

$$0 = \frac{f_r}{\gamma} + M \frac{d^2 f_r}{dt^2} + K \frac{df_r}{dt} \quad \dots \quad (9)$$

Daraus folgt unter Vernachlässigung kleiner Abweichungen

$$M\gamma = \frac{T^2}{4\pi^2} \quad \text{und} \quad K\gamma = \frac{D \cdot T}{\pi^2} \quad \dots \quad (10)$$

(s. O. Frank „Kritik“ 1903, S. 609).

Unter Einbeziehung dieser Größen erhalten wir die Schlußgleichung:

$$f_{\text{corr}} = f_{\text{reg}} + \left[\frac{T^2}{4\pi^2} \frac{d^2 f_r}{dt^2} + \frac{DT}{\pi^2} \frac{df_r}{dt} \right] \quad \dots \quad (11)$$

$$= H \times \gamma,$$

d. h. wir können aus den Ordinaten der registrierten Kurve den wahren Ablauf der Kraftänderung an der Verkopplungsstelle (auch an jeder anderen Stelle des Registriersystems) oder die diesem Ablauf proportionalen Ordinaten der korrigierten Kurve ableiten, wenn wir die Größe

$$M\gamma = 0,02533 T^2, \quad \dots \quad (12)$$

die ich als fiktive Masse μ bezeichnet habe, und die Größe

$$K\gamma = 0,1013 DT, \quad \dots \quad (13)$$

die ich als fiktive Dämpfung α bezeichnet habe¹⁾, aus der Eigenschwingung ermitteln. Die erstere wird bestimmt durch die Dauer der Eigenschwingungen, für die zweite ist noch die Kenntnis des logarithmischen Dekrements notwendig. Die Kenntnis der Größen M und K selbst ist nicht erforderlich. Ich bezeichne die Größe

$$\left[M\gamma \frac{d^2 f_r}{dt^2} + K\gamma \frac{df_r}{dt} \right] \quad \dots \quad (14)$$

als dynamische Korrektur (= dyn. Korr.) schlechtweg. Die absoluten Werte der Kraft H an der Verkopplungsstelle ergeben sich aus der Beziehung

$$H = \frac{f_{\text{corr}}}{\gamma}$$

(siehe Formel 1).

¹⁾ S. „Kritik“ 1903, S. 605, auch von Einthoven in Ann. der Phys. 21 1906 angewendet.

Daß die Aufnahme eines konstanten Gliedes, wie etwa die Schwere eines Gewichtes, an der Schwingungsdauer und damit an der Korrektur nichts ändert, habe ich in der „Kritik“ S. 468 erörtert. Danach spielt auch die Schwere eines Hebels keine Rolle, wie vielfach irrthümlicherweise angenommen wird, so auch in den von Marey redigierten Sätzen der Pariser Kommission, die in dem Programm des V. Physiologenkongresses Turin 1901 niedergelegt sind. Entgegengesetzt diesen Behauptungen ist es für die Frage der Treue der Aufzeichnungen ganz gleichgültig, ob sich die Hebel um eine senkrechte oder horizontale Achse drehen. Es kommt nicht auf die Schwere, sondern auf die Masse der bewegten Teile an.

b) Rückwirkung.

Für die Rückwirkung gilt die folgende Gleichung:

$$H = BE_k - f_r E_r = \frac{f_r}{\gamma} + \frac{\text{dyn. Korr.}}{\gamma} \dots \dots \dots (15)$$

Aus ihr folgt unter Berücksichtigung der statischen Beziehungen:

$$B = \frac{f_{\text{corr}}}{\beta} + \left[\text{dyn. Korr.} \left(\frac{1}{\gamma E_k} - \frac{1}{\beta} \right) \right] \dots \dots \dots (16)$$

Oder auch:

$$= \frac{f_{\text{corr}}}{\beta} - \left[\text{dyn. Korr.} \frac{E_r}{E_k} \right] \dots \dots \dots (17)$$

oder

$$= \frac{f_r}{\beta} + \frac{\text{dyn. Korr.}}{\gamma \cdot E_k} \dots \dots \dots (18)$$

Man sieht, daß zur Bestimmung der Rückwirkung, die sich nach der an der Koppelstelle auftretenden Bewegung bemißt, außer der Kenntnis der dynamischen Korrektur und der Kraftempfindlichkeit noch die Bewegungsempfindlichkeit und der Elastizitätskoeffizient E_k notwendig ist.

Den Ausdruck in der eckigen Klammer der Formeln 16 und 17 nenne ich die dynamische Rückwirkung. Sie ist insofern der wesentliche Teil der Rückwirkung, als sie am meisten den Ablauf der Bewegung an dem Verkopplungspunkt verändert. Sie ist proportional der dynamischen Korrektur, ist also in dem Resonanzfall am stärksten. Liegt die Schwingungszahl eines Registriersystems, wie es z. B. meist bei dem Quecksilbermanometer der Fall ist, unterhalb des Resonanzpunktes, so kommt das Instrument für die Registrierung des Kurvenverlaufs überhaupt nicht in Betracht. Der Rest der Rückwirkung ist die statische Rückwirkung, d. h. diejenige, die eintritt, wenn in dem Registriersystem weder Trägheitskräfte noch Reibungskräfte in merkbarer Größe auftreten. Man kann an ihr unter Umständen wieder einen konstanten Teil und einen veränderlichen Teil, der aus dem periodisch veränderlichen Ausschlag des Registriersystems resultiert, unterscheiden. Der erste Teil hat kaum eine Bedeutung bei den kraftregistrierenden Instrumenten. Dagegen ist der letztere wesentlich. Er wird gleich 0, wenn die Bedingung der Isometrie erfüllt ist (s. oben S. 32). Dagegen spielt bei der Rückwirkung der

bewegungsregistrierenden Systeme der konstante Teil eine wesentliche Rolle (s. unten S. 43).

