

Erste Abhandlung.

Die Analyse der Druck- und Strompulse.

Von

K. Hürthle.

(Mit 3 Textfiguren und Tafel II.)

Inhaltsübersicht.

	Seite
1. Die Grundsätze der Kurvenanalyse	304
2. Das Schema der Aortenbahn	306
3. Der Stromquotient	309
4. Die Kurvenanalyse	310
5. Prüfung der Voraussetzungen	313
6. Zusammenfassung	320

1. Die Grundsätze der Kurvenanalyse.

Der Analyse der Pulscurve wird im allgemeinen die Weber'sche Theorie der Wellenbewegung in elastischen Schläuchen zugrunde gelegt. Der Anwendung dieser Theorie steht aber eine Schwierigkeit entgegen, die v. Kries¹⁾ besonders hervorgehoben hat, dass im Arteriensystem und insbesondere an dessen Anfang keine Proportionalität zwischen Druck und Stromstärke besteht, während diese Abhängigkeit von der Wellenlehre verlangt wird, soweit sie nicht durch Wellenreflexion eine Störung erfährt. v. Kries zieht daher in Erwägung, ob es angezeigt ist, das Arteriensystem als elastisches Reservoir (Windkessel) zu betrachten, „in welches rhythmisch Flüssigkeit eingepresst wird, und aus welchem die Flüssigkeit durch enge Öffnungen abfließt.“ Im Zuflussrohr eines solchen Reservoirs herrscht nämlich dieselbe Beziehung zwischen Druck und Stromstärke, die wir am Anfang der Aorta finden: während die Geschwindigkeit zwischen Null und einem gewissen Werte sprunghaft wechselt, sinkt der Druck niemals auf Null,

1) v. Kries, Studien zur Pulslehre Kap. II § 1. Freiburg i. B. 1892.

sondern steigt relativ rasch von einem gewissen Minimum zum Maximum an, um langsam und allmählich wieder zum Minimum abzusinken. Trotz dieser Übereinstimmung der Vorgänge im Reservoir und in der Aortenbahn entscheidet sich v. Kries nicht für diese Auffassung, weil „diese scheinbar so einfache Einrichtung doch auch eine besondere Art der Zusammenfügung elastischer Apparate darstellt“, für welche die Gesetze der Wellenbewegung gelten müssen. „Der Vorgang im Reservoir lässt sich also auch als Reflexion der durch die Einpressung erzeugten Welle auffassen; nur sind im allgemeinen bei der Kürze des Weges die einzelnen Wellen nicht erkennbar, und statt einer beständig hin- und herlaufenden Welle erscheint eine konstante Druckerhöhung. Ein elastischer Schlauch kann demgemäss als Reservoir durchaus nur dann wirken, wenn die Flüssigkeit nur durch relativ enge Öffnungen aus ihm abfliessen kann und somit die Bedingungen für eine positive Reflexion der Wellen gegeben sind.“

Wenn nun auch dieser Auffassung grundsätzlich nichts im Wege steht, scheint mir doch das Verfahren, das Arteriensystem als Windkessel zu betrachten, den Vorzug zu verdienen, weil es das einfachere und nicht an den Nachweis positiver Wellenreflexion gebunden ist; denn es ist möglich, wenn nicht wahrscheinlich, dass die Pulswelle im Kapillargebiet durch Reibung erlischt, da diese wegen der starken Zunahme der Oberfläche nach der Peripherie hin sehr bedeutend wird.

Die Aortenbahn als elastisches Reservoir zu betrachten, wird auch durch die noch wenig beachtete Tatsache nahegelegt, dass der Querschnitt der Aorta, verglichen mit dem der peripheren Arterien, ein unverhältnismässig grosser¹⁾ ist, denn die Eigentümlichkeit eines elastischen Reservoirs besteht unter anderem darin, dass seine Kapazität im Verhältnis zum Querschnitt der Abflussröhren gross ist.

Im folgenden wird aber der Begriff des elastischen Reservoirs auch auf die peripheren Arterien ausgedehnt. Die Berechtigung hierzu gründet sich nicht allein darauf, dass auch dieser Teil des Systems elastisch ist, sondern vor allem auf die Beziehung zwischen Druck und Stromstärke, die auch in den grösseren Arterien derart

1) R. Thomé, Arterien Durchmesser und Organgewicht. Pflüger's Arch. Bd. 82 S. 474. 1900.

ist, dass sie sich aus dem Windkesselprinzip erklärt. Der Darstellung dieser Beziehung dienen die folgenden Abschnitte.

2. Das Schema der Aortenbahn.

Den experimentellen Beweis für die Berechtigung, die arterielle Bahn als ein elastisches Reservoir zu betrachten, glaube ich schon früher durch die Analyse künstlicher, an einem Schema erzeugter Pulse erbracht zu haben¹⁾. In diesem Schema ist die Aortenbahn einschliesslich ihrer Verzweigungen durch den Gummischlauch $G_1 G_2$ repräsentiert, der in der Fig. 1 unterbrochen gezeichnet ist; der Widerstand der kleinsten Gefässe wird durch drei Bündel von Glaskapillaren (W_1, W_2, W_3)²⁾ dargestellt, für welche das Poiseuille'sche Gesetz gilt. Die Bündel können durch Hähne

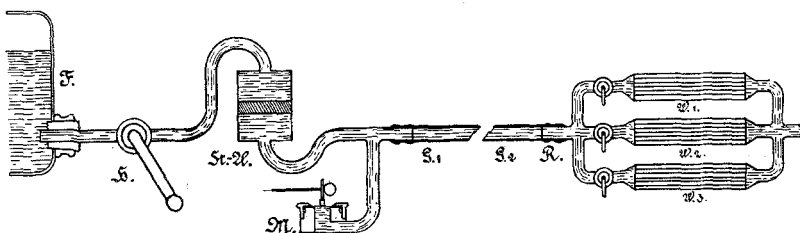


Fig. 1.

einzeln ein- und ausgeschaltet werden, so dass drei verschiedene Stromstärken hergestellt werden können. Durch das System von Gummischlauch und Widerständen wird eine Strömung unter rhythmisch wechselndem Druck in folgender Weise hergestellt:

Das System ist durch den mit Kurbel versehenen Hahn H mit der Flasche F verbunden, in welcher sich destilliertes Wasser unter einem Druck von 120—160 cm Wasser befindet. Durch regelmässige Öffnung und Schliessung des Hahnes wird die pulsatorische Strömung unterhalten. Druck und Stromstärke werden durch Manometer und Stromuhr ($M, St-U$) registriert, die abwechselnd am Anfang des Systems, wie in der Fig. 1 gezeichnet ist, oder am Ende der elastischen Bahn (zwischen G_2 und die dreiteilige Röhre R) oder in den Verlauf des Schlauches, zwischen G_1 und G_2 , eingesetzt wurden; im letzteren Fall können wir einen zentralen und einen peripheren Windkessel unterscheiden.

