(Aus der I. medizinischen Klinik der Universität München.)

Das Arbeitsdiagramm des Säugetierherzens.

Von

Dr. **H. Straub**, Privatdozent.

(Mit 4 Textfiguren.)

Eine zureichende Analyse der mechanischen Bedingungen der Herzarbeit lässt sich durchführen, wenn es gelingt, Spannung und Länge des Muskelements in jedem einzelnen Zeitabschnitt der Herzrevolution richtig darzustellen. Dies geschieht im Anschluss an die Darlegungen von O. Frank durch gleichzeitige Verzeichnung von Druck und Volum einer Herzhöhle als Funktion der Zeit. Der wahre Verlauf der Druckkurve liess sich durch Verwendung nach Frank'schen Prinzipien konstruierter optischer Manometer von zureichender Güte ermitteln¹⁾. Die Volumkurve ergab sich durch Integration ihres photographisch registrierten Differentialquotienten, des „Tachogramms der Herzkammerbasis“²⁾. Die so gewonnenen Kurven gestatten nunmehr, die Grösse der vom Herzen geleisteten Arbeit und die Umstände, unter denen diese Arbeit geleistet wird, in der Form eines geometrischen Modells darzustellen. Eine vollständige Darstellung der Herztätigkeit wird gegeben durch eine räumliche Kurve, deren drei Koordinaten der Druck, das Volum und die Zeit sind. Die bekannte Druckkurve ist dann die Projektion der räumlichen Kurve auf die Druck-Zeitebene, die Volumkurve ihre Projektion auf die Volum-Zeitebene. Eine unmittelbare Darstellung des Wertes der Arbeit und der Art der Arbeitsleistung ergibt aber die Projektion der Raumkurve auf die dritte Ebene, die Druck-

---

1) H. Straub, Der Druckablauf in den Herzhöhlen. Der Mechanismus der Herztätigkeit. Pflüger's Arch. Bd. 143 S. 69. 1911.

2) H. Straub, Das Tachogramm der Herzkammerbasis. Deutsches Arch. f. klin. Med. Bd. 118 S. 214. 1915.

Volumebene. Die so dargestellte Arbeitsfläche nennen wir mit Frank¹⁾ in Anlehnung an eine in der Thermodynamik gebrauchte Bezeichnung das Arbeitsdiagramm des Herzens. Dieses Arbeitsdiagramm, das den Druck als Funktion des Volums darstellt, lässt sich mit dem von Frank für das Froschherz konstruierten Herzindikator²⁾ direkt aufschreiben. Für das Säugetierherz hat sich diese Anordnung bisher nicht in eine den Anforderungen völlig genügende Form bringen lassen, weshalb der etwas umständlichere Weg der geometrischen Konstruktion des Arbeitsdiagramms aus der Druck- und Volumkurve gewählt wurde. Die Wichtigkeit der Darstellung des Arbeitsdiagramms ist von Frank betont worden, weil bei getrennter Betrachtung des Druckes und Volums als Funktion der Zeit wichtige Beziehungen der beiden Kurven leicht übersehen werden.

Bei der Konstruktion des Arbeitsdiagramms des Säugetierherzens macht sich der Umstand störend bemerkbar, dass die Volumkurven der beiden Kammern nicht getrennt verzeichnet werden können. Da sich die Arbeitsbedingungen der beiden Kammern unabhängig voneinander ändern können, verlangt eine erschöpfende Darstellung die Konstruktion getrennter Diagramme für die rechte und linke Kammer. Solange getrennte Volumkurven nicht zur Verfügung stehen, sind der Erkenntnis enge Grenzen gesetzt. Manche Tatsachen lassen sich trotzdem ermitteln. Sobald stationäre Kreislaufverhältnisse herrschen, müssen die Schlagvolumina beider Kammern einander gleich sein. Das Schlagvolumen einer Kammer ist also die Hälfte der verzeichneten Volumamplitude. Aber die feineren Einzelheiten im Ablauf der Volumkurve des rechten und linken Herzens, namentlich die Neigungswinkel an verschiedenen Stellen, sind sicher nicht durchaus identisch, denn sie werden beeinflusst durch ausserhalb des Herzens gelegene Momente, wie die Änderung der Höhe der Überlastung, der Beschaffenheit des arteriellen Widerstandes, des venösen Drucks. Dennoch kann aus dem Umstande, dass die Druckkurven der beiden Kammern, wie auch die arteriellen Pulse rechts und links in allen wesentlichen Merkmalen vollkommen überein-

1) O. Frank, Die Grundform des arteriellen Pulses. Zeitschr. f. Biol. Bd. 37 S. 483. 1899.

2) O. Frank, Die Arbeit des Herzens und ihre Bestimmung durch den Herzindikator. Sitzungsber. d. Gesellsch. f. Morphol. u. Physiol. in München H. 8 S. 147. 1898.

stimmen, und dass alle charakteristischen Punkte entsprechender Kurven sich zeitlich genau entsprechen, gefolgert werden, dass auch die Unterschiede der beiden Volumkurven nur geringfügige sind, deren Vernachlässigung keinen sehr erheblichen Fehler einführt, um so mehr, als die Zugehörigkeit einer beobachteten Änderung zu der Volumkurve der rechten oder linken Kammer häufig aus den Versuchsbedingungen mit grosser Wahrscheinlichkeit geschlossen werden kann. Die Bestimmung des Nullpunktes der Volumachse freilich ist auf dem gewählten Wege unmöglich, weil die Volumkurven durch Integration erhalten wurden, wobei die Integrationskonstante unbekannt ist.

Da nun die Integrationskonstante für jede einzelne der verzeichneten Volumkurven verschieden ist, so ist nicht nur der Nullpunkt der Volumachse unbekannt, sondern auch die Beziehung der räumlichen Lage verschiedener verzeichneter Volumkurven. Dürfen wir, wie das bei Änderungen des Schlagvolumens der Fall ist, annehmen, dass die räumliche Lage der systolischen Minima der Volumkurven nur unwesentlichen Änderungen unterliegt¹⁾, so ist die räumliche Anordnung mehrerer, unter verschiedenen Bedingungen erhaltener Arbeitsdiagramme annähernd möglich. Haben wir, wie zum Beispiel bei Änderungen des Widerstandes, keine solchen Angaben über die Integrationskonstante, so bleiben die räumlichen Beziehungen der Arbeitsdiagramme in der Richtung der Volumachse unbestimmt. Die verschiedenen Diagramme können parallel der V -Achse beliebig verschoben werden. Aus diesem Grunde ist die für das Froschherz mit so grossem Erfolg durchgeführte Konstruktion von Dehnungskurven der Maxima und Minima für das Säugetierherz zurzeit in exakter Weise undurchführbar. Aber schon von der Darstellung des Arbeitsdiagramms einer einzelnen Herzrevolution ist eine wesentliche Förderung der Erkenntnis zu erwarten.

Fig. 1 gibt in der in der darstellenden Geometrie üblichen Weise das Arbeitsdiagramm des Säugetierherzens wieder. Ermittelt wurden die der Figur zugrunde liegenden Werte aus derselben Kurve, die in

---

1) H. Straub, Dynamik des Säugetierherzens. I. Deutsches Arch. f. klin. Med. Bd. 115 S. 531. 1914. — H. Straub, Über den kleinen Kreislauf. Deutsches Arch. f. klin. Med. Bd. 121 S. 394. 1917. — H. Straub, Zur Dynamik der Klappenfehler des linken Herzens. Deutsches Arch. f. klin. Med. Bd. 121 S. 156. 1917.

Fig. 1. (Erklärung siehe, auf umstehender Seite.)

Erklärung zur Fig. 1. Konstruktion des Arbeitsdiagramms. Darstellung in drei Ebenen: I = Druck-Zeit-Ebene. Die Projektion der Raumkurve auf diese Ebene ist die Druckkurve. — II = Volum-Zeit-Ebene. Die Projektion der Raumkurve auf diese Ebene ist die (durch Integration des „Tachogramms der Herzkammerbasis“ erhaltene) Volumkurve. — III = Druck-Volum-Ebene. Die Projektion der Raumkurve auf diese Ebene ist das Arbeitsdiagramm. Die Querstriche der Kurve des Arbeitsdiagramms grenzen Strecken ab, die in gleichen Zeiten ($1/100$ Sek.) durchlaufen werden. Die Kurve wird entgegen dem Sinne des Uhrzeigers umkreist. In Ebene I rechts oben Skizze des Druckverlaufs bei stark ausgesprochener Aortenöffnungsacke.

Fig. 1 der Arbeit über das Tachogramm der Herzkammerbasis¹⁾ abgebildet ist. Zur genaueren Analyse wurde die Originalkurve mit dem Projektionsapparat stark vergrößert gezeichnet und die Messungen an der so erhaltenen Vergrößerung ausgeführt. Die Raumkurve, die der vollständige Ausdruck der Arbeit ist, ist auf drei zueinander senkrecht gestellte Ebenen projiziert gezeichnet. Auf der Ebene I, der Druck-Zeit-Ebene, ergibt sich als Projektion die registrierte Druckkurve. Die Koordinaten dieser Kurve sind der Druck und die Zeit. Auf die Ebene II, die Volum-Zeit-Ebene, deren Koordinaten das Volum und die Zeit sind, projiziert sich die räumliche Kurve als Volumkurve, die durch Integration des Tachogramms erhalten wurde. Die Projektion auf die Ebene III, die Druck-Volum-Ebene, deren Koordinaten Druck und Volum sind, ist das Arbeitsdiagramm. Es wird konstruktiv ermittelt, indem die Lage synchroner Punkte der Druck- und Volumkurve nach dem Verfahren der darstellenden Geometrie auf die Druck-Volum-Ebene projiziert wird.

Fig. 1 gibt nach den Regeln der darstellenden Geometrie eine vollkommene Anschauung der Raumkurve, die der geometrische Ausdruck der der Analyse zugrunde gelegten Herzrevolution ist. Wir haben uns diese Raumkurve so vorzustellen, dass sie in Schraubenwindungen aus der Ebene III aufsteigend, entgegen dem Sinne des Uhrzeigers, einen Zylinder umkreist, der über dem Arbeitsdiagramm als Basis errichtet wird. Die Steilheit des Anstieges der Schraubentouren ist aus dem Arbeitsdiagramm nur in Kombination mit einer der beiden anderen Kurven direkt zu ermitteln. Sie ist keine gleichmässige, da die einzelnen Strecken des Arbeitsdiagramms mit sehr verschiedener Geschwindigkeit durchlaufen werden. Eine Vorstellung der Steilheit des Anstiegs der Schraube kann jedoch auch das Arbeitsdiagramm vermitteln, wenn in demselben die in der gleichen Zeit

1) H. Straub, Das Tachogramm der Herzkammerbasis. Deutsches Arch. f. klin. Med. Bd. 118 S. 220. 1915.

durchlaufenen Strecken abgegrenzt werden. So wurden in Fig. 1 die in je $\frac{1}{100}$ Sekunde durchlaufenen Kurvenabschnitte durch Querstriche abgegrenzt. Man erkennt nun, dass die beiden isometrischen, der *P*-Achse nahezu parallelen, fast geradlinigen Kurvenabschnitte mit grosser Geschwindigkeit durchlaufen werden. Der Anstieg der Schraube ist also hier wenig steil. Die beiden verbindenden Kurventeile werden viel langsamer durchmessen, um so langsamer, je mehr sie der Richtung der *V*-Achse parallel verlaufen. Zum Teil hängt dies natürlich mit dem gewählten willkürlichen Maassstab der *P*- und *V*-Achse zusammen. Das geht besonders daraus hervor, dass dem Gipfelteil der Druckkurve, wo die Änderung des Drucks mit der Zeit ein Minimum aufweist, das Maximum der Änderung des Volums mit der Zeit nahe benachbart ist. Doch würde auch durch mächtige Vergrösserung des Maassstabes der *V*-Achse der Unterschied nicht vollständig verschwinden. Ganz besonders kleine Kurvenabschnitte werden aber durchlaufen in dem unteren Kurvenstück des Arbeitsdiagramms, von *F*—*A*. Hier ist also der Anstieg der Schraubenwindung ganz besonders steil zu denken. An dieser Stelle sind in der Tat Minimum der Änderung des Druckes (Ebene I) und des Volums (Ebene II) mit der Zeit unmittelbar benachbart, so dass die Geschwindigkeit, mit der das Arbeitsdiagramm durchlaufen wird, durch keine Änderung des Maassstabes beeinflusst wird.

Unter stationären Bedingungen ist das Arbeitsdiagramm eine geschlossene Kurve, da nach Ablauf einer Herzrevolution das Herz wieder in den ursprünglichen Zustand zurückkehren muss. Die in der Ebene III abgebildete Kurve wird während jeder Herzrevolution einmal entgegen dem Sinne des Uhrzeigers umkreist. Wie man sieht, umkreist die natürliche Zuckung des Säugetierherzens eine Fläche, deren Grenzen an zwei Stellen, während der Anspannungszeit und während der Verschlusszeit, nahezu parallel der *P*-Achse, d. h. nahezu isometrisch verlaufen. Die erste dieser isometrischen Strecken, *A*—*B*, entspricht der Anspannungs-, die zweite, *D*—*F*, der Verschlusszeit. Die Strecke *B*—*D*, die der Austreibungszeit entspricht, verläuft zur Abszisse konkav, die Strecke *F*—*A*, die Füllungszeit, zur Abszisse konvex. Beide entfernen sich gleich erheblich von isotonischen und isometrischen Bedingungen. Namentlich ist hervorzuheben, dass die Kurve der Austreibungszeit auch nicht annähernd isotonisch verläuft, während das Ende der Füllungszeit sich isotonischem Verlauf, parallel zur *V*-Achse, wenigstens einigermassen annähert.

Bei näherer Betrachtung ergeben sich bemerkenswerte Einzelheiten. Beginnen wir die Besprechung mit dem Beginn der Anspannungszeit, bei *A*. Wir sagten, die Strecke *A—B*, die der Anspannungszeit entspricht, verläuft nahezu parallel der *P*-Achse, das heisst nahezu isometrisch, nahezu ohne Volumänderung. Bei genauerer Betrachtung sehen wir aber, dass dies nicht völlig zutrifft. Es stellen sich nämlich, wie schon die Volumkurve gelehrt hatte ¹⁾, während der Anspannungszeit Volumverschiebungen in der Ebene der Atrioventrikularklappen ein, die wir auf den Einwärtszug der Papillarmuskeln einerseits, auf die ausbauchende Wirkung des steigenden Kammerdrucks andererseits bezogen hatten. Vielleicht darf dem noch hinzugefügt werden, dass der muskuläre Klappenring, an dem die Atrioventrikularklappen ansetzen, sich mit Beginn der Kammer systole verengert, wodurch Verschiebung der zentralen Teile der Atrioventrikularklappen ventrikulwärts ebenfalls begünstigt werden muss. Daher rührt die häufig, so auch im vorliegenden Falle, beobachtete geringe Volumzunahme der Kammern während der Anspannungszeit, die Abweichung des Arbeitsdiagramms von dem rein isometrischen Verlauf.

Die Austreibungszeit reicht von *B* bis *E*. Zunächst steigt der Druck noch sehr erheblich an, bis der Abfluss in die Kapillaren erst gleich, dann grösser wird als der Zufluss aus dem Herzen in die Aortenwurzel. Ein grosser Teil, im vorliegenden Fall etwa drei Fünftel des ganzen Schlagvolumens, werden bei sinkendem Druck ausgeworfen. Die Kurve des Arbeitsdiagramms weist keinen glatten Verlauf auf. Vielmehr sind offenbar besonders deutlich während der Zeit steigenden Drucks, von *B* bis *C*, aber unverkennbar auch noch von *C* bis *D*, Schwingungen auf die Grundkurve aufgesetzt. Diese Schwingungen, die zeigen, dass die Änderungen des Drucks denen des Volums nicht durchaus gleichsinnig verlaufen, sind typische Eigenschwingungen der in Bewegung gesetzten Massen, die sich also nicht nur in der Aortenwurzel geltend machen, sondern sich auf den Ventrikelinhalt fortpflanzen oder vielmehr schon im Ventrikelinhalt ihren Ausgang nehmen. Aus dem Kurvenverlauf ergibt sich, dass der Ventrikeldruck zunächst über den zur Überwindung des Aortendrucks nötigen Wert hinausschiesst, bis die

---

1) H. Straub, The diastolic filling of the mammalian heart. Journ. of Physiol. vol. 40 p. 378. 1910.

träge Masse des Blutes in der Kammer in Bewegung gesetzt wird. Während dieser Zeit steigt der Druck noch stärker an, die Volumabnahme ist gering. Der ganz genaue Zeitpunkt der Aortenklappenöffnung wird für die hier zugrunde gelegten besonders genauen Zeitmessungen unscharf. Er ist zu suchen zwischen dem Punkte *B* und dem Maximum der als s_1 bezeichneten Schwingung. Das Hinausschiessen des Kammerdrucks über die notwendige Höhe führt häufig zur Ausbildung der zuerst von Piper¹⁾ beschriebenen Zacke im aufsteigenden Schenkel der Druckkurve (siehe Skizze rechts oben, Fig. 1). Nun erst kommt die Blutmasse in Bewegung. Vermöge ihrer Trägheit schiesst auch die Bewegung etwas über das Ziel hinaus, das Volum nimmt sehr rasch ab, die Kurve des Arbeitsdiagramms biegt scharf von der *P*-Achse weg in die Richtung der *V*-Achse um, im Arbeitsdiagramm entsteht ein Wellental. Diese Phase kann in der Druckkurve sogar zu einer Senkung des Druckes führen, wenn die besprochene Zacke der Kammerdruckkurve scharf ausgesprochen ist. In solchen Fällen ist dann auch im Arbeitsdiagramm an Stelle der Welle s_1 ein scharfer Knick vorhanden. Sehr häufig, so auch im vorliegenden Fall, macht sich jedoch die Trägheit nicht so hochgradig bemerkbar, es kommt dann auch in der Druckkurve nur zu einer leichten Einbiegung zur Zeit der Aortenklappenöffnung. Die Schilderung der Ereignisse während der Aortenklappenöffnung führt nun auch zu schärferer Bestimmung der zeitlichen Lage der Öffnung in Beziehung zu der Druckkurve. Bisher war nur zu sagen, dass die Klappenöffnung um die Zeit der ersten Schwingung der Druckkurve erfolgt. Die kleine Skizze, in Fig. 1 rechts oben, gibt den Verlauf der Druckkurve während der fraglichen Zeit, wie sie sich bei ausgesprochener Ausbildung der Zacke darstellen würde. Man erkennt aus der Skizze, dass die Zacke eine merkliche Zeit in Anspruch nimmt. Die Aortenklappenöffnung ist nun nach dem eben Gesagten während des Kurvenverlaufs zwischen *u* und *v* anzunehmen. Von *v* bis *w* ist dann das erste Maximum der Ausströmungsgeschwindigkeit zu suchen, während dessen der Druck in der Kammer durch eine Art Wasserstrahl-Pumpenmechanismus sogar fallen kann. Diese Stelle entspricht im Arbeitsdiagramm dem Wellental zwischen s_1 und s_2 . Nun sind Eigenschwingungen der

---

1) H. Piper, Die Blutdruckschwankungen in den Hohlräumen des Herzens und in den grossen Gefässen. Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1912 S. 343.

in Bewegung gesetzten Massen ausgelöst, die sich über die ganze Austreibungszeit geltend machen. Zunächst steigt der Kammerdruck wieder stärker an, es kommt zur Anfangsschwingung der Kammer- und Aortendruckkurve. Da gleichzeitig die Strömungsgeschwindigkeit wieder abnimmt und kurz nach der Anfangsschwingung der Druckkurve ein Minimum erreicht, muss im Arbeitsdiagramm ein zweiter Wellenberg sich ausbilden, s_2 . Zu dieser Zeit nähert sich die Richtung der Kurve wieder mehr der P -Achse. Der Mechanismus wiederholt sich, im Arbeitsdiagramm sehen wir noch eine ganze Anzahl solcher Wellen sich folgen. Einem Wellental folgt die dritte Welle s_3 in diesem Falle sehr nahe dem Gipfelteil des Diagramms. Auch im absteigenden Schenkel lassen sich noch die Wellen s_4 und s_5 mit grosser Wahrscheinlichkeit ausmitteln. Die Ausbildung dieser Wellen ist in verschiedenen Kurven sehr verschieden deutlich, doch finden sich Andeutungen derselben wohl immer. Von Wichtigkeit ist, die Schwingungszahl dieser Eigenschwingungen zu ermitteln. Im aufsteigenden Schenkel, von s_1 bis s_3 , beträgt die Länge einer ganzen Welle, wie aus den eingetragenen Zeitmarken zu ersehen ist, fast genau 0,02 Sek. Im absteigenden Schenkel werden die Abstände der Wellenberge offensichtlich grösser. Da die Wellenlänge der Eigenschwingungen von der Elastizität und der Masse abhängt, kann sie, wenn die Grösse eines dieser Faktoren bekannt ist, zur Ermittlung des anderen dienen. Die Zunahme der Wellenlänge im absteigenden Schenkel des Diagramms könnte bezogen werden auf Verminderung des Elastizitätskoeffizienten. Auch bei Einbeziehung eines grösseren Bereichs des elastischen Systems der Gefässe ist kaum wahrscheinlich, dass dieser Faktor zur Erklärung der starken Verlängerung der Wellendauer ausreicht. An eine Zunahme der Masse wird man nur dann denken können, wenn man annimmt, dass innerhalb des Herzens zunächst nicht die ganze Blutmasse in Schwingung gerät, sondern nur die der Aortenöffnung unmittelbar benachbarte bzw. in der Aortenwurzel enthaltene, und dass nun die schwingende Masse allmählich mit steigender Füllung der Gefässe zunehme. Diese Annahme hat sicher etwas Gezwungenes, um so mehr, wenn man bedenkt, dass wachsende Blutmengen in die Kapillaren abfliessen. Man wird deshalb in Erwägung ziehen müssen, ob nicht die Frequenz der Eigenschwingungen im absteigenden Schenkel des Arbeitsdiagramms gestört wird durch rückläufige Wellen im Arteriensystem. Die Frage, ob solche Wellen

existieren, hat bekanntlich noch nicht endgültig beantwortet werden können. Gegen Schluss der Austreibungszeit wird die Blutbewegung immer mehr verlangsamt, während die Druckkurve steil abfällt. Das Arbeitsdiagramm biegt in eine der *P*-Achse fast parallele Richtung ein. Während des sehr langen Stücks des Diagramms, das etwa von *D* bis *E* reicht, findet eine nennenswerte Blutbewegung nicht mehr statt, obgleich der Zeitpunkt des vollzogenen Klappenschlusses erst bei *E* anzusetzen ist. Eine geringfügige Volumzunahme der Ventrikel weist, wie schon bei Besprechung der Volumkurve hervorgehoben, auf den Rückfluss der zwischen den Segelklappen liegenden Blutmengen in den Ventrikel hin.

Nur ein kurzes Stück, von *E* bis *F*, verläuft das Arbeitsdiagramm isometrisch. Dann aber, schon hoch oben, von der Abszisse weit entfernt, beginnt das Volum zuzunehmen, sobald die Kammerstauungswelle des Vorhofdrucks höhere Werte aufweist als der Kammerdruck. Dies beweist, dass die Füllung beginnt, lange ehe die Kontraktion beendet ist. Zunächst erfolgt das Einströmen, die Umbiegung des Arbeitsdiagramms, ziemlich langsam, solange der Druck in der Kammer noch hoch ist; bald aber biegt die Kurve mehr und mehr in die Richtung der *V*-Achse ein. Während der Vorhofsystole, die einen deutlichen Druckzuwachs bringt, verläuft das Diagramm vorübergehend parallel der *V*-Achse, also isotonisch. Ja, es kann sogar eine Druckzunahme auch in der Kammer auftreten, das Diagramm ansteigen. Während des Restes der Füllungszeit sind die Druckänderungen gering, auch die Volumänderungen vermindern sich mehr und mehr. In gleichen Zeiten werden nur noch sehr kurze Strecken des Diagramms durchlaufen. Aber bis zum Schluss der Füllungszeit verläuft das Arbeitsdiagramm noch gegen die Abszisse absteigend, ein Beweis für die nicht vollständige Erschlaffung des Ventrikels. Wäre dessen Muskulatur in völlige Ruhe übergegangen, so müsste bei zunehmender Füllung das Diagramm der Dehnungskurve des ruhenden Herzens folgen, das von der Abszisse ansteigt.

Die Tatsachen, die sich aus den bisher beschriebenen Eigenschaften des Arbeitsdiagramms ergeben, hatten sich im wesentlichen schon bei getrennter Betrachtung der Druck- und Volumkurve ermitteln lassen. Die Bedeutung der Konstruktion des Arbeitsdiagramms liegt in dem Umstand, dass es ein vollkommener Ausdruck der gesamten potentiellen Energie ist, die bei einer Herz-

revolution betätigt wird. Die von dem Herzen während eines Schlages geleistete Arbeit ist gleich der Fläche, die von der geschlossenen Kurve der Arbeitsdiagramms umgrenzt wird, wenigstens was den wichtigsten Teil dieser Arbeitsleistung anbetrifft, die Schaffung von potentieller Energie [Frank¹⁾]. Mathematisch gesprochen ist also das Integral des Arbeitsdiagramms der Ausdruck der Herzarbeit. Der rechnerische, vollständige Ausdruck dieser Arbeit ist nach Frank¹⁾:

$$A = \underbrace{\int_{V_1}^{V_2} P dV}_I - \underbrace{\int_{V_1}^{V_2} \psi(V) dV}_II + \underbrace{\sum \frac{dm v_1^2}{2}}_{III} - \underbrace{\sum \frac{dm v_2^2}{2}}_{IV} + R \pm Ai + W \quad \begin{matrix} V \\ I \\ \\ \\ \\ V \\ VI \\ VII \end{matrix}$$

In dieser Gleichung stellt der erste Summand I die potentielle, dem Blut mitgeteilte Energie dar. II ist die potentielle Energie, die bei der einfachen elastischen Zusammenziehung wieder frei würde, ohne dass der Ventrikel in tätigen Zustand versetzt worden wäre. III ist die in der Aortenwurzel vorhandene kinetische Energie, IV der Rest kinetischer Energie, den das Blut beim Einströmen in den Ventrikel schon besass, soweit er in dem Kreislauf des Blutes Verwendung finden kann. V ist die Energie zur Überwindung der Reibungswiderstände im Ventrikel selbst, VI die potentielle und kinetische Energie, die bei Bewegung der kleinsten Teile der Ventrikelmuskulatur aufgewendet wird, soweit sie nicht in Form von Wärme primär auftritt, und VII die Wärme.

Der siebente Summand, die Wärme, dessen Kenntnis für eine vollständige Darstellung der Thermodynamik des Herzmuskels notwendig wäre, bleibe im folgenden unerörtert, da wir uns auf die Darstellung der Mechanik beschränken. Anhaltspunkte zur Analyse des fünften und sechsten Summanden fehlen bisher fast vollständig. Ihre Vernachlässigung bedingt keinen erheblichen Fehler.

Die wichtigsten Summanden sind der erste und zweite. Die geometrische Repräsentation des ersten ist die Fläche, die einerseits von den zu V_1 und V_2 gehörigen Druckordinaten begrenzt wird, andererseits von der V -Achse und der Druck-Volumkurve der Systole von A bis E . Der zweite Summand wird dargestellt durch die Fläche, die durch dieselben