welche die größte Exkursion zeigt, da bei dieser die Energieübertragung eine optimale ist. Die Aufgabe ist dann die, aus der gefundenen maximalen Exkursionshöhe die vom Pulse im Armstumpf geleistete Arbeit zu berechnen.¹⁾

Es war mir sehr erwünscht, für die Lösung dieser Aufgabe Vorarbeiten zu finden. Coats hatte in einer unter Ludwigs Leitung ausgeführten Untersuchung über die Beziehungen zwischen Vagusreizung und Herzarbeit²⁾ eine ähnliche Aufgabe zu lösen und ebenso auch Dreser in seiner bekannten Arbeit über Herzarbeit und Herzgifte.³⁾ Beide Autoren studierten die Herzarbeit am Froschherzen, dessen Aorta endständig mit einem gewöhnlichen Hg-manometer in Verbindung stand und also, da jede Zirkulation unterbrochen war, bei der Pulsation seine ganze Energie auf das Quecksilbermanometer übertrug und in Manometerschwankungen umsetzte. Die Versuchsbedingungen waren also in beiden Fällen ähnlich wie diejenigen, welche bei meinem Bolometer realisiert sind.

Coats berechnete die von dem Froschherzen bei jeder Systole auf das endständig mit der Aorta verbundene Manometer übertragene Arbeit aus der Größe der Manometeraussschläge nach der Formel:

$$A = \frac{\pi r^2 s h^2}{2}, \text{ worin } s = \text{spezifisches Gewicht des Quecksilbers,}$$

r = Durchmesser der in Bewegung gesetzten Quecksilbersäule, h = Hubhöhe, d. h. Ausschlag des Manometers, respektive Höhe der aufgeschriebenen Pulscurve. Coats geht bei dieser Formel offenbar von der Voraussetzung aus, die in seinem Versuche, wenn auch nicht ganz genau, so doch annähernd verwirklicht war, daß die Pulsationen, deren Arbeitswert A mißt, auf ein Manometer im Gleichgewichtszustand, d. h. ohne Ueberdruck wirken.

Diese Formel besagt, daß die mit jeder Kontraktion des Herzens auf ein Manometer in Gleichgewichtszustand übertragene Arbeit proportional ist dem Quadrat der Höhe der Quecksilberschwankungen. Coats gibt keine Ableitung seiner Formel und keine Erklärung der auf den ersten Blick auffälligen Tatsache, daß die Arbeit dem Quadrat der Ausschläge proportional ist.

Dreser,⁴⁾ der in seinen Versuchen am Williamsschen Apparat die Arbeit ähnlich berechnete, gibt, offenbar ebenfalls unter der Voraussetzung, daß das Manometer, auf welches die Stöße wirken, sich im Gleichgewicht befindet, d. h. auf dem Nullpunkt steht, folgende Ableitung der Formel auf dem Wege der Infinitesimalrechnung:

„Nehmen wir an, das Gewicht eines unendlich dünnen Quecksilberscheibchens von dem Querschnitt des Manometers und der Höhe dh sei $Q = \pi r^2 s$ (wobei r = Radius des Manometerlumens, s = spezifisches Gewicht des Quecksilbers). Wenn das Herz einen Höhenunterschied der beiden Quecksilberkuppen von h bewirkt, so leistet es folgende Arbeit: Es hebt ein unendlich dünnes Quecksilberscheibchen um die Höhe dh , ein zweites um die Höhe $2dh$, und so weiter, das letzte Teilchen bis zur Höhe h . Das Herz leistet also im ganzen die Arbeit:

$$A = Q (dh + 2dh + 3dh \dots + h dh)$$

$$\text{oder } A = Q \int_{h=0}^h h \cdot dh = Q \left(\frac{h^2}{2} - \frac{0}{2} \right) = \frac{h^2}{2} Q = \frac{h^2}{2} \pi r^2 s$$

folglich gilt von zwei verschiedenen Herzarbeiten A und A_1 die

$$\text{Formel } \frac{A}{A_1} = \frac{h^2}{h_1^2}.$$

Für diejenigen Leser, welche mit der Infinitesimalrechnung nicht vertraut sind, will ich anführen, daß sich die Formel in folgender Weise auch auf elementarem Wege ableiten läßt. Es sei in Fig. 5 links der Zustand des Systems bei der Ruhestellung des Manometers, rechts der Zustand bei der maximalen Hebung der Quecksilbersäule dargestellt. Die Arbeit, welche die lebendige Kraft der Pulswelle leistet, besteht darin, den ersteren Zustand in den letzteren überzuführen. Die dabei geleistete Arbeit wird nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie offenbar gemessen durch die potentielle Energie, welche in der Erhöhung der Säule h über das Gleichgewichtsniveau ab enthalten ist und welche beim Zurückfallen der Säule h unter dem Einfluß der Schwere als kinetische Energie wiederum zur Geltung kommt. Das Quecksilber unterhalb des Niveaus ab und ebenso das Sinken des Quecksilbers in dem linksseitigen Manometerschenkel von 0 bis a ist offenbar bei der Arbeitsberechnung nicht zu berücksichtigen, da unterhalb ab keine potentielle Energie aufgespeichert wird und für das Sinken des linksseitigen Meniskus von 0 auf a keine Arbeit erforderlich ist. Die Aufgabe der Arbeitsberechnung eines Pulses besteht also einfach darin, zu bestimmen, wieviel Arbeit erforderlich ist, um die Queck-

Aus der Medizinischen Klinik der Universität in Bern. Die Sphygmobolometrie, eine neue Untersuchungsmethode der Zirkulation.