1) K. Hürthle, Pflüger's Arch. Bd. 147 S. 539.

2) l. c. S. 541.

Registriert man Druck und Stromstärke an diesen drei Punkten der Bahn unter sonst gleichen Bedingungen, so zeigt sich folgendes:

Während die Form der Druckkurve an allen Punkten der Bahn in ihrem wesentlichen Verlauf die gleiche ist, zeigt die Stromkurve charakteristische Unterschiede, die in Fig. 2 schematisch dargestellt sind. Am Ende der Bahn bildet die Stromkurve eine kaum merklich

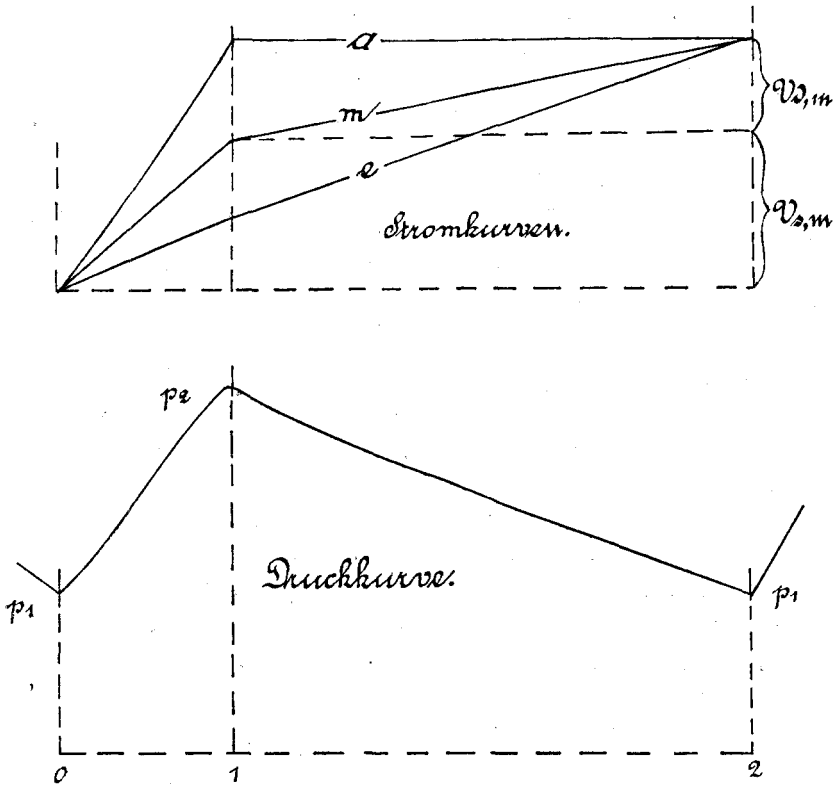


Fig. 2.

gekrümmte (*e*), am Anfang eine scharf geknickte Linie mit einem steil aufsteigenden und einem horizontalen Schenkel (*a*); im Verlauf des Schlauches zeigt sie eine geringe Knickung (*m*) und nähert sich dem geradlinigen Typus (*e*) mit zunehmender Entfernung des untersuchten Querschnittes vom Anfang der Bahn. Für die Typen *m* und *e* sind in Fig. 1 und 2 Taf. II zwei Originalkurven mitgeteilt. Der verschiedene Verlauf der Strom- bei gleichbleibender Druckkurve erklärt sich in folgender Weise:

Der Druckverlauf ist längs der ganzen Bahn im wesentlichen derselbe, weil die Schlauchlänge relativ klein, d. h. nur ein Bruchteil der Wellenlänge¹⁾ ist, und weil der Widerstand des Schlauches im Vergleich zu dem der Kapillarbündel verschwindend gering ist.

Die geknickte Linie (*a*), welche die Stromkurve am Anfang des Schlauches bildet, entsteht dadurch, dass die Strömung nur während der Hahnöffnung besteht und den aufsteigenden Schenkel der Strom- wie der Druckkurve erzeugt. Mit der Hahnschliessung sinkt die Stromstärke auf Null, die Stromkurve bildet eine horizontale Linie — entsprechend dem Stillstand des Stromuhrkolbens —, während die Druckkurve der Entleerung des Schlauches entsprechend absinkt. Das Missverhältnis zwischen Druck- und Stromkurve während der Diastole entsteht dadurch, dass das während der Hahnöffnung (Systole) in den Schlauch gepresste Stromvolum nicht allein zur Unterhaltung der Strömung durch die Kapillaren, sondern auch zur Kapazitätzunahme des Schlauches verwandt wird, und die diastolische Kapazitätsabnahme des Schlauches keinen Einfluss auf die am Anfang des Systems gelegene Stromuhr hat.

Der kaum merklich gekrümmte Verlauf der Stromkurve am Ende der elastischen Bahn (*e*) entsteht dadurch, dass sich zwischen Stromuhr und Kapillaren kein dehnbarer Teil befindet und die Stromuhr ausschliesslich die durch die Kapillaren abströmenden Volumina registriert, die dem Druck proportional sind. Bei konstantem Druck würde daher die Stromkurve eine gerade Linie bilden; von dieser weicht unsere Kurve bei genauerem Zusehen merklich, aber nicht in scharf ausgesprochener Weise ab, weil die Unterschiede des Mitteldruckes im Verlauf des Pulses nicht bedeutend genug sind, um wesentliche Änderungen der Stromstärken zu veranlassen.

Beim mittleren Typus (*m*) werden die systolischen und diastolischen Stromstärken ungleicher; denn die im systolischen Teil durch die Stromuhr fliessende Menge dient nicht nur zum Abfluss durch die Kapillaren, sondern auch zur Dehnung des (zwischen Stromuhr und Kapillaren liegenden) Schlauchstückes. Im diastolischen Teil dagegen geht weniger als die ganze durch die Kapillaren ab-

1) Die Schlauchlänge schwankte in den Versuchen zwischen 67 und 100 cm Tab. I und II), während die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im benutzten Schlauch 18 m/Sek., die halbe Wellenlänge 2,7 m betrug (Einströmungsdauer = 0,15 Sek.).

fließende Menge durch die Stromuhr, da ein Teil der Abflussmenge durch die Kapazitätsabnahme der genannten Schlauchstrecke gedeckt wird. Die systolische Stromstärke ist also relativ grösser als die diastolische, was sich an der Stromkurve durch eine mehr oder weniger ausgesprochene Knickung an der Grenze von Systole und Diastole bemerklich macht.