Aus diesen Entwicklungen geht klar hervor, daß, abgesehen von der Reibungskonstante auch die Rückwirkung ebensowenig wie die Korrektur allein von dem Elastizitätskoeffizienten abhängt, d. h. der Fick-Hürthlesche Satz, daß dasjenige Manometer das beste ist, das für die Einstellung auf einen gewissen Druck die geringste Flüssigkeitsverschiebung nötig hat, reicht auch für die Beurteilung der Rückwirkung nicht aus.

Das zeigt besonders der unter der Resonanz liegende Fall, nämlich derjenige, bei dem die Schwingungsdauer sehr groß ist, so z. B. bei einem Hg-Manometer von sehr großer Länge der Säule. Die tatsächlich eintretenden Exkursionen des Manometers sind verschwindend klein, das Quecksilber bleibt fast still stehen, es wirkt wie eine starre Wand. Die Rückwirkung ist klein, trotzdem das Hg-Manometer für eine bestimmte Druckeinstellung eine sehr große Flüssigkeitsverschiebung nötig hat.

c) Die einzelnen kraftregistrierenden Instrumente.

Zu ihnen gehören der Muskelspannungsmesser, die verschiedenen elastischen Manometer, das Hg-Manometer, der Sphygmograph. Weiter der Transmissionssphygmograph und das Transmissionsmanometer von Marey, Chauveau und Fredericq. Die letzteren bestehen aus einer Vereinigung eines kraftregistrierenden Instrumentes mit einem bewegungsregistrierenden. Ihre Behandlung ist bis jetzt noch nicht zureichend durchgeführt, wenn auch in der „Dynamik“ eingeleitet.

F. Allgemeine Dynamik der bewegungsregistrierenden Instrumente.

a) Korrektur.

Die Grundgleichung lautet:

$$B \cdot E_K - f_r \cdot E_r = \frac{f_r}{\gamma} + M \frac{d^2 f_r}{dt^2} + K \frac{df_r}{dt} \dots \dots \dots (19)$$

Daraus folgt:

$$\frac{B \cdot E_K}{E_r + \frac{1}{\gamma}} = f_r + \frac{M}{E_r + \frac{1}{\gamma}} \frac{d^2 f_r}{dt^2} + \frac{K}{E_r + \frac{1}{\gamma}} \cdot \frac{df_r}{dt} \dots \dots \dots (20)$$

Eigenschwingungen führt das System aus, wenn an der Koppelstelle keine Bewegung stattfindet, B also 0 wird. Das System führt also Eigenschwingungen unter wesentlich anderen Bedingungen aus, als wenn es zur Bestimmung der Kraftkorrektur benutzt wird. Für die Dauer der Eigenschwingungen und die Größe der Dämpfung ergeben sich analoge Beziehungen wie bei dem kraftregistrierenden Instrument.

$$\mu = \frac{T^2}{4\pi^2} = \frac{M}{E_r + \frac{1}{\gamma}}; \quad \alpha = \frac{D T}{\pi^2} = \frac{K}{E_r + \frac{1}{\gamma}} \dots \dots \dots (21)$$

Wir erhalten dann die Schlußgleichung:

$$f_{\text{corr}} = f_r + \underbrace{\mu \frac{d^2 f_r}{dt^2} + \alpha \frac{df_r}{dt}}_{\text{Dynam. Korrektur}} \dots \dots \dots (22)$$

Für sie gilt dasselbe wie für die Schlußgleichung der kraftregistrierenden Instrumente. (S. F. 11.)

b) Rückwirkung.

Die Rückwirkung leitet sich aus folgender Gleichung ab: (S. F. 6).

$$\Pi = \frac{f_r + \text{dyn. Korr.}}{\beta} \cdot E_K - f_r \cdot E_r \dots \dots \dots (23)$$

Daraus folgt:

$$\Pi = \frac{f_{\text{corr}}}{\gamma} + \left[\text{dyn. Korr.} \cdot \left(\frac{E_K}{\beta} - \frac{1}{\gamma} \right) \right] \dots \dots \dots (24)$$

oder auch

$$\Pi = \frac{f_{\text{corr}}}{\gamma} + [\text{dyn. Korr.} \cdot E_r] \dots \dots \dots (25)$$

oder

$$\Pi = \frac{f_r}{\gamma} + \frac{\text{dyn. Korr.}}{\beta} \cdot E_K \dots \dots \dots (26)$$

Der Ausdruck in den eckigen Klammern ist die dynamische Rückwirkung (s. oben). Für die Bestimmung der Rückwirkung usw. gilt dasselbe, was über die Rückwirkung der kraftregistrierenden Instrumente gesagt worden ist.

c) Die einzelnen bewegungsregistrierenden Systeme.

1. Volum-Lufttransmission. Sie findet Anwendung z. B. bei der Kardiographie, wenn als Geberkapsel ein Trichter benutzt wird, der auf die Brustwand aufgesetzt wird.

2. Die lineare Lufttransmission. Sie bildet einen Teil des Transmissionssphygmographen und kann auch für sich zur Registrierung von linearen Bewegungen verwendet werden.