Von Prof. H. Sahli.

(Schluß aus No. 16.)

Es fragt sich nun, wie rechnerisch die Resultate zu bewerten sind. Unter einer gewissen, nachher noch spezieller zu besprechenden Einschränkung, kann man sagen, daß der Berechnung diejenige Kurve zugrunde gelegt werden muß,

¹⁾ Beim Bestehen Traubescher Wellen muß eine mittlere Exkursionshöhe der Berechnung zugrunde gelegt werden.

²⁾ Berichte der sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften, mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse 1869, S. 360. — ³⁾ Archiv für experimentelle Pharmakologie und Pathologie 1888, Bd. 24. — ⁴⁾ l.

Fig. 5

konstanten Niveau *ab* heraus zurücklegt. Für die obersten Schichten des gehobenen Quecksilbers ist also der Weg = *h*, für die unterste Schicht = 0. Für die Arbeitsberechnung müssen wir also einen mittleren Weg, der gleich dem arithmetischen Mittel dieser beiden Werte ist, zugrunde legen, nämlich $\frac{h+0}{2} = \frac{h}{2}$. Mit diesem Wert ist das Gewicht der Säule *h* zu multiplizieren, um den Arbeitswert zu erhalten, und wir gewinnen somit den Ausdruck $A = h \pi r^2 s \cdot \frac{h}{2} = \frac{\pi r^2 s h^2}{2}$.

Nun gilt aber diese Berechnung nur für den Fall der Fig. 5, wo das Manometer im Gleichgewicht, resp. auf dem Nullpunkt steht, sodaß kein Ueberdruck dem Pulse entgegenwirkt. Diese Voraussetzung trifft aber bei der Sphygmobolometrie nicht zu, da wir hier, wie wir sahen, um überhaupt Pulsausschläge zu erhalten, genötigt sind, die Manschette unter einen gewissen Druck zu setzen. Unter diesen Verhältnissen hat also nun die Pulswelle gegen einen manometrischen Ueberdruck zu arbeiten. Die Verhältnisse entsprechen in diesem Falle der Fig. 6, welche wiederum links die Einstellung des Manometers in der Ruhe bei dem Manschettendruck *H*, rechts die Einstellung zur Zeit der Höhe der Pulswelle darstellt. Während die Quecksilbermenisken in der Ruhe auf dem Punkt *p* und *p*¹ stehen, stellen sie sich auf der Höhe einer Pulsation auf *a* und *c* ein. Die Berechnung der Arbeit ergibt sich in diesem Fall durch folgende Ueberlegung: Auch hier ist der Arbeitswert gegeben durch das Produkt aus der Last in den Weg. Hier ist nun aber die Last = $(H + h) \pi r^2 s$.¹⁾ Der Weg beträgt, wie aus der Figur direkt hervorgeht, auch hier $\frac{h}{2}$. Folglich ist die Arbeitsformel:

$$A = \frac{h}{2} (H + h) \pi r^2 s,$$

oder, da $\frac{\pi r^2 s}{2}$ zu den Konstanten des Instruments gehört,

$$1.) A = h (H + h) C.$$

Der früher besprochene Fall des im Gleichgewicht stehenden Manometers (Fig. 5) ist in dieser Formel als besonderer Fall enthalten, wenn man *H* = 0 setzt.

Den experimentellen Nachweis für die Richtigkeit der abgeleiteten Formel konnte ich dadurch erbringen, daß ich das Manometer statt mit der Manschette mit einer Kautschukpelotte ver-

¹⁾ In Wirklichkeit müßte zu dieser Last noch das Gewicht des Schwimmers hinzu addiert werden. Dasselbe ist jedoch so gering, daß es vernachlässigt werden kann.

silbersäule *h* aus dem als konstant zu betrachtenden Niveau *ab* herauszuheben. Wie in jedem andern Fall berechnet sich die hierzu erforderliche Arbeit als das Produkt aus dem gehobenen Gewicht in den zurückgelegten Weg. Das gehobene Gewicht ist nun offenbar $h \pi r^2 s$, wenn *r* der Radius des Manometerlumens, *s* das spezifische Gewicht des Quecksilbers und *h* die Höhe des gehobenen Teils des Quecksilbers, resp. die Höhe des Manometerauschlages ist. Als Weg oder Hubhöhe dieser Last darf nun aber nicht die ganze Höhe *h* gerechnet werden. Denn nur die oberste Schicht der Säule *h* legt bei der Entstehung des Ausschlags die ganze Höhe *h* zurück, während die unteren Schichten einen kleineren, ja die unterste Schicht bei *b* bloß einen unendlich kleinen Weg aus dem

Fig. 6.

band, wie ich sie für mein transportables Quecksilbermanometer angegeben habe und nun an einem Faden aufgehängte Gewichte durch ein weites Glasrohr, dessen Länge in Zentimeter geteilt war und das dem Gewicht als Führung diente, auf die Pelotte fallen ließ und die zugehörigen Ausschläge des Quecksilbers graphisch wie bei der Sphygmobolometrie notierte. Es zeigte sich dabei, daß die Ausschläge des Quecksilbers der abgeleiteten Arbeitsformel innerhalb der Fehlergrenzen entsprachen.