3. Der Stromquotient.

Die drei Typen der Stromkurven lassen sich quantitativ und kurz durch einen Zahlenbegriff kennzeichnen, den ich Stromquotienten (St-Q) nenne: Da nämlich der wesentliche Unterschied der drei Typen im Verhältnis der diastolischen zur systolischen Stromstärke liegt, bringt ein Quotient, der dieses Verhältnis darstellt, den Typus des Strompulses in einer Zahl zum Ausdruck.

Für die zweckmässige Gestaltung des Quotienten ist zu berücksichtigen, dass die Dauer der Diastole eine sehr wechselnde und im Vergleich zur Systole eine sehr lange ist; das Verhältnis der absoluten systolischen und diastolischen Stromstärken würde daher kein gesetzmässiges sein. Da aber die für die systolische und diastolische Stromstärke verantwortlichen Faktoren (Widerstand und Elastizität der Bahn) in allen Zeitteilchen dieselben sind, dürfen die beiden Stromstärken auf gleiche Zeiten bezogen werden. Ferner ist angezeigt, die beiden Stromstärken auch auf gleiche Druckwerte zu beziehen, da die Mitteldrucke im systolischen und diastolischen Teil des Pulses selten gleich sind, im Quotienten aber nicht die Abhängigkeit der Stromstärke vom Druck zum Ausdruck kommen soll. Ich bezeichne daher als Stromquotienten das Verhältnis der diastolischen zur systolischen Stromstärke, beide auf Zeit- und Druckeinheit bezogen:

$$\frac{V_{\uparrow} \cdot \frac{1}{t_{\uparrow} \cdot p_{m\uparrow}}}{V_{\downarrow} \cdot \frac{1}{t_{\downarrow} \cdot p_{m\downarrow}}} \text{)}.$$

Die auf diese Weise berechneten Stromquotienten nehmen an den einzelnen Querschnitten der elastischen Bahn des Schemas folgende Werte an:

1) Die Bedeutung der Zeichen ist S. 311 angegeben.

Am Anfang der Bahn hat der Zähler des Quotienten einen bestimmten positiven Wert a , der Nenner stets den Wert Null, weil die Stromstärke $= 0$ ist; der Quotient ist also $\frac{a}{0} = \infty$.

Am Ende der Bahn folgt die Stromstärke dem Poiseuille'schen Gesetz, d. h. in jeder Phase des Pulses ist das pro Druck- und Zeiteinheit fliessende Stromvolum gleich ($= b$); der Quotient ist also $\frac{b}{b} = 1$.

Im Verlauf des Schlauches endlich ist der Zähler des Quotienten stets grösser als der Nenner, die systolische Stromstärke grösser als die diastolische; der Quotient bildet daher eine positive Zahl, deren Wert zwischen 1 und ∞ schwankt, in der Weise, dass er um so grösser wird, je näher sich der untersuchte Querschnitt dem Anfang der Bahn befindet und umgekehrt. Beispiele für die tatsächlich gefundenen Werte der Quotienten folgen in den Tab. I und II Stab 10 S. 317 u. 318.

Schliesslich ist hervorzuheben, dass der Stromquotient unabhängig von unseren Voraussetzungen ist und den Strompuls charakterisiert, auch wenn sich die im folgenden erörterten Voraussetzungen der Kurvenanalyse nicht als zulässig erweisen sollten (s. S. 343 und 419).

4. Die Kurvenanalyse.

Quantitativ lässt sich die Abhängigkeit der Stromstärke vom Druck im Verlauf eines Pulsschlages an einem Querschnitt der elastischen Bahn wenigstens näherungsweise unter gewissen Voraussetzungen berechnen, deren Zulässigkeit im folgenden Abschnitt geprüft wird. Diese Voraussetzungen sind:

1. Das Poiseuille'sche Gesetz gilt auch für rhythmischen Druck.

2. Die Volumelastizität des Schlauches ist innerhalb der beanspruchten Druckgrenzen konstant; ein Einfluss der Zeit darf vernachlässigt werden. Hat die bei der Druckdifferenz $p_2 - p_1$ auftretende Kapazitätsänderung des zwischen Stromuhr und Widerständen eingeschalteten Schlauchstückes (des peripheren Windkessels) den Wert E , so ist die auf die Druckeinheit entfallende Volum-änderung

$$e = \frac{E}{p_2 - p_1}; \quad E = (p_2 - p_1) e.$$

3. Der Einfluss der Wellenbewegung darf vernachlässigt werden, weil die durch Druck, Widerstand und Elastizität der Bahn gegebene Stromstärke durch die Wellenbewegung nur unwesentlich verändert wird, wenigstens so lange der Mitteldruck nicht unter einen gewissen Wert (nahe 0) sinkt.

Unter diesen Voraussetzungen ist die Beziehung zwischen Druck und Stromstärke in den einzelnen Querschnitten der elastischen Bahn die folgende:

1. Am einfachsten ist die Beziehung am Ende der elastischen Bahn, wo die Stromuhr unmittelbar die durch die Kapillaren abströmenden Flüssigkeitsmengen registriert; hier sind die registrierten Volumina dem Druck und der Zeit proportional. Fließt durch die Kapillaren in der Zeit t unter dem mittleren Druck p_m die Menge V , so ist die pro Druck- und Zeiteinheit fließende Menge

$$v = \frac{V}{p_m t}; \quad V = p_m t v.$$

Misst man an den registrierten Kurven, und zwar:

1. an der Druckkurve die Dauer des auf- und des absteigenden Schenkels (Systole und Diastole) t_{\uparrow} und t_{\downarrow} , den Mitteldruck¹⁾ während t_{\uparrow} und $t_{\downarrow} = p_{m\uparrow}$ und $p_{m\downarrow}$;
2. an der Stromkurve das Stromvolum während t_{\uparrow} und $t_{\downarrow} = V_{\uparrow}$ und V_{\downarrow} , so ist

$$V_{\uparrow} = p_{m\uparrow} v t_{\uparrow} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

$$V_{\downarrow} = p_{m\downarrow} v t_{\downarrow} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Die beiden Gleichungen enthalten nur die eine Unbekannte v , deren Werte, aus Gleichung 1 oder 2 bestimmt, gleich sind.

2. Am Anfang des Schlauches besteht Strömung nur während des aufsteigenden Schenkels der Druckkurve t_{\uparrow} (während der Hahnöffnung); das registrierte Stromvolum V_{\uparrow} setzt sich aus zwei Anteilen zusammen:

1. aus der durch die Kapillaren abfließenden Menge $p_{m\uparrow} v t_{\uparrow}$;
2. aus der zur Dehnung des Schlauches erforderlichen Menge $(p_2 - p_1) e$.

1) Im aufsteigenden Schenkel wurden die Ordinaten in Abständen von 0,5 mm (etwa = 0,01 Sek.) gemessen; im absteigenden in Abständen von 1 mm.

Misst man daher an der Druckkurve $p_{m\uparrow}$, t_{\uparrow} , p_2 und p_1 , an der Stromkurve V_{\uparrow} , so ist

$$V_{\uparrow} = p_{m\uparrow} v t_{\uparrow} + (p_2 - p_1) e \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Nach dem Hahnschluss, während der Diastole t_{\downarrow} ist das registrierte Stromvolum $V_{\downarrow} = 0$; die durch die Kapillaren abfliessende Menge $p_{m\downarrow} v t_{\downarrow}$ wird aus der Kapazitätsabnahme des Schlauches $(p_2 - p_1) e$ gedeckt; also $p_{m\downarrow} v t_{\downarrow} = (p_2 - p_1) e$

$$V_{\downarrow} = p_{m\downarrow} v t_{\downarrow} - (p_2 - p_1) e \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Durch Auflösung der Gleichungen 3 und 4 werden die Werte v und e ermittelt.

3. Im Verlauf des Schlauches besteht während der Systole dieselbe Beziehung zwischen Druck und Stromstärke wie am Anfang des Schlauches. Das registrierte Stromvolum V_{\uparrow} setzt sich aus den in Gleichung 3 genannten Anteilen zusammen, nur hat e — dem kürzeren zwischen Stromuhr und Kapillaren liegenden Schlauchstück entsprechend — einen kleineren Wert. Das während der Diastole registrierte Stromvolum V_{\downarrow} ist hier aber nicht $= 0$, weil die durch die Kapillaren abfliessende Menge $p_{m\downarrow} v t_{\downarrow}$ aus der Kapazitätsabnahme der beiden oberhalb und unterhalb der Stromuhr liegenden Schlauchabschnitte G_1 und G_2 (Fig. 1) gedeckt und der erstere Anteil von der Stromuhr registriert wird. Das Stromvolum V_{\downarrow} ist also gleich der durch die Kapillaren fliessenden Menge $p_{m\downarrow} v t_{\downarrow}$ abzüglich der durch die Kapazitätsabnahme der Schlauchstrecke G_2 (des peripheren Windkessels) gedeckten Menge (Gleichung 4). Es gelten also die Gleichungen 3 und 4 auch für diesen Fall; das registrierte Stromvolum V_{\downarrow} wird cet. par. um so grösser, je näher der untersuchte Querschnitt dem Ende der Bahn liegt, weil $(p_2 - p_1) e$ um so kleiner wird; am Ende der Bahn ist es gleich Null.

Bei der Registrierung von Druck und Strom in den grösseren Arterien liegt der grösste Teil des elastischen Reservoirs zentral, und nur ein sehr kleiner, „der periphere Windkessel“, stromabwärts von der Stromuhr.

Auswahl der Pulse.

Zur Ausmessung wählt man solche Pulse aus, in welchen der Druck während der Diastole auf das systolische Minimum (im Zeitpunkt 0 Fig. 3) oder tiefer sinkt; im letzteren Fall bleibt der unterhalb 3 liegende

Abschnitt der Diastole unberücksichtigt. Man hat dann erstens den Vorteil der Vereinfachung der Berechnung, weil in diesem Fall der Wert $(p_2 - p_1)e$ in den Gleichungen 3 und 4 gleich wird. Zweitens wird dadurch ein durch etwaige Inkonzanz der e -Werte entstehender Fehler vermieden. Bei den Tierversuchen kommt noch hinzu, dass das Poiseuille'sche Gesetz (auch für konstanten Strom) nicht als gültig vorausgesetzt werden darf. Im Falle der Nichtgültigkeit wird der Fehler der Analyse bei der genannten Massnahme am geringsten. In dieser Weise sind alle in den Tabellen mitgeteilten Pulse berechnet.

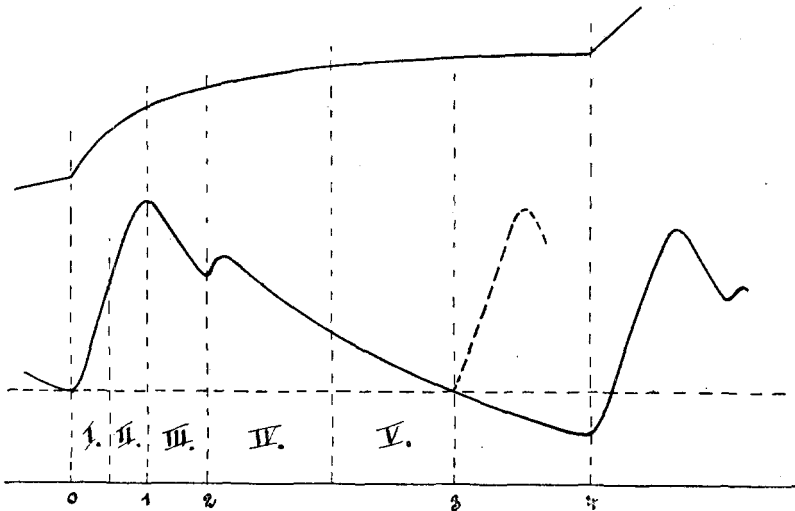


Fig. 3.

5. Prüfung der Voraussetzungen.

Dass unsere Gleichungen nicht ohne weiteres als der Ausdruck der bei der Strömung ablaufenden Vorgänge betrachtet werden dürfen, ergibt sich daraus, dass das Glied $p_m tv$, d. h. das Poiseuille'sche Gesetz, nur für konstanten Druck erwiesen ist, nicht aber für rhythmischen¹⁾. Ferner lässt sich das Glied $(p_2 - p_1)e$, d. h. die Konstanz der Elastizität innerhalb der Druckschwankung,

1) Ich habe zwar selbst (Pflüger's Arch. Bd. 82 S. 433, 1900) angegeben, das Gesetz gelte auch für rhythmischen Druck; diese Angabe gilt für die unter konstantem oder rhythmischem Druck in längeren Zeitabschnitten strömenden Flüssigkeitsmengen, während hier die Strömung in kleinen Zeitabschnitten, innerhalb des einzelnen Pulsschlages, untersucht wird.

zwar für langsame Dehnung des Schlauches als annähernd richtig erweisen, für die rasche pulsatorische Dehnung muss aber erst die Zulässigkeit der Voraussetzung nachgewiesen werden. Schliesslich ist die Wellenbewegung in den Gleichungen nicht berücksichtigt, obwohl nicht bezweifelt werden kann, dass die primäre Welle am Querschnitt der Kapillarbündel teilweise positiv reflektiert wird und die Wellenbewegung im Schlauch in Form von stehenden Schwingungen zum Ausdruck kommt (s. Fig. 1 u. 2 Taf. II)¹⁾.

Es muss daher festgestellt werden, ob durch die drei S. 310—311 formulierten Voraussetzungen nicht Fehler von einer Grössenordnung entstehen, durch welche die Brauchbarkeit der Analyse in Frage gestellt wird. Die Grösse dieser Fehler lässt sich dadurch feststellen, dass man in einzelnen Beispielen den Verlauf der Stromkurve unter jenen Voraussetzungen berechnet und die berechnete Kurve mit der registrierten vergleicht. Die Differenzen der berechneten und der registrierten Stromstärken stellen die Fehler dar.

Wie die Stromkurve zu berechnen ist, ist schon früher²⁾ geschildert worden: Man berechnet zunächst an einer ausgemessenen Strom- und Druckkurve den v - und e -Wert durch Auflösung der Gleichungen 3 und 4. Nun bestimmt man an der Druckkurve p_m , $p_2 - p_1$, sowie die Zeit t in geeigneten (beliebig kleinen) Zeitabschnitten und bildet die Produkte $p_m v t$ und $(p_2 - p_1) e$. Durch Summierung dieser beiden Glieder erhält man dann die systolische Stromstärke im betrachteten Zeitabschnitt, die diastolische aus der Differenz der Glieder.

1) Wenn auch stehende Schwingungen nach der üblichen Definition nur durch periodische Vorgänge am Anfang des Systems entstehen, scheint es mir doch berechtigt, die in der Fig. 1 u. 2 Taf. II sichtbaren Nebenwellen diesem Typus zuzuzählen, weil ihre Dauer T mit grosser Annäherung $= \frac{2L}{\alpha}$ (L Schlauchlänge, α Fortpflanzungsgeschwindigkeit) ist, was für stehende Schwingungen charakteristisch ist. Diese Beziehung wurde durch pulsatorische Strömung in einem Schlauch von 175 cm Länge und 8 mm Lumen festgestellt, der durch einen Quetschbahn stufenweise um 25 beziehungsweise 10 cm gekürzt wurde. In allen Stufen bildeten sich Nebenwellen, deren aus T und L berechnetes α um nicht mehr als 10 % von dem durch zwei Transmissions-Sphygmographen experimentell bestimmten abwich, und zwar derart, dass sie zu klein war; nur in der letzten Stufe ($L = 10$ cm) erhob sich die Differenz auf 33 % in gleicher Richtung. Es können also Nebenwellen vom Charakter der stehenden Schwingungen durch einen Stromstoss entstehen.

2) K. Hürthle, l. c. (Pflüger's Arch. Bd. 147) S. 558.

Um die Berechnung nicht umständlicher zu gestalten, als für den vorliegenden Zweck erforderlich ist, wurde die Stromstärke nicht, wie es früher geschah, für gleiche kleinste Zeiteilchen berechnet, sondern für die in der Fig. 3 (S. 313) skizzierten Pulsabschnitte I—V. Da diese Zeitabschnitte ungleich gross sind, wurden jeweils die Quotienten $\frac{\text{Stromstärke}}{\text{Zeit}}$ gebildet, und man erhält auf diese Weise die relativen Geschwindigkeiten in fünf Abschnitten des Pulses¹⁾, zwei im Stadium des steigenden, drei im Stadium des sinkenden Druckes. Bei dieser Art der Vergleichung der registrierten und berechneten Stromstärken bleiben natürlich etwaige innerhalb der betrachteten Zeitabschnitte liegende Unterschiede der beiden Kurven unberücksichtigt; doch ist der Vergleich für den vorliegenden Zweck ausreichend, da es sich bei den Versuchen am Schema nicht um eine Analyse der Wellenbewegung, sondern der drei Stromtypen (S. 307) und bei den Versuchen am lebenden Tier um die Erklärung grober Unterschiede im Typus der Strompulse handelt. Übrigens wurde in einzelnen charakteristischen Fällen die Stromkurve fortlaufend in kleinsten Zeiteilchen berechnet und mit der registrierten verglichen (Textfiguren S. 344, 362, 370 und 371).

Mit Rücksicht auf den vorliegenden Zweck (Analyse der Karotis- und Cruralispulse) wurden die Berechnungen nur für die Typen *m* und *e* (Fig. 2 S. 307) der schematischen Pulse ausgeführt²⁾. Das Ergebnis der Berechnung ist in den Tabellen I und II enthalten.

Erklärung der Tabellen.

Stab 1 enthält die Angabe der mittleren Stromstärke, die durch Einschalten der Kapillarbündel I; I + II bzw. I + II + III (Fig. 1 S. 306) hergestellt und als Stromstärke I, II bzw. III bezeichnet wird.

Stäbe 2—7 die an den Kurven gemessenen Werte, und zwar 2—5 am Druckpuls gemessen: Mitteldruck (p_m Zentimeter Wasser), Druckschwankung ($p_1 - p_2$), Dauer des aufsteigenden (t_\uparrow) und des absteigenden Schenkels (t_\downarrow). Bei den Tierpulsen tritt an Stelle von t_\uparrow und t_\downarrow : t_s und t_d . — 6 und 7 am Strompuls gemessen: Stromvolum (Kubikzentimeter) während t_\uparrow : V_\uparrow ; während t_\downarrow : V_\downarrow .

1) Die wirklichen Geschwindigkeiten würde man erhalten, wenn man die mitgeteilten Werte durch den Querschnitt des Schlauches dividieren würde.

2) Der dritte Typus: Stromuhr am Anfang der Bahn kommt bei anderer Gelegenheit (Untersuchung des Aorteneinstroms) zur Sprache.

Stab 8 und 9: Stromvolum pro Druck- und Zeiteinheit: $\frac{V_{\uparrow}}{p_{m\uparrow} t_{\uparrow}} = v_{\uparrow}$;
 $\frac{V_{\downarrow}}{p_{m\downarrow} t_{\downarrow}} = v_{\downarrow}$.

Stab 10: St.-Q. (Stromquotient) $= \frac{v_{\uparrow}}{v_{\downarrow}}$.

Stab 11: Stromvolum pro Druck- und Zeiteinheit während des ganzen Pulses v_p , d. i. der mittlere Wert der Stromstärke; er ist umgekehrt proportional dem Widerstand.

Stab 12: Dehnbarkeit der zwischen Stromuhr und Kapillaren befindlichen Bahnstrecke, d. i. Volumänderung (Kubikzentimeter) pro Druckeinheit (Zentimeter Wasser) $= e$.

Stab 13: Stromstärke pro Zeiteinheit in den Abschnitten I—V des Pulses (Fig. 3 S. 313).

Für jeden Puls sind drei Zeilen vorgesehen: die erste enthält die registrierten Werte, die zweite die theoretisch berechneten. Die dritte Zeile enthält die Differenz der berechneten und registrierten Stromstärken in prozentischer Abweichung vom berechneten Puls.

Bei den Pulsen der Tabelle I befand sich zwischen dem Hahn H (Fig. 1) und der Stromuhr ein Gummischlauch von 62 cm Länge, 8 mm Durchmesser i. L. und 1,5 mm Wandstärke. An die Stromuhr war beim ersten Puls das Kapillarbündel W_I der Fig. 1 ohne elastisches Zwischenstück gekoppelt¹⁾, beim zweiten Puls war zwischen Stromuhr und W_1 ein Gummischlauch von 5 mm Durchmesser i. L. und 10 cm Länge eingesetzt; beim dritten Puls ein gleicher von 20 cm Länge. Die drei Pulse unterscheiden sich also durch die Grösse des peripheren Windkessels oder des e -Wertes (Stab 12). Das hat den aus Tabelle I (S. 317) ersichtlichen Einfluss.

Beim ersten Puls, bei welchem die Stromuhr unmittelbar die durch die Kapillaren strömenden Flüssigkeitsmengen registriert, ist Proportionalität zwischen Druck und Stromstärke zu erwarten. Das ist denn auch in grosser Annäherung der Fall: Die Auflösung der Gleichungen 3 und 4 (S. 312) ergibt zunächst einen sehr geringen e -Wert (Stab 12), der von dem theoretisch zu erwartenden (o) nur wenig verschieden ist. Ob diese Abweichung vollständig als Fehler zu betrachten oder zum Teil durch Mitwirkung elastischer Elemente (Luftbläschen zwischen Stromuhr und Widerstand) veranlasst ist, ist nicht zu entscheiden. Mit Hilfe des e - und

1) Allerdings wurden die starren Röhren durch ein Stück wenig dehnbaren Gummischlauches zusammengehalten, waren sich aber bis zur Berührung genähert.

Tabelle I. Am Schema gewonnene Pulse.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13					Schlauch- länge (u. Durchm.) cm	
												Stromstärke Zeit						
												I	II	III	IV	V		
Strom- stärke	p_m ↑ en Wasser	$p_1 - p_2$ en Wasser	$t \uparrow$ Sekt.	$t \uparrow$ Sekt.	$V \uparrow$ ccm	$V \uparrow$ ccm	$v \uparrow$	St-Q $v \uparrow$ $v \downarrow$	v_p	e								
I	133	94	62—184	0,15	1,29	0,33	1,91	0,017 0,017	0,016 0,016	1,1 1,1	0,016 0,016	0,00015 0,00015	1,65 1,73 - 5	2,82 2,73 + 3	1,90 1,89 + 0,5	1,46 1,48 - 1	1,16 1,15 + 1	registr. ber. % Abweicg.
II	137	96	55—199	0,15	1,76	0,53	2,56	0,025 0,025	0,015 0,015	1,7 1,7	0,016 0,016	0,0013 0,0013	2,83 3,19 - 11	4,15 3,80 + 9	1,96 1,99 - 1,5	1,69 1,68 + 0,6	1,16 1,15 + 1	registr. ber. % Abweicg.
III	143	111	79—187	0,15	1,15	0,67	1,79	0,030 0,030	0,014 0,014	2,1 2,1	0,016 0,016	0,0027 0,0027	3,87 4,42 - 12	4,61 4,05 + 14	1,78 1,64 + 8	1,73 1,79 - 3	1,35 1,36 - 1	registr. ber. % Abweicg.

v -Wertes sind die Stromstärken in den Abschnitten I—V des Pulses berechnet (Zeile 2, Stab 13); der Vergleich mit den registrierten (Zeile 1) ergibt, dass die Abweichungen nicht über 5% gehen (Zeile 3); bei einigen anderen Pulsen dieser Art gingen sie in den Abschnitten I und II bis 10%, und zwar in gleicher Richtung wie im vorliegenden Beispiel. Dieses Ergebnis wird man dahin auslegen dürfen, dass das Poiseuille'sche Gesetz auch bei rhythmischen Druckschwankungen in kleinen Zeitteilchen gilt, und dass die beobachteten Abweichungen auf Fehlern der Registrierung und Messung beruhen. Im Abschnitt I, in welchem die registrierte Stromstärke ganz regelmässig hinter der berechneten zurückbleibt, liegt allerdings möglicherweise eine Abweichung vom Poiseuille'schen Gesetz vor, da bei jeder pulsatorischen Beschleunigung die Trägheit der Flüssigkeit zu überwinden ist. Jedenfalls darf man sagen, dass der durch die Instrumente und ihre Handhabung, sowie der durch die Ausmessung der Kurven zusammen veranlasste Fehler 10% nicht übersteigt.

Tabelle II. Am Schema erhaltene Pulse.

Schlauchlänge, aufwärts von der Stromuhr 52, abwärts 15 cm; Durchmesser 0,7 cm i. L.

I	Strom- stärke	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13					reg. ber. % Abweicg.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
		p_m												St-Q	Stromstärke Zeit																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
		\uparrow	\downarrow												$v \uparrow$	$v \downarrow$	I	II		III	IV	V																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
		cm	Wasser	$p_1 - p_2$	Sek.	Sek.	ccm	ccm	$v \uparrow$	$v \downarrow$	$v \uparrow$	$v \downarrow$	e																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				</

Der Stromquotient (Stab 10), der theoretisch = 1 ist, entfernt sich von diesem Werte nur wenig in der positiven Richtung, in Übereinstimmung mit dem positiven e -Wert.

Beim zweiten und dritten Puls der Tabelle I, bei welchen sich eine dehnbare Strecke zwischen Stromuhr und Widerstand befindet, besteht aus den oben (S. 312) dargelegten Gründen keine Proportionalität zwischen Druck und Stromstärke, vielmehr ist die systolische wesentlich höher als die diastolische (Stäbe 8 und 9); der Stromquotient (Stab 10) ist grösser als 1; er wächst in dem Masse, als der e -Wert (Stab 12) im Vergleich zur mittleren Stromstärke grösser wird.

Die Abweichungen zwischen den registrierten und berechneten Stromstärken (Stab 13, I—V) fallen erheblich grösser aus als beim ersten Pulse, jedoch nicht in allen Abschnitten, sondern fast nur in I und II; nur beim dritten Puls ist auch Abschnitt III mehr beteiligt. Da die Abweichungen

ferner mit der Grösse der elastischen Strecke zunehmen (beim dritten Puls grösser sind als beim zweiten), fallen sie dem peripheren Windkessel zur Last. Eine Erklärung wird im Folgenden zu geben versucht.

Tabelle II dient zur Erläuterung des Einflusses der Stromstärke, die in den drei Pulsen drei verschiedene Werte hat (Stab 11).

Der Vergleich der berechneten mit den registrierten Stromstärken (Stab 13) zeigt im Beginn des Pulses (I) das schon in Tabelle I beobachtete Zurückbleiben der registrierten Stromstärke gegen die berechnete. Das Defizit beträgt aber 16 %, ist also grösser als in Tabelle I. Im Abschnitt II zeigt sich eine ebenso starke Abweichung in entgegengesetzter Richtung. In den Abschnitten III—V dagegen sind die Abweichungen wieder gering. Der erhebliche Unterschied in der Grösse der Fehler zwischen den Abschnitten des auf- und des absteigenden Schenkels der Druckkurve ist zum Teil wenigstens durch die verschiedene Dauer dieser Abschnitte veranlasst, die für den absteigenden Schenkel eine etwa zehnmal längere ist als für den aufsteigenden, zum Teil wohl durch die nicht ganz zutreffende Annahme, dass der e -Wert als konstant betrachtet werden dürfe. Dass die Bestimmung dieser Werte überhaupt den schwachen Punkt der Analyse bildet, wurde schon früher festgestellt¹⁾ und zeigt sich auch im vorliegenden Fall in dem Unterschied der e -Werte (Stab 12). Da nämlich der Windkessel (Schlauchstrecke von 15 cm zwischen Stromuhr und Kapillaren) bei allen drei Pulsen derselbe ist, sollte man Gleichheit der e -Werte erwarten; sie nehmen aber mit wachsender Stromstärke ab.

Die oben betonte Erscheinung, dass die Abweichungen der registrierten von den berechneten Stromstärken mit der Grösse der e -Werte zunimmt, sowie die entgegengesetzte Richtung dieser Abweichungen in den Abschnitten I und II dürften einer Inkonstanz der e -Werte zuzuschreiben sein, die dadurch veranlasst wird, dass der Schlauch bei den raschen Druckschwankungen eine Art von Nachdehnung zeigt, sofern er nicht dem Druck proportional gedehnt wird, sondern im Abschnitt I weniger als in II. In den Abschnitten III bis V macht sich dieser Fehler weit weniger geltend, weil das Glied $(p_2 - p_1)e$ im Vergleich zu $p_m vt$ im diastolischen Teil viel kleiner

1) K. Hürthle, Pflüger's Arch. Bd. 147 S. 559.

ist als im systolischen. Zum Beispiel verhält sich bei den Pulsen der Tabelle II $p_m v t : (p_2 - p_1) e =$

Stromstärke	Systole	Diastole
I	1 : 1,5	1 : 0,2
III	1 : 0,6	1 : 0,08.

6. Zusammenfassung.

Den Zweck der Untersuchungen bildete die Entscheidung der Frage: Wie gestaltet sich die Beziehung zwischen Druck und Stromstärke bei rhythmischen Druckschwankungen in einem System, das als Schema der arteriellen Bahn betrachtet werden kann? Dieses besteht aus einem elastischen Schlauch, dessen Länge weniger als etwa ein Viertel der Wellenlänge beträgt, sowie aus einem Widerstand, für welchen das Poiseuille'sche Gesetz gilt. Darf der Analyse die Annahme zugrunde gelegt werden, dass der Schlauch sich wie ein Windkessel verhalte, d. h. dass die Stromstärke durch Druck, Widerstand und Elastizität der Bahn bestimmt sei, und dass diese Funktion durch die Wellenbewegung keine wesentliche Störung erfahre?

Zur Beantwortung dieser Fragen werden Druck und Stromstärke in verschiedenen Querschnitten der Bahn registriert, aus den erhaltenen Kurven Druck, Widerstand und Elastizität der Bahn bestimmt, sodann auf Grund der Ergebnisse und der Voraussetzungen eine Stromkurve theoretisch konstruiert und mit der direkt registrierten verglichen. Der Grad der Übereinstimmung bildet dann das Mass für die Zulässigkeit der Voraussetzungen.

Die Analyse der Kurven hatte folgendes Ergebnis: In dem einen Falle, in welchem unsere Voraussetzungen als streng erfüllt betrachtet werden dürfen, nämlich dann, wenn keine elastische Strecke zwischen Stromuhr und Widerstand (kein „peripherer Windkessel“) vorhanden ist, und erstere die durch die Kapillaren abfließende Menge unmittelbar registriert (Tab. I Puls 1), sind die Abweichungen der registrierten von den berechneten Stromstärken in allen fünf Abschnitten des Pulses sehr gering, da sie 5—10 % nicht überschreiten. Das ist eine auffallend geringe Abweichung, wenn man bedenkt, dass sie die Fehler von drei Apparaten enthält: zur Registrierung des Druckes, der Stromstärke und der Zeit. Auch kann ein weiterer Fehler dazukommen, der in einer parallaktischen Verschiebung der Strom- gegen die Druckkurve be-

steht¹⁾. Wir dürfen daher annehmen, dass in allen Fällen, in welchen die Windkesseltheorie nicht in Frage kommt — und das ist auch der Fall bei der Bestimmung des St-Q —, die Fehler der Apparate und der Messung 10% nicht übersteigen. Bei der Bestimmung des St-Q werden allerdings die Messungsfehler um so grösser, je kürzer die Dauer des aufsteigenden Schenkels der Druckkurve ist; diese schwankt bei den künstlichen Pulsen zwischen 0,11 und 0,17, bei den Cruralispulsen meist zwischen 0,06 und 0,11 Sekunden.

In allen anderen Fällen, nämlich dann, wenn sich zwischen Stromuhr und Widerstand eine elastische Strecke befindet, werden die Abweichungen der registrierten von den berechneten Stromstärken grösser: Die Fehler gehen im systolischen Teil bis 20 %, bleiben im diastolischen meist unter 5 % und erreichen in keinem Falle 10 %. Dass für diese Fehler nicht die Mängel der Registrierapparate und der Messung verantwortlich zu machen sind, sondern gewisse Mängel unserer Voraussetzungen, geht daraus hervor, dass die Fehler mit der Grösse des peripheren Windkessels wachsen. Die Voraussetzung der Konstanz der e -Werte kann daher nicht als zulässig angesehen werden. Solange aber die e -Werte klein bleiben, bleiben auch die Abweichungen so gering, dass die Analyse doch brauchbar ist, zumal da die starken Abweichungen sich auf den systolischen Teil beschränken. Dass auch die im Schlauche ablaufende Wellenbewegung keine wesentliche Störung der durch Druck, Widerstand und Elastizität gegebenen Stromstärke veranlasst, geht aus den geringen diastolischen Abweichungen hervor. Man ist daher berechtigt, die Analyse auch auf die Pulse des lebenden Tieres zu übertragen, vorausgesetzt, dass die lebende Blutbahn keine wesentlichen Eigenschaften besitzt, die im Schema nicht berücksichtigt sind.

1) Siehe Pflüger's Arch. Bd. 147 S. 520. 1912. Da Manometer und Stromuhr auf zwei parallelen optischen Bänken aufgestellt sind, muss das Bild der Stromuhr durch Prismen in die Ebene des Manometers geworfen werden. Eine parallaktische Verschiebung der Strom- gegen die Druckkurve lässt sich an den Zeitmarken des vor dem Spalt des Kymographions schwingenden Stahlfadens feststellen. In einer neueren, demnächst mitzuteilenden Anordnung befinden sich Manometer und Stromuhr auf derselben Bank.

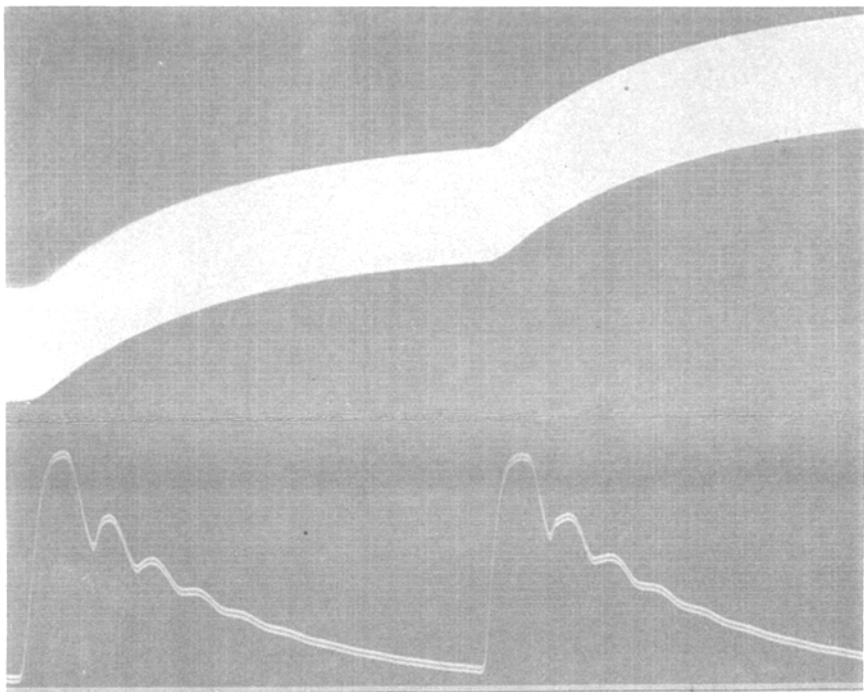


Fig. 1.

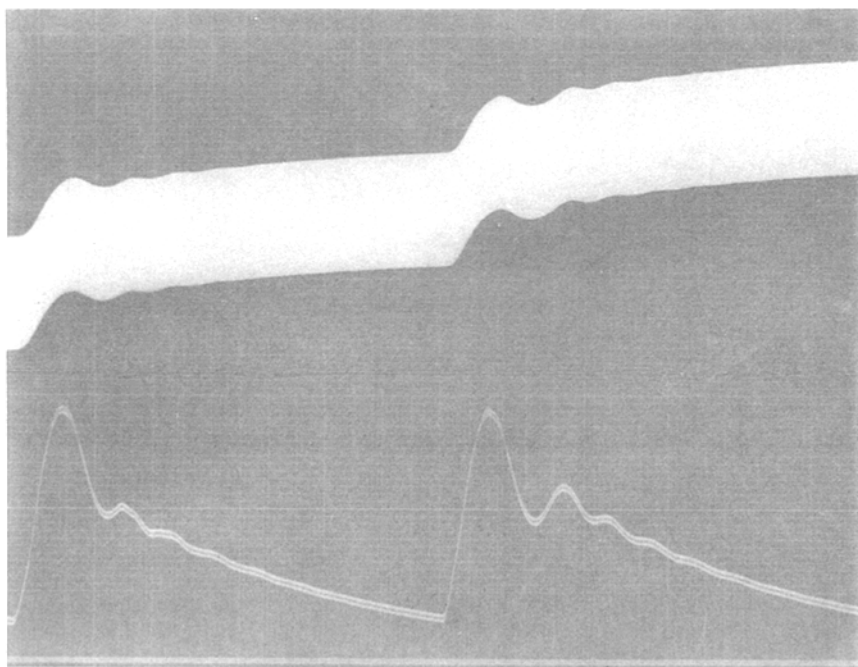


Fig. 2.