3. Die Volumtransmission mit inkompressibler Flüssigkeit. Sie wird manchmal bei der Plethysmographie angewandt. Als Registrierkapsel kann ein Pistonrekorder oder eine Mareysche Kapsel dienen.

4. Die einfache Fadentransmission. Sie wird angewendet in der Form der Suspensionsmethode, bei der ein Hebel durch einen unausdehnbaren Faden mit dem beobachteten System, dem Muskel oder dem Herzen, verbunden ist.

Die Fälle 1 und 2 lassen sich einfach nach den allgemeinen Gleichungen behandeln. Die Fälle 3 und 4 erfordern eine besondere Beachtung. Die Systeme führen nämlich keine Eigenschwingungen bei unverrücktem Anfangspunkt aus, weil durch die inkompressible Flüssigkeit oder durch den unausdehnbaren Faden die Entfernung zwischen dem Anfangs- oder Verkoppelungspunkt einerseits und dem Registrierpunkt andererseits unveränderlich bleibt, also der Elastizitätskoeffizient $E_K = \infty$ wird.

Die in dem beobachteten System, z. B. in der Herzwand oder den Gefäßwänden (vgl. auch die Theorie des Sphygmographen) usw. vorhandenen Elastizitätsfaktoren können unter Umständen Schwingungen hervorrufen. Sie lassen sich in die Analyse des Registriersystems selbstverständlich nicht einbeziehen, werden dagegen bei der Bemessung des Einflusses der Rückwirkung zu berücksichtigen sein.

Die Schwingungszeit wird dann gleich 0, die dynamische Korrektur wird zu 0, d. h. die Bewegungen werden von diesen Systemen unter den bezeichneten Voraussetzungen vollständig getreu aufgeschrieben. Für die dynamische Rückwirkung wird der Ausdruck der Gleichung unbestimmt. Sieht man von der Dämpfung ab, so läßt sich die dynamische Rückwirkung als das Produkt aus der Größe M und der Beschleunigung $d^2 B_K/dt^2$ bestimmen. $d^2 B_K/dt^2$ ist die Beschleunigung der Koppelstelle und annähernd $= \frac{d^2 f_r}{dt^2} \cdot \frac{1}{\beta_r}$. Die Größe M , d. h. diejenige Größe, die mit der Beschleunigung der Koppelstelle multipliziert die dynamische Rückwirkung gibt, kann bei den einfachen Systemen entweder rechnerisch leicht ermittelt werden oder durch Versuche, indem man das System durch Zufügung eines geeigneten elastischen Faktors in Schwingungen versetzt. Im letzteren Fall kann auch die Dämpfung bestimmt werden. Das System des Pistonrekorders mit inkompressibler Flüssigkeitstransmission kann z. B. leicht in Schwingungen versetzt werden, wenn man es in eine U-förmige Gestalt, wie ein Wasser- oder Hg-Manometer, bringt usw.

Ferner ist zu beachten, daß in den Fällen 3 und 4 die gegenseitige Unverrückbarkeit der beiden Punkte, des Koppelpunktes und des Registrierpunktes, durch die Eigenschaften des Übertragungsmittels nur in einem Sinn gewährleistet werden. Der Faden ist unausdehnbar. Die Entfernung zwischen seinen beiden Endpunkten kann, wenn er gespannt ist, nicht vergrößert werden, aber der Faden kann zusammenfallen. Die Flüssigkeit ist zwar inkompressibel, aber sie kann auseinander gerissen werden. Es muß also, wenn die Entfernung zwischen den beiden Endpunkten eines derartigen einseitig starren Systems unveränderlich gehalten werden soll, der Faden in jedem Moment der Bewegung gespannt und die Flüssigkeit durch einen Druck zusammengedrückt werden. Die Spannung des Fadens kann durch ein Gewicht oder eine Feder, das Andrücken der Flüssigkeit durch den hydrostatischen Druck oder die Spannung einer Membran bewirkt werden. Ob die Spannung des Fadens besser durch ein Gewicht oder durch eine Feder erfolgt, ist für die einzelnen Fälle zu untersuchen. Unter Umständen dürfte die Feder vorzuziehen sein, und zwar nicht allein, weil ihre Massenwirkung geringer als diejenige des Gewichtes zu halten ist, sondern weil ihre Kraft sich besser der Bewegung anpaßt, so daß die Rückwirkung kleiner als bei der Verwendung der konstanten Schwerkraft ist.

Eine eigentümliche Stellung nimmt der Luftdruck ein. Wenn z. B. ein Teil des Gefäßsystems in einem mit Wasser gefüllten Plethysmographen eingeschlossen ist, sei es eine Extremität, ein Organ oder das Herz, und die Volumenaufzeichnungen werden durch einen Pistonrekorder vorgenommen, so ist diejenige Kraft, die das Registriersystem: Flüssigkeit + Rekorder mit dem Körperteil verkoppelt, der Luftdruck, wenn man nicht noch