Die nach der oben stehenden Formel ermittelte Arbeit wäre in Kilogrammometern auszudrücken, falls man die Längenmaße in Metern ausdrücken würde; da man aber als Maßeinheit aus naheliegenden Gründen das Millimeter wählt, so erhält man die Arbeit in $\frac{1}{1000000000}$ Kilogrammometern oder Milligrammillimetern. Für die Umrechnung in das moderne, absolute Maßsystem berücksichtigt man, daß n Milligrammillimeter = $9,81 \times 10^{-8}$ Erg. = $\frac{9,81}{100}$ Erg.¹⁾

Wenn man in dieser Weise die Arbeit des einzelnen Pulsschlages bestimmt hat, kann man durch Multiplikation der gefundenen Zahl mit der Pulsfrequenz die Arbeitsleistung des Brachialpulses in der Minute berechnen.

Wie sehr die Messung des in der obenstehenden Formel enthaltenen Arbeitswertes mittels der Sphygmobolometrie prinzipiell verschieden ist von der Messung der Pulsamplitude oder der Höhe des absoluten Sphygmogramms, resp. des Pulsdruckes, ergibt sich aus der Ueberlegung, daß dieser Arbeitswert durchaus nicht ausschließlich von der Pulsamplitude abhängig ist, sondern in der

Arterie dem Wert $A = \frac{M \times v^2}{2}$ entspricht, worin *M* die Masse der an die Manschettewand anprallenden Pulswelle (abhängig von ihrer Form, Höhe und Dauer, sowie dem Kaliber der Arterien) und *v* die Geschwindigkeit der hebenden Komponente der Wellenbewegung darstellt, also Größen, welche, in der statischen Bestimmung des Pulsdruckes oder der Pulsamplitude gar keine Berücksichtigung erfahren.

Es muß nun noch die Frage diskutiert werden, ob denn wirklich die oben angeführte Berechnung der Arbeit zulässig ist in Anbetracht der Eigenschwingungen des Quecksilbers. Denn es ist zweifellos, daß diese neben der lebendigen Kraft des Pulsstoßes für die Größe der Exkursionen von Bedeutung sind. Man erkennt dies ja auch daran, daß erst nach mehreren Pulsationen sich die Exkursionen auf eine bestimmte, konstantbleibende Höhe einstellen. Hieraus ergibt sich auch, daß man jedenfalls der Berechnung die Höhe der Exkursionen erst dann zugrunde legen darf, wenn sie konstant geworden ist. Um nun die Frage zu beantworten, wie die Eigenschwingungen des Quecksilbers die Exkursionen während des stationären Zustandes beeinflussen, ist zu berücksichtigen, daß die Quecksilbersäule für jede Niveaudifferenz der beiden Menisken eine bestimmte Periode, d. h. Schwingungsdauer besitzt, welche abhängig ist von den Reibungskonstanten des Instrumentes, besonders von der Weite des Manometers. Im allgemeinen stimmt nun natürlich die Periode dieser Quecksilberschwingungen nicht überein mit der Periode des Pulses. Hierdurch wird der ganze Vorgang der Manometerschwingungen ein ziemlich komplizierter, und es ist ohne weiteres klar, daß eine gewisse Zeit erforderlich ist, um einen stationären Schwingungszustand herzustellen. Dieser folgt den Gesetzen der Welleninterferenz. Da die Pulswellen den eigentlichen Antrieb für die Quecksilberschwingungen abgeben, insofern als die letzteren darin bestehen, daß das gehobene Quecksilber durch die Schwere zurückschwingt, so haben die Schwingungen des Quecksilbers als Ursache bloß den Rest der Energie der Pulswelle, welcher nach Abzug der Reibungsverluste noch übrig bleibt. Es ist somit selbstverständlich, daß die Quecksilberschwingungen dabei den Rhythmus des Pulses annehmen. Das Quecksilber macht mit andern Worten sogenannte „erzwungene Schwingungen“ nach dem Rhythmus des Pulses. Es ist nun ohne weiteres klar, daß, wenn der Zustand

¹⁾ Ich will noch darauf aufmerksam machen, daß die mittels der bolometrischen Methode feststellbaren, ziemlich erheblichen Arbeitswerte der Pulswelle nicht etwa angeführt werden können, um die in meiner Arbeit über das absolute Sphygmogramm gemachte und erklärte Annahme, wonach die lebendige Kraft der Pulswelle die Resultate der Messung des Maximaldrucks nicht wesentlich beeinflusst, zu entkräften. Denn es liegen bei der Messung des Maximaldrucks nach Riva-Rocci und bei der bolometrischen Untersuchung insofern ganz verschiedene Versuchsbedingungen vor, als hier die Membran der Manschette sich unter den günstigsten Bedingungen befindet, um die Pulswellenenergie aufzufangen, während bei der Messung des Maximaldrucks im Momente, wo der Maximaldruck in der Manschette erreicht ist, höchstens nur ein ganz geringer Bruchteil der Welle unter den oberen Rand der Manschette hineindringen kann, während der größere Teil der Wellenenergie am oberen Rand der Manschette herzwärts reflektiert wird.

des Systems d. h. die Größe der Exkursionen konstant geworden ist, trotz des Einflusses der Eigenschwingungen des Quecksilbers und der Trägheit die Größe der Exkursionen die Arbeit der Pulsquelle zu messen gestattet, denn die Quecksilbersäule hat ja, da sie durch den pneumatischen Manschettendruck äquilibriert ist, keine andere Energiequelle, sodaß schließlich alles, was man an Bewegung erkennt, bloß die Wirkung des Pulses ist. Man kann sich den Vorgang dieser erzwungenen Schwingungen durch folgende Ueberlegungen klar machen. Es können vor dem Eintritte des stationären Zustandes der Schwingungen zwei entgegengesetzte Fälle in betreff der Art wie die Pulswellen und die Eigenschwingungen des Quecksilbers zusammentreffen, gedacht werden. Der eine Fall besteht darin, daß die Phasen der Pulswellen und der Eigenschwingung des Quecksilbers so gegeneinander verschoben sind, daß die Pulswelle die Tendenz hat, die Quecksilbersäule zu heben zu einer Zeit, wo das Quecksilber vermöge der Periode seiner Eigenschwingungen noch die Tendenz hat, rückwärts zu gehen, also der Pulswelle entgegenzuwirken. Da hierbei die Luft zwischen Quecksilber und Arterie gepreßt wird, so bedingt in diesem Fall die elastische Spannung der Luft eine um genau so viel vergrößerte Hebung des Quecksilbers, als dieselbe sonst durch die sinkende Gegenwirkung des Quecksilbers verkleinert würde. Der andere Fall besteht darin, daß umgekehrt die Quecksilbereigenschwingung in ihrer Phase mit dem Pulse gleichsinnig verläuft. Hier würde, da das Quecksilber dem von der Pulswelle erhaltenen Anstoß gewissermaßen vorausseilt, die Exkursion zu groß. An dem schließlichen Resultat beim Stationärwerden des Schwingungszustandes ändert aber dies auch wiederum nichts, weil bei diesem Vorausseilen des Quecksilbers zwischen Puls und Quecksilber ein luftverdünnter Raum entsteht, sodaß durch die infolgedessen verminderte Stoßwirkung der Pulswelle die Hebung des Quecksilbers um ebensoviel kleiner wird, wie sie sonst durch die Eigenschwingungen vergrößert würde. Es geht aus diesen Ueberlegungen hervor, daß wegen der durch die Schwere bedingten Eigenschwingungen des Quecksilbers weder ein Gewinn noch ein Verlust an abgelesener Arbeit zu verzeichnen ist von dem Momente an, wo die Schwingungen des Manometers konstant geworden sind, was man ja an der Kurve ohne weiteres erkennt.

Die Energieverluste, welche bei dem Verfahren in Betracht kommen, sind also bloß die schließlich in Form von Wärme zum Vorschein kommenden Reibungsverluste durch die Bewegungen des Quecksilbers und durch die Dehnung und Zusammenziehung der Gummibestandteile des Instrumentes, sowie durch die Verdünnung und Verdichtung der Luft des pneumatischen Systemes. Diese Verluste sind an sich gering und für ein und dasselbe Instrument annähernd konstant. Sie könnten nach empirischen Bestimmungen in die oben erwähnten Konstanten des Instrumentes hineingerechnet werden, falls man absolut richtige Werte erhalten wollte. Da es aber für den Kliniker weniger auf die absoluten Werte als auf vergleichbare Resultate ankommt, so kann praktisch auf die diesbezügliche Korrektur verzichtet werden.

Ja man kann noch weiter gehen und für praktisch klinische Zwecke auch die Konstante $\frac{\pi r^2 s}{2}$ weglassen, und man erhält dann in der Formel

$$2.) A = h (h + H)$$

das relative Arbeitsmaß, das aber natürlich auch nur für ein bestimmtes Instrument gilt. Es handelt sich also praktisch für die klinische Sphygmobolometrie bloß darum, die in dieser Formel vorkommenden beiden Längenmaße h und H mittels des Millimetermaßstabes in der Kurve auszumessen.

Ich habe die vorstehenden mathematischen Ableitungen einem anerkannten Physiker und Mathematiker von Fach, Herrn Dr. E. König, Direktor der eidgenössischen Eichstätte in Bern, den ich auch an dieser Stelle meinen verbindlichsten Dank für seine Bemühungen ausspreche, zur Prüfung vorgelegt und er hat mir die Richtigkeit derselben bestätigt.

Es muß nun noch auf einen Punkt hingewiesen werden. Es wurde in der bisherigen Darstellung von der Voraussetzung ausgegangen, daß in einem gegebenen Fall aus der gewonnenen sphygmobolometrischen Kurvenserie diejenige Kurve, welche die größte Amplitude besitzt, der Arbeitsberechnung zugrunde gelegt werden muß, da es ja nahe liegt, anzunehmen, daß die maximale Exkursion der Kurve auf optimale Uebertragungsverhältnisse des Pulses hindeutet. Sicher ist jedenfalls, daß, falls man den Druck in der Manschette von Null aus so weit steigert, bis das Maximum des Quecksilberausschlages erhalten wird, für die Berechnung der Arbeitsgröße die unterhalb dieser Kurve des maximalen Ausschlages liegenden, d. h. bei geringerem Manometerdruck gewonnenen Kurven nicht benutzt werden dürfen, da diese stets einen geringen Arbeitswert repräsentieren und also auf unvollständige Energieübertragung hinweisen. Anders liegt aber die Frage, ob nicht unter Umständen die Berechnung der Arbeit an der Hand

einer Kurve vorgenommen werden soll, welche noch höher liegt, als die Kurve des maximalen Ausschlages, d. h. bei höherem Ueberdruck gewonnen wurde. Es nimmt allerdings die Kurvenamplitude, nachdem der maximale Ausschlag erreicht ist, bei weiterer Drucksteigerung wieder ab. Es wäre aber unrichtig anzunehmen, daß dies unter allen Umständen darauf hindeutet, daß die Pulsübertragung infolge des zu starken Gegendruckes weniger vollständig geworden ist. Denn da in der Formel für die Arbeit nicht nur die Amplitude h , sondern auch die Höhe des Ueberdruckes H eine Rolle spielt, so ist der Fall denkbar, daß bei höherem Ueberdruck eine Kurve von geringerer Amplitude einen höheren Arbeitswert ergibt, als eine Kurve von geringerer Amplitude, aber niedrigerem Ueberdruck. In diesem Fall würde die Kurve mit der geringeren Amplitude, da sie einen höheren Arbeitswert enthält, einer vollständigeren Energieübertragung entsprechen und somit der Arbeitsberechnung zugrunde gelegt werden müssen.

Beispiel.

h	H	A
6 mm	100 mm	$3 \times 106 = 318$
5 mm	125 mm	$2,5 \times 130 = 325$, also größer.

Man hat also, um den richtigen Arbeitswert zu finden, nicht bloß die Kurve größter Amplitude auf ihren Arbeitswert auszurechnen, sondern auch eine oder mehrere der nächstfolgenden höher gelegenen Kurven, und man wählt dann den höchsten Arbeitswert. Jedoch kommt es nur selten vor, daß die Kurve mit der größten Amplitude nicht auch ohne weiteres den höchsten Arbeitswert repräsentiert, weil meist die Größe des Ausschlages des Quecksilbers, nachdem das Maximum erreicht ist, rasch abnimmt. Falls mehrere Kurven nahezu oder ganz gleich ausfallen, wird natürlich die höchstliegende (bei welcher H am größten ist) der Berechnung zugrunde gelegt, weil sie den größten Arbeitswert ergibt.

Es muß nun auch noch die Frage besprochen werden, wie weit die Resultate, welche mittels der Methode der Sphygmobolometrie gefunden werden, klinisch verwertbar sind. Da ist in erster Linie darauf hinzuweisen, daß natürlich die Methode nicht die ganze Herzkraft mißt, sondern nur den Teil der Herzenergie, welcher auf den der Flächenausdehnung der Manschette entsprechenden Teil des durch die Esmarsche Binde abgeschlossenen Stumpfes des Oberarmes fällt. Je nach der Körpergröße und nach der Entwicklung der Armmuskulatur dürfte dies natürlich einen etwas verschiedenen Bruchteil der gesamten Energie des Herzens darstellen. Jedoch sind bei gesunden Individuen die Unterschiede der Resultate zu verschiedenen Zeiten so gering und unter pathologischen Verhältnissen so groß, daß ich an die Möglichkeit glaube, auch bei der Vergleichung verschiedener Individuen die Arbeitswerte, die man findet, als einen annähernd konstanten aliquoten Teil der Herzarbeit zu betrachten und somit aus den gefundenen Zahlen Schlüsse auf die Gesamtleistung des Herzens zu ziehen, was bisher durch keine andere Methode möglich war.

Wenn man gegen diese Auffassung einwenden wollte, daß derartige Schlüsse daran scheitern, daß die gemessene Energie bloß die in den Arterien freiwerdende Wellenenergie messe, nicht aber die Strömungsenergie, so muß ich diesen Einwand als prinzipiell unrichtig bezeichnen. Denn wenn wir die Wellenenergie in einer peripher abgeschlossenen Arterie messen, so messen wir tatsächlich die gesamte Energieentfaltung des Herzens an dieser Stelle, weil die Strömung an der Peripherie durch die Capillaren, welche für die Zirkulationsgröße maßgebend ist, ausschließlich durch diese Wellenenergie ausgelöst wird, indem auch die kontinuierliche Druckwirkung in den Capillaren bloß einer Umwandlung der kinetischen Wellenenergie in potentielle Druckenergie ihren Ursprung verdankt. Es wird dies durch die mittels des Sphygmographen leicht feststellbare Tatsache illustriert, daß das Ausfallen auch bloß eines Pulses sofort ein Absinken auch des Minimaldruckes, das heißt der Kurvenbasis des Sphygmogrammes, erzeugt. Der Arterienpuls ist eben gewissermaßen als ein peripherisches, allerdings nicht automatisches, sondern bloß durch elastische Kräfte, gewissermaßen durch Federspannung wirkendes Herz aufzufassen. Es ist dies eine prinzipiell wichtige und für die Hämodynamik höchst fruchtbringende Auffassung des Pulses, welche ich schon in meiner Arbeit über das absolute Sphygmogramm vertreten habe und welche die Bedeutung der Sphygmobolometrie mit einem Schlage klar hervortreten läßt.

Wenn man die Annahme macht, daß die Sphygmobolometrie einen annähernd aliquoten, von den Konstanten des Instrumentes abhängigen Teil der gesamten Herzenergie mißt, so ergibt sich daraus die Möglichkeit, für die Zirkulationsgröße wenigstens annähernde relative Werte zu erhalten:

Die gesamte Herzenergie für eine Systole wird bekanntlich durch folgende Formel ausgedrückt¹⁾:

$$A = SP + S \frac{v^2}{2g},$$

worin P der arterielle Druck, S das Gewicht der systolischen Blutmenge, v die Geschwindigkeit des Aortenblutstromes, g die Beschleunigung der Schwere, nämlich 9,8 m ist. Der Wert A wird in Kilogrammmetern erhalten, wenn die Längenmaße v und g in Metern, das Gewicht S in Kilogrammen ausgedrückt wird. Auf der rechten Seite der Gleichung entspricht das erste Glied der Hauptarbeit, die das Herz dadurch leistet, daß es die systolische Blutmenge gegen den mittleren Aortendruck austreibt, während das zweite Glied der „lebendigen Kraft“ entspricht, welche dabei erforderlich ist, um dem Blut eine bestimmte Geschwindigkeit zu erteilen.

Unter der Annahme, daß das Schlagvolumen des menschlichen Herzens normal zwischen 50 und 100 ccm schwankt (nach Zuntz beträgt es etwa 60 ccm), berechnet Tigerstedt (l. c.) den ersten Summanden der obigen Arbeitsformel zu 153 Grammeter, den zweiten zu 0,96 im Mittel. Hieraus geht hervor, daß der zweite Summand, welcher der sogenannten Geschwindigkeitsarbeit entspricht, gegenüber dem ersten praktisch vernachlässigt werden kann. Es kann somit die Formel für die systolische Herzarbeit praktisch auf den einfachen Ausdruck $A = SP$ reduziert werden.

Wenn wir nun durch die Sphygmobolometrie einen annähernd aliquoten Teil der gesamten Herzarbeit einer Systole, den wir mit $\frac{A}{n}$ bezeichnen wollen, bestimmen können, nämlich denjenigen aliquoten Teil der gesamten Arbeit einer Systole, welcher dem Gebiet der Brachialarterie zugute kommt, so gilt offenbar für diesen Teil der Zirkulation, indem man den Puls gewissermaßen als ein peripherisches Herz betrachtet, offenbar auch die Formel $\frac{A}{n} = \frac{SP}{n}$

$$\text{somit } \frac{S}{n} = \frac{A}{nP}$$

Nun kennen wir $\frac{A}{n}$ durch das Resultat der sphygmobolometrischen Messung, wir kennen auch annähernd P, den mittleren Aortendruck, da wir diesen approximativ dem arithmetischen Mittel des Maximal- und Minimaldruckes in der Brachialarterie, das wir direkt bestimmen können, gleichsetzen dürfen. Folglich können wir nach der obigen Formel $\frac{S}{n}$ berechnen. Das heißt, es gelingt uns, einen aliquoten, allerdings von den Konstanten des Instrumentes (welche in dem n mit berücksichtigt werden) abhängigen, aber für ein uns dasselbe Instrument vergleichbaren Teil der systolischen Blutmenge zu berechnen. Wenn auch diese Berechnung natürlich mit gewissen Fehlern behaftet ist, so hat sie doch wenigstens den Wert einer brauchbaren Schätzung.

Da es nun für die Klinik keineswegs auf eine genaue Ausrechnung von Zahlenwerten ankommt, und wir außerdem den Wert n, welcher nicht leicht zu bestimmen wäre, respektive die Konstanten des Instrumentes eliminieren sollten, so wird man sich praktisch auf folgende Art der Diskussion einer sphygmobolometrischen Bestimmung beschränken können:

Wenn wir mit A den Arbeitswert einer normalen, mit A¹ denjenigen der untersuchten pathologischen Systole, mit P den normalen Mitteldruck in der Arteria brachialis, resp. in der Aorta, mit P¹ den entsprechenden pathologischen Wert, den wir direkt bestimmen können, mit S das Volumen der normalen, mit S¹ das Volumen der gesuchten pathologischen Systole bezeichnen, so ist

$$A = SP, \text{ folglich } S = \frac{A}{P}$$

$$\text{und } A^1 = S^1 P^1 \text{ folglich } S^1 = \frac{A^1}{P^1}.$$

$$\text{Folglich } \frac{S^1}{S} = \frac{A^1 P}{A P^1}.$$

Setzen wir die bolometrisch bestimmbaren Partialwerte der systolischen Arbeit $\frac{A}{n} = a$ und $\frac{A^1}{n} = a^1$, so können wir offenbar in der obigen Gleichung A und A¹ durch a bzw. a¹ ersetzen und erhalten dann

$$3.) \frac{S^1}{S} = \frac{a^1 P}{a P^1} \text{ oder } = \frac{P}{a} \cdot \frac{a^1}{P^1}$$

D. h. die systolischen Blutmengen verhalten sich direkt wie die zugehörigen (sphygmobolometrisch gemessenen) Arbeitswerte und

umgekehrt, wie die zugehörigen Werte des arteriellen Mitteldruckes.

Bestimmt man ein für allemal für das verwendete Instrument den Bruch $\frac{P}{a}$ nach Untersuchung bei Gesunden und bezeichnet ihn als N, so hat man

$$\frac{S^1}{S} = N \cdot \frac{a^1}{P^1}.$$

Das heißt: das Verhältnis der untersuchten pathologischen Systole zur normalen Systole ist gleich dem Produkt aus jenem Wert N in das Verhältnis des sphygmobolometrischen Arbeitswerts zu dem mittleren Blutdruck des betreffenden pathologischen Falles.

Selbstverständlich hat bei der Aorteninsuffizienz für die Beurteilung der Strömung eine solche Berechnung keinen Wert, weil man nicht imstande ist, den durch den Rückstrom in das Herz bedingten Strömungsverlust zu berechnen und in Abzug zu bringen.

Es ist ferner selbstverständlich, daß die Verwertung der sphygmobolometrischen Methode zu Rückschlüssen auf die Gesamtarbeit und die Zirkulationsgröße des linken Herzens nur unter der Voraussetzung zutrifft, daß die Verteilung der Herzenergie auf die einzelnen Arterien, resp. der Anteil, welchen die Arteria brachialis von der gesamten Leistung des Herzens erhält, ungefähr dem normalen mittleren Verhalten entspricht. Vorsichtshalber könnte man also bei der Sphygmobolometrie statt von Herzarbeit überhaupt bloß von dem Armanteil der Herzenergie sprechen. Es darf übrigens hier darauf hingewiesen werden, daß es nicht unwahrscheinlich erscheint, wenn dies auch erst noch näher zu untersuchen ist, daß infolge der eigentümlichen Versuchsanordnung bei der Sphygmobolometrie, weil die Arteria brachialis in ein blindes Anhängsel der Aorta verwandelt wird, wobei sie sich wahrscheinlich stark erweitert, und weil infolge des Verschlusses der Venen durch den Manschettendruck die Capillaren mit pulsieren, die Verhältnisse in hohem Maße von den Kaliberschwankungen und dem Kontraktionszustand der Arteria brachialis unabhängig werden und daß infolgedessen die einzelnen Untersuchungen, so weit wie dies bei biologischen Fragen überhaupt möglich ist, auch in Betracht der Gesamtleistung des Herzens vergleichbar sind. Es ist dies um so mehr der Fall, als ja bei der Uebertragung der Energie auf das Sphygmobolometer auch durch die Entspannung der Arterienwand durch den Gegendruck der Manschette und die dadurch erzielte optimale Uebertragung des Pulses der Einfluß des Kontraktionszustandes des pulsierenden Stumpfes der Arteria brachialis bis zu einem gewissen Grade eliminiert wird.

Unter dieser Voraussetzung, und darin sehe ich den Vorteil dieser neuen Untersuchungsmethode, gestattet uns die Sphygmobolometrie gewisse Rückschlüsse auf die Zirkulationsgröße, resp. die Größe der Systole. Ich muß aber, um Mißverständnissen vorzubeugen, nochmals hervorheben, was übrigens aus dem ganzen Sinn und Wortlaut der mathematischen Ableitung für den aufmerksamen Leser von selbst hervorgeht, daß ich mit dieser Beurteilung der Größe der Systole, resp. der Zirkulation keineswegs die absolute Bestimmung dieser Größen in Kubikzentimetern meine, da hierzu eine exakte Kenntnis der absoluten Größe der normalen Systole gehören würde. Vielmehr handelt es sich stets nur um die Bestimmung des Größenverhältnisses der untersuchten Systole, resp. der untersuchten Zirkulationsgröße zur normalen Systole, resp. Zirkulationsgröße, mit anderen Worten, um die Beantwortung der Frage: Ist eine untersuchte Systole oder Zirkulationsgröße normal, unternormal oder übernormal, ferner: wird sie im Verlauf der Beobachtung in einem gegebenen Falle größer, kleiner oder bleibt sie gleich? Dies sind die Fragen, welche die Sphygmobolometrie zu beantworten vermag und deren Beantwortung für den Arzt sehr wichtig ist.

Die klinische Erfahrung muß nun erst noch lehren, ob die von mir vorgeschlagene neue Art der Untersuchung der Zirkulation sich praktisch als nützlich erweist. Jedenfalls ist sie technisch einfach und wenig zeitraubend, viel weniger zeitraubend als die Sphygmographie und die graphische Maximal- und Minimaldruckmessung nach Janeway, Masing, Strass-

1) Tigerstedt, Physiologie des Kreislaufes 1893, S. 147.

burger, v. Recklinghausen und Sahli. Vor allem wird es die Aufgabe sein, für gesunde Menschen verschiedener Körpergröße Normalzahlen für den Armanteil der Herzenergie zu bestimmen, um danach in pathologischen Fällen sich zu orientieren. Vorläufig kann ich nur sagen, daß sich die Wirkung von Herzmitteln auf die Zirkulation auf sphymobolometrischem Wege sicherer als durch irgend ein anderes hydraulisches Untersuchungsverfahren feststellen läßt (vgl. die Fig. 7).

Fig. 7.

Die eigentümliche, von den übrigen Sphymobologrammen abweichende Form der Kurvenschreibung in dieser Figur rührt davon her, daß diese Kurven aus der ersten Zeit meiner sphymobolometrischen Untersuchungen stammen, in welcher ich mich einer andern Schreibvorrichtung bediente. Jedoch sind die Kurvenhöhen direkt mit den andern Sphymobologrammen zu vergleichen und ebenfalls in Millimetern Quecksilber ausmeßbar. Dagegen sind die Druckhöhen, unter welchen geschrieben wurde, nur an den unter den Kurven stehenden Zahlen zu erkennen, da die Registrierung auf einem schmalen Sphymographenstreifen geschah, welcher für jede einzelne Stellung des Quecksilbers, resp. des Schwimmers eingestellt werden mußte.

Ich will bei diesem Anlaß nochmals hervorheben wie ich es schon am Berliner Kongreß für innere Medizin im Jahre 1901 getan habe, daß der Blutdruck sich unter dem Einfluß einer Verbesserung der Zirkulation häufig garnicht oder auch in paradoxer Weise im Sinne einer Erniedrigung verändert und daß, wie ich in meiner Arbeit über das absolute Sphymogramm¹⁾ nachgewiesen habe, nicht bloß aus dem maximalen Blutdruck, sondern auch aus der Höhe des absoluten Sphymogramms, resp. der Höhe des Pulsdruckes sich auf die Qualität der Zirkulation kein Aufschluß erhalten läßt, während an der sphymobolometrischen Kurve, wie man sieht, eine Verbesserung oder Verschlechterung der Zirkulation in eindeutiger Weise sichtbar wird.

Es braucht wohl nicht besonders hervorgehoben zu werden, daß die hier empfohlene Methode der Sphymobolometrie keineswegs durch die Sphymographie ersetzt werden kann, obschon, wenn man sich so ausdrücken will, der Sphymograph ebenfalls durch die lebendige Kraft der Pulswelle in Bewegung gesetzt wird. Die Sphymobolometrie hat vor der Sphymographie für den hier besprochenen Zweck den Vorteil, daß der Puls der gesamten Extremität in der Nähe der Aorta und nicht bloß derjenige einer einzelnen kleinen Arterie untersucht wird, daß die Uebertragung der Energie auf den Registrierapparat auf pneumatischem Wege geschieht und infolgedessen von Zufälligkeiten der Applikation und dem individuellen Kaliber einer einzelnen Arterie unabhängig wird, daß endlich nur mittels der hier angegebenen Methode sich eine einfache Formel zur Berechnung der Pulsenergie ableiten läßt, während sich die Energie der Pulswelle auf einen Sphymographen nach einem viel komplizierteren, jedenfalls bloß durch empirische Eichung feststellbaren Gesetz überträgt.

Endlich möchte ich noch betonen, daß die hier beschriebene instrumentelle Methode ihr Analogon hat in der energetischen Methode des Pulsfühlers, welche die älteren Aerzte, die noch nicht unter dem Zeichen der Blutdruckmessung standen, ausschließlich ausübten und welche infolge des Eindringens statischer Blutdruckvorstellungen in die Methodik des Pulsfühlers und infolge des Ueberwucherns dieser einseitigen statischen Auffassung der Zirkulation, in neuerer Zeit

völlig vernachlässigt worden ist, obschon sie vielleicht die praktisch nützlichste Methode des Pulsfühlers ist. Ich habe diese Methode des Pulsfühlers, die sich entsprechend dem von mir dafür gewählten Namen (energetisches Pulsfühlen) mit der Bestimmung der von der Pulswelle geleisteten Arbeit befaßt, ohne sich um den Blutdruck zu bekümmern, in der neuen im Druck befindlichen Auflage meines Lehrbuches der klinischen Untersuchungsmethoden zu rehabilitieren versucht.

Bei der sphymobolometrischen Methode handelt es sich um die exakte graphische Darstellung und Berechnung der Arbeitsleistung des Pulses, die man bei der Methode des energetischen Pulsfühlers schätzt. Es ist aber klar, daß man das Verfahren auch ohne graphische Aufzeichnung unter einfacher Besichtigung der Größe der Exkursionen des Quecksilbers diagnostisch verwenden kann. Die Größe der Quecksilberschwankungen gibt dann dasjenige wieder, was man im Sphymogramm die Größe, oder nach Marey besser die Stärke des Pulses nennt.¹⁾ Auch zu Demonstrationen bei klinischen Vorstellungen ist das Verfahren, in dieser Weise angewandt, um so mehr zu empfehlen, als die Exkursionen des Quecksilbers, besonders wenn man an dem Schwimmer eine Papierfahne befestigt, auf weite Distanz zu erkennen sind. Um die Vorteile und die größere Sicherheit auch des demonstrativen Wertes dieses Verfahrens gegenüber der Sphymographie zu begründen, verweise ich auf meine Darstellung der Bedeutung der „Größe“ des Pulses im Sphymogramm, in meinem Lehrbuch der klinischen Untersuchungsmethoden. Ich habe dort gezeigt, daß im gewöhnlichen Sphymogramm die Größe des Pulses eine ganz unbestimmte Bedeutung hat, während sie im Sphymobologramm einen bestimmten Arbeitswert repräsentiert.

Selbstverständlich ist es, daß man bei der Deutung der Resultate nicht verwechseln darf den Begriff der Leistung und der Leistungsfähigkeit des Herzens. Die Methode mißt natürlich bloß die zur Zeit des Versuches von dem Herzen effektiv entfaltete Energie, nicht aber die Energie, welche es bei gesteigerten Ansprüchen entfalten könnte. Es kann z. B. beim Gesunden in der Ruhe die Herzleistung und Zirkulationsgröße ziemlich gering sein, und doch schließt dies nicht ein sehr leistungsfähiges Herz aus, das z. B. bei heftiger Muskelarbeit das mehrfache zu leisten vermag.

Nachtrag. Zu meinem Bedauern ist die Figur 2 nicht so deutlich ausgefallen wie ich es gewünscht hätte, indem weder das als Führung des Schreibdrahtes dienende Glasröhrchen f e, noch auch der Schreibdraht selbst, soweit er sich auf der beruhten Fläche projiziert, deutlich sichtbar ist. Ich hoffe aber, daß an der Hand der Beschreibung und Buchstabenbezeichnung dennoch die Einrichtung des Apparates verständlich sein wird. Im übrigen verweise ich auf eine bessere Reproduktion, welche in der im Druck befindlichen Neuauflage meines Lehrbuches der klinischen Untersuchungsmethoden erscheinen wird.

¹⁾ Auch hier wird man aber, um zu richtigen Schlußfolgerungen zu gelangen, für die Beurteilung der Herzarbeit neben der Größe der Quecksilberexkursion auch die Größe des Ueberdruckes (Formel 2) und für die Beurteilung der Systole die Höhe des arteriellen Mitteldruckes (Formel 3) berücksichtigen müssen.