den hydrostatischen Druck der Flüssigkeit unnötigerweise dazu verwendet. Das Registriersystem folgt den Bewegungen, auch wenn der Punkt, wo die Flüssigkeit an das Organ angrenzt, nicht unter dem Endniveau der Flüssigkeit steht. Es ist dann der Luftdruck allein, der die Flüssigkeit zusammenhält und an die Oberfläche des Organs anpreßt. Diese überraschende Statuierung wird sofort einleuchten, wenn man sich überlegt, was dann geschieht, wenn der Luftdruck aufgehoben wird. Dann wird sich die Flüssigkeit bei den Bewegungen des Organs von der Oberfläche ablösen und den Bewegungen nicht mehr folgen. Im übrigen folgt das registrierende System den Bewegungen so lange getreu, wie der Luftdruck die Trägheitskräfte und die Reibungskräfte überwiegt. Diese verkoppelnde Kraft hat die Eigentümlichkeit, daß sie überhaupt keine Rückwirkung ausübt; denn sie wirkt auf das ganze geschlossene Gefäßsystem ein. Und der Kreislauf ist, rein mechanisch genommen, unabhängig von dem Luftdruck. In diesem Fall hat es natürlich keinen Sinn, eine Federkraft, also etwa die Spannung einer Membran, anzuwenden, wenn nicht etwa hierdurch technische Konstruktionschwierigkeiten vermieden werden.

Stets muß aber der Zug oder Druck, der durch diese verkoppelnden Kräfte erzeugt wird, größer sein als die dynamische Rückwirkung, also als der Ausdruck [dyn. Korr. E_r], d. h. die gesamte Rückwirkung darf nicht negativ werden. Sonst tritt das oben geschilderte Phänomen des Zusammenfallens des Fadens oder des Auseinanderreißens der Flüssigkeit ein. Hieraus sieht man wiederum, daß die dynamische Rückwirkung maßgebend für die ganze Konstruktion dieser Registriersysteme ist. Diese Sätze, so einfach und einleuchtend sie klingen, sind doch in ihrer Bedeutung früher nicht genügend gewürdigt worden. So hat Donders bei der Schaffung seiner Prüfungsmethode für den Sphygmographen nicht an sie gedacht, ebenso wenig wie Hürthle bei der Anwendung dieses Verfahrens. Solche Prüfungsmethoden haben nur dann einen Wert, wenn sie alle wesentlichen Momente berücksichtigen, wie dies von Petter bei der Ausbildung seines Prüfungsverfahrens für die Leistungen des Sphygmographen geschehen ist.

G. Berechnung der wesentlichen Konstanten eines Registriersystems aus den Konstanten seiner einzelnen Teile.

Zur Schätzung der Korrekturen und der Rückwirkung eines Instrumentes, weit mehr aber zur Auffindung von Verbesserungsmöglichkeiten für die Instrumententypen, ist es wichtig, aus den Konstanten der einzelnen Teile des Systems, die zur Charakteristik der Instrumente notwendigen Konstanten des ganzen Systems zu berechnen.

Die statischen Konstanten γ , β , E_k und E_r lassen sich meist unschwer berechnen. Ich gebe hier nur die Regel für die Berechnung der elastischen Koeffizienten eines zusammengesetzten Systems aus den Koeffizienten der einzelnen Teile. Die Regel lautet: Sind die elastischen Körper parallel geschaltet, d. h. sind ihre Enden festgehalten und greift die Kraft an den miteinander verbundenen deformierten Enden an, so addieren sich die elastischen Koeffizienten zu dem Gesamtkoeffizienten. Sind sie dagegen hintereinander geschaltet, d. h. greift die Kraft an dem einen Ende des

einen elastischen Körpers an, dessen anderes Ende auf das Ende des nächsten elastischen wirkt usw., so addieren sich die reziproken Werte der einzelnen Koeffizienten zu dem reziproken Wert des Koeffizienten des ganzen Systems.

Die Berechnung der Schwingungsdauer T des gesamten Systems läßt sich nach zwei Methoden durchführen, die beide dasselbe Resultat ergeben. Sie sind mir bei der Berechnung der komplizierten Manometer- und Lufttransmissionssysteme unentbehrlich gewesen.

Die eine Berechnung beruht darauf, daß man das Quadrat der Schwingungsdauer des Gesamtsystems als die Summe der Quadrate der einzelnen Elemente erhält.

$$T_{\text{tot}}^2 = \Sigma(T_1^2, T_2^2, T_m^2) \dots \dots \dots (27)$$

Die Methode ist eingehend begründet in der Einleitung der „Dynamik“. Sind die Elastizitätskoeffizienten der einzelnen Elemente, wie z. B. bei einer Luftsäule oder einer in eine elastische Röhre eingeschlossenen Flüssigkeit oder einer Spiralfeder usw., stetig mit der Länge des Systems veränderlich, so wird die Summe zu einem Integral (s. „Dynamik“ S. 328).

Das gleiche Resultat ergibt sich, wenn man einen einheitlichen Elastizitätskoeffizienten an irgendeiner Stelle des Systems, am bequemsten wohl an der Endstelle $= E_e$ der Berechnung zugrunde legt und die Massen unter Berücksichtigung ihrer gegenüber dem ins Auge gefaßten Punkt, dem Endpunkt, variablen Verschiebung summiert. Bezeichnet man die Verschiebung an einer beliebigen mittleren Stelle des Systems mit B_m und ist sie gleich $c_m B_e$, so wird die Gesamtmasse zu $\Sigma(c_m \cdot M_m)$ und die Schwingungsdauer zu

$$2 \pi \sqrt{\frac{\Sigma(c_m \cdot M_m)}{E_e}} \dots \dots \dots (28)$$

Die letztere Methode ist besonders in der „Kritik“ S. 522 ff., 538 ff., 548 ff. angewandt worden. Beide Methoden beruhen auf derselben Annahme, daß die relative Bewegung der einzelnen Elemente des Systems bei den Schwingungen ebenso erfolgt wie bei statischen, d. h. unendlich langsamen Verrückungen, oder daß die Bewegung nur in einem Sinn und zu gleicher Zeit erfolgt wie etwa bei einer stehenden Schwingung. Diese Voraussetzung ist, wie die Experimente gezeigt haben, bei den für die Registrierung gebrauchten Systemen genügend erfüllt. Die Summierung erfolgt auf Grund des d'Alembertschen Prinzips, nach dem die Bewegungen von Massensystemen berechnet werden. (S. „Kritik“.) Die Einwände, die gegen ein derartiges summarisches Verfahren für die Analyse von Flüssigkeits- und Luftbewegungen gemacht werden können, treffen im Prinzip auch alle Anwendungen des d'Alembertschen Prinzips, so auf die Bewegungen von festen Körpern; denn starre Körper gibt es in der Natur nicht.

H. Leistungen der Instrumente

Man fühlt das Bedürfnis, die Leistungen der Instrumente, die auf ihren wesentlichen Konstanten beruhen, in einen Ausdruck zusammenzufassen. Man wird bei der Bildung dieses Ausdrucks von der Dämpfung absehen

können, da sie durch einfache Mittel fast immer leicht auf das zweckmäßige Maß gebracht werden kann. Nur bei der Bewegung der Hebel selbst macht dies gewisse Schwierigkeiten. Hier stört die unregelmäßige Reibung, die an der Achse und besonders an den Teilen auftritt, welche die Übersetzung der gradlinigen Bewegung in die drehende des Hebels bewerkstelligen. Sie läßt sich aber durch geeignete Maßnahmen aufheben. (S. Prank und Petter, Ein neuer Sphygmograph, und Petter, Die Leistungen des Sphygmographen.) Die Bewegung von Flüssigkeiten erfolgt im allgemeinen mit regelmäßiger Reibung, die beliebig gestaltet werden kann.

Danach bleibt nur noch übrig, die statischen Konstanten, d. h. die Empfindlichkeiten und die Massenwirkung, bemessen nach der Schwingungsdauer, in einen Ausdruck zu vereinigen. Wenn man von der im allgemeinen zutreffenden Voraussetzung ausgeht, daß eine Verringerung der Schwingungsdauer nur auf Kosten der Empfindlichkeit erfolgen kann, so wird man als Güte des Instruments sinngemäß den Ausdruck

$$G = N^2 \cdot \varepsilon \dots \dots \dots (29)$$

zu wählen haben.

Der Ausdruck hat sich sehr bewährt für die Beurteilung der Leistungen der kraftregistrierenden Instrumente. Die Güte dieser Instrumente, der Spannungsschreiber, der Manometer und der Sphygmographen, ist also gleich dem Produkt aus der Empfindlichkeit und dem Quadrat der Schwingungszahl

$$= N^2 \cdot \gamma_r \dots \dots \dots (30)$$

Mit diesem Ausdruck ist auch die Rückwirkung dieser Instrumente im wesentlichen charakterisiert, da, wie die vorhergehenden Entwicklungen zeigen, die dynamische Rückwirkung abgesehen von diesem Ausdruck nur noch von der Konstante E_K abhängt.

Für die Beurteilung der Leistungen der bewegungsregistrierenden Instrumente wird man die Rückwirkung in den Vordergrund stellen, da bei einigen eine dynamische Korrektur überhaupt nicht notwendig ist. Man wird sinngemäß den Ausdruck

$$G = \frac{\beta_r}{M} \dots \dots \dots (31)$$

als die Güte des Instruments für die Rückwirkung bezeichnen. Seiner Bildung liegt wiederum die Voraussetzung zugrunde, daß die Erhöhung der Empfindlichkeit mit einer Vergrößerung der Massenwirkung verbunden ist. Man braucht sich nur die Verhältnisse bei dem einfachsten bewegungsregistrierenden Instrument, dem Muskellängenschreiber, vorzustellen, um diese Voraussetzung begründet zu finden.

Als Güte des bewegungsregistrierenden Instrumentes bezeichne ich also den Quotienten aus der Empfindlichkeit des Instrumentes, dividiert durch die Maße des Systems, d. h. diejenige Größe, die, mit der Beschleunigung der Verkopplungsstelle multipliziert, die dynamische Rückwirkung ergibt. (S. oben Seite 42.)

Die Mittel zu einer Erhöhung der Güte der Instrumente werden in Abschnitt I dieses Kapitels sowie bei den speziellen Beschreibungen der einzelnen Systeme besprochen. Hier ist nur der allgemeine Satz aufzustellen, daß jede dem eigentlichen Zweck des Instrumentes nicht dienende Einschaltung sowohl von Massen, aber auch von Elastizitätsfaktoren die Güte des Instrumentes herabsetzt. So wirkt beispielsweise die elastische Ausbuchtung der Membran neben der Platte bei den Membraninstrumenten ungünstig und drückt ihre Güte unter diejenige der Kolbeninstrumente herab.

Die Fähigkeit eines Instrumentes, rasche Bewegungen treu aufzuzeichnen, hängt vor allem von der Dauer seiner Eigenschwingungen ab. Von ihr hängt also ab die Möglichkeit, alle Einzelheiten eines Bewegungsablaufs darzustellen. Ich habe diese Eigenschaft mit dem Auflösungsvermögen der mikroskopischen und teleskopischen Objektive verglichen. (S. „Der Puls in den Arterien“.)

Andere Kriterien für die Leistungen der Instrumente als die von der Theorie gegebenen stehen diesen an Sicherheit weit zurück. Experimentelle Prüfungsverfahren wie die von Buisson, Porter und O. Frank gebildeten erscheinen jetzt bedeutungslos oder irreführend.

Zu untersuchen, wie bekannte Einwirkungen von dem Instrument wiedergegeben werden, ist nur selten möglich, da man genau bekannte Bewegungen oder Kraftänderungen kaum sicher herzustellen vermag. Außerdem muß man bestimmt wissen, daß diese künstlich hergestellten Bewegungen den zu untersuchenden in wesentlichen Punkten gleich sind. Daß, wenn hier einmal eine gewisse Sicherheit gewonnen ist, ein streng auf der Grundlage gebildetes Prüfungsverfahren sehr anschaulich die Leistungen der Instrumente darstellen kann, ist von J. Petter durch die weitere Ausbildung des Dondersschen Prüfungsverfahrens gezeigt worden. Noch unsicherer ist es, die Leistungen eines Instrumentes durch Vergleich mit den Aufschreibungen eines anderen, dem man dem Gefühl nach Vertrauen schenkt, beurteilen zu wollen. Auch die Bestimmung der Zeit, die ein Instrument braucht, um eine bestimmte Bewegung oder Kraftänderung zu registrieren, die Einstellungszeit, ermöglicht ohne genauere Ausbildung des Verfahrens keinen Schluß auf die Leistung des Instrumentes. Sie ist zum mindesten seit der Ausbildung der Theorie überflüssig geworden.

Bei einer Reihe von Instrumenten werden Hebel- und Volumübersetzungen gleichzeitig angewandt. Es ist dann die Aufgabe, zu entscheiden, ob durch die eine oder andere Übersetzung die Güte der Instrumente beeinflusst wird, bzw. was dasselbe ist, ob bei gleich erreichter Empfindlichkeit die Schwingungsdauer von dem Übersetzungsmodus abhängt. Daß dies für die Hebelmanometer dann, wenn der Durchmesser der Manometerkapsel rationell bemessen wird, nicht der Fall ist, ist in der „Dynamik“ im Anschluß an die Erörterungen in der „Theorie des Kolbenmanometers“ gezeigt worden (s. hierüber dieses Handbuch „Hämodynamik“ Kap. 4 B).

I. Verbesserung der Instrumente.

Wenn ein für einen bestimmten Zweck ausreichendes Instrument gebildet werden soll, müssen durch das Experiment die Anforderungen an die

Leistungen des Instruments festgestellt werden. Der Weg, der hier allein zum Ziele führt, ist in der Abhandlung „Der Puls in den Arterien“ gezeigt worden. Man registriert mit einem Instrument, das man aus allgemeinen Gründen, insbesondere technischer Natur, für geeignet hält, den festzustellenden Vorgang, also etwa die Druckschwankungen im Gefäßsystem. Dann stellt man die dynamischen Korrekturen und die Rückwirkung nach den in den vorhergehenden Kapiteln entwickelten Regeln fest. In den meisten Fällen wird das Instrument den Anforderungen nicht genügen, d. h. die Korrekturen und die Rückwirkung werden zu groß ausfallen. Dann hat man das Instrument entweder dadurch den Anforderungen anzupassen, daß man die Empfindlichkeit herabsetzt, soweit dies noch möglich ist. Oder besser dadurch, daß man die Güte erhöht durch möglichste Verringerung der Massenwirkung. Mit diesem neuen Instrument registriert man wiederum eine Kurve und bestimmt Korrekturen und Rückwirkung. Man fährt so lang fort, bis die Korrektur und die Rückwirkung auf das notwendige Minimum herabgedrückt ist. Würde man einen beliebigen Spielraum für die Verbesserungen haben, so könnte man allein aus dem Umstand, daß von einer gewissen Güte ab die Kurven bei weiterer Verbesserung sich nicht mehr verändern, auf die genügende Leistungsfähigkeit des Instrumentes schließen. In den meisten Fällen steht aber ein derartiger Spielraum nicht zur Verfügung, und man muß zufrieden sein, daß das beste konstruierbare Instrument eben gerade die Anforderungen erfüllt, d. h. daß bei ihm die Korrektur und die Rückwirkung genügend klein sind. Auf der andern Seite hat aber auch die Erfahrung gelehrt, daß es stets möglich ist, wenigstens wenn man die optische Registrierung zu Hilfe nimmt, Apparate zu bilden, die den Anforderungen der hämodynamischen Registrierung genügen.

Die rückwirkende Bewegung der kraftregistrierenden Instrumente, die an der Verkopplungsstelle eintritt, muß gegenüber an dieser Stelle vorhandenen Bewegungen verschwinden. Die rückwirkende Kraft der bewegungsregistrierenden Instrumente muß gegenüber den an der Verkopplungsstelle wirkenden Kräften zurücktreten. Danach ist die Rückwirkung desselben Instrumentes verschieden je nach der Stelle, an die es angelegt wird. Um den Einfluß der Rückwirkung zu untersuchen, wird man sie unter Umständen verstärken etwa durch Vergrößerung der Maße bei den bewegungsregistrierenden Instrumenten usw. Durch die Theorie ist man jetzt genau über die Bedeutung dieser Momente unterrichtet.

Wie schon bemerkt worden ist, kann man die Dämpfung meist ohne Schwierigkeiten auf den passenden Grad bringen. Petter hat auf eine interessante Folgerung aus dem Integral der Differentialgleichung der Mitschwingungen aufmerksam gemacht. Ist die Dämpfung so groß, daß gerade der aperiodische Zustand erreicht wird, so tritt, wenn die Schwingungsdauer des Registrierapparates T beträgt, für alle Schwingungen, die wesentlich länger als T sind, eine Phasenverzögerung von T/π ein, für eine Schwingungszahl von 180, wie sie bei den besten optischen Manometern erreicht wird, also ungefähr von $1/600$ Sekunde. Die Amplitude einer derartigen vergleichsweise langsamen Schwingung wird von dem Instrument richtig aufgeschrieben. Ist die Schwingungsdauer, die aufgeschrieben werden soll, ebenso lang wie die Eigenschwingung des Instrumentes, so beträgt die Ver-

zögerung etwas weniger, nämlich $T/4$, die Amplitude der aufgeschriebenen Schwingung aber nur noch die Hälfte der einwirkenden Schwingung. Danach wird man diesen Dämpfungsgrad mit Vorteil besonders dann anwenden, wenn die Teilschwingungen, wenigstens des Hauptzugs der Kurve, eine längere Schwingungsdauer besitzen als die Eigenschwingung des Registrierapparates.

K. Die praktische Verwertung der Theorie.

Die ganze von mir entwickelte Theorie ist wesentlich nur für einen praktischen Zweck geschaffen, nämlich einen zureichenden Aufschluß über die mechanischen Vorgänge, die Bewegungen und die Kraftveränderungen, durch die Registrierungen zu erhalten. Insofern ist kein Teil der vorhergehenden Erörterungen praktisch bedeutungslos. Ich hebe aber hier nochmals diejenigen Momente hervor, die für denjenigen von Bedeutung sind, der Registrierinstrumente praktisch anwendet.

Für den Experimentator gilt es, einen angenäherten Aufschluß über die Größe der dynamischen Korrektur und der dynamischen Rückwirkung zu bekommen. Hierzu müssen die Konstanten der Empfindlichkeit (ev. auch der Größe E_K) und der Schwingungsdauer T (ev. auch das Dekrement D) experimentell bestimmt werden. Die Methoden zur Bestimmung dieser Größen sind zum Teil schon in meinen früheren Abhandlungen angegeben worden. Dann müssen die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Anstiegs bzw. Abfalls der registrierten Kurven durch Messung ermittelt werden. Hierzu dienen geeignete Meßapparate, die im wesentlichen darauf beruhen, daß die Ordinatenhöhen für bestimmte Abszissenabstände und der Winkel des Anstiegs der Kurven an diesen Punkten mit ihnen leicht festgestellt werden können. Die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen können aus diesen Meßresultaten einfach abgeleitet werden. In dem „Arterienpuls“ ist ein einfaches Rechnungsverfahren hierfür angegeben. Diese Größen werden dann nach Maßgabe der Gleichungen mit den entsprechenden Konstanten multipliziert. Unter Umständen genügt es vollständig, die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen nur für ausgezeichnete, leicht erkennbare Punkte, an denen sie besonders hohe Beträge erreichen, zu bestimmen.

Zur Ermittlung des Dekrements ist folgendes zu beachten: Man nennt die Schwingungsweite oder auch den Schwingungsbogen die Entfernung zweier aufeinander folgender Umkehrpunkte. Das Verhältnis einer Schwingungsweite zu der folgenden heißt Dämpfungsverhältnis. Und der natürliche Logarithmus dieses Verhältnisses ist das logarithmische Dekrement. Wenn W_m die Größe der m ten Schwingungsweite und W_n die der n ten Schwingungsweite ist, so gilt folgende Beziehung:

$$D = \frac{\ln W_m - \ln W_n}{n - m}$$

Hierbei ist zu bemerken, daß die verschiedenen Verfahren, die in den Gleichungen niedergelegt sind, zu denselben Werten führen, d. h. wenn man ein kraftregistrierendes Instrument nach dem für die bewegungsregistrierenden Instrumente entwickelten Prinzip behandelt, und die jetzt andere Schwingungs-

dauer nach diesem Prinzip bestimmt, so erhält man die Rückwirkung nach der Gleichung 22, aus der die Korrektur für ein bewegungsregistrierendes Instrument bestimmt wird, und umgekehrt. Oder anders ausgedrückt, man kann die Rückwirkung eines kraftregistrierenden Instrumentes sowohl nach den Gleichungen 16, 17, 18 oder 22 bestimmen. Es fragt sich nur, ob die experimentelle Bestimmung der Konstanten E_K oder der anderen Schwingungsdauer einfacher ist. Im allgemeinen wird man wegen der Einfachheit der Berechnung das erstere Verfahren vorziehen.

Viel öfter wird es sich aber für den Experimentator darum handeln, die wesentlichen Größen, die Empfindlichkeit und die Schwingungsdauer schätzungsweise zu berechnen. Wird einmal die Theorie in ihrem vollen Umfang auf alle Registrierungen angewandt sein, ein Zeitpunkt, der nicht mehr fern ist, dann hat man die Anforderungen an die Instrumente kennen gelernt. Es wird dann festgestellt sein, ob in einem bestimmten Fall eine bestimmte Schwingungszahl für die genügend richtige Registrierung zureicht. Ebenso wird für die bestimmten Fälle die Empfindlichkeit normiert sein. Der Experimentator wird sich dann rasch zu unterrichten haben, ob ein vorliegendes Instrument diese Bedingung erfüllt. Hierzu dient am besten eine schätzungsweise Berechnung dieser Größen. Sie kann in allen Fällen auf Grund der für die einzelnen Instrumente mitgeteilten Berechnungen leicht durchgeführt werden. Außerordentlich erleichtert werden diese Berechnungen, wenn man das absolute Maßsystem, wie dies durchgehend in meinen Arbeiten geschehen ist, anwendet.

Über eine Größe kann allerdings die Berechnung keinen Aufschluß geben, das ist die Dämpfung. Sie muß im Notfall experimentell ermittelt werden, wie vorher angegeben wurde.

L. Geschichte der Theorie.

Mit ein paar Worten will ich die Vorgeschichte meiner theoretischen Entwicklungen skizzieren. Die erste Anwendung der theoretischen Physik auf die Analyse graphischer Methoden rührt wohl von Redtenbacher her, der nach einer Darstellung in der Vierordtschen Monographie „Die Lehre vom Arterienpuls“ S. 12 die Theorie der Mitschwingungen zur Bestimmung der Leistungen des Quecksilbermanometers verwendete¹⁾. Er stellte eine Differenzialgleichung für die Bewegungen des Quecksilbermanometers auf, die im Prinzip bei allen späteren Untersuchungen beibehalten worden ist. Nicht berücksichtigt war von Redtenbacher die theoretisch weniger bedeutungsvolle Dämpfung. Eingehender beschäftigte sich mit der Theorie der Instrumente E. Mach, der in seinen Abhandlungen der Jahre 1862 und 1863 die eigentliche Grundlage für eine rechnerische Behandlung der Leistungen der Instrumente geliefert hat. Ich sehe das Hauptverdienst von Mach hauptsächlich in der Konstatierung, daß die Differentialgleichung für die Bewegungen eines Registriersystems — er behandelt vorzugsweise den Sphygmographen — dazu benutzt werden kann, um die registrierten Kurven

1) Welche Rolle Seebeck bei der Entstehung dieser Theorie gespielt hat, wäre mir ohne eingehende Studien, die ich nicht durchführen kann, nicht möglich festzustellen. S. im übrigen den Teil Hämodynamik.

zu korrigieren, während Redtenbacher und bis auf die Neuzeit alle späteren Autoren das Integral der Differentialgleichung herangezogen haben, dessen Diskussion im allgemeinen viel schwieriger ist. Von Mach sind die allgemeinen Grundzüge der Theorie entworfen worden. Zu speziellen eingehenden Prüfungen einzelner Instrumente hat er sie nicht benutzt.

Die Ergebnisse seiner Untersuchungen sind in den nächsten Jahren fast vollständig vergessen worden. Niemand hat sein Korrekturverfahren angewendet. Nur vereinzelt ist auf sie zurückgegriffen worden. So von v. Kries bei der Aufstellung einer Gleichung für die Bewegungen des Quecksilbermanometers, die mit der Redtenbacherschen identisch ist, und v. Frey bei seiner Diskussion der Leistung des Tonographen. Von den Autoren, die wesentlich empirisch bei der Konstruktion von Registrierinstrumenten verfahren sind, wie Landois, Hürthle u. a., sind stets nur einige und nicht immer die wesentlichen Momente berücksichtigt worden. Wegen der naturgemäßen Unvollständigkeit dieser empirischen Konstruktionsversuche sind Kriterien für die Leistungen der Instrumente aufgestellt worden, die als unzureichend, ja als falsch bezeichnet werden müssen. Selbst Fick, in dessen Abhandlungen sich viele wertvolle Gesichtspunkte finden, ist nicht konsequent vorgegangen und hat im Laufe seiner Bestrebungen, die Instrumente zu verbessern, wieder manches fallen gelassen, was er vorher als richtig erkannt hatte und was sich später auch als richtig herausgestellt hat.

Kap. 6 ist mit Ausnahme der Einleitung und des Schlusses ein fast unveränderter Abdruck meiner Abhandlung „Prinzipien der graphischen Registrierung“.

Donders 1868. Zur Physiologie des N. vagus. Pflügers Arch. I, S. 332.

Frank, O. 1903. Kritik der elastischen Manometer. Zeitschr. für Biologie 45, S. 447.

Prinzipien der graphischen Registrierung. Zeitschr. für Biologie 53, S. 429. 1910.

— Dynamik der Membranmanometer etc. Zeitschr. für Biologie 50, S. 309.

— Der Puls in den Arterien. Zeitschr. für Biologie 46, S. 441.

v. Frey 1893. Die Ermittlung absoluter Werte für die Leistung von Pulsschreibern.

Du Bois-Reymonds Archiv.

Grashey 1882. Die Wellenbewegung in elastischen Röhren.

Hürthle ab 1888. Beiträge zur Hämodynamik, Pflügers Archiv XLIII ff.

v. Kries 1878. Über die Bestimmungen des Mitteldruckes durch das Quecksilbermanometer. Du Bois-Reymonds Archiv.

E. Mach 1862. Zur Theorie der Pulswellenzeichner. Wiener Sitzungsber. 46, 2, S. 157.

E. Mach 1863. Über die Gesetze des Mitschwingens. Ebenda 47, 2, S. 33.

Redtenbacher 1854 in Vierordt: Die Lehre vom Arterienpuls in gesunden und kranken Zuständen. Braunschweig 1855. S. 12.

Seebeck, Ann. d. Physik LXII, S. 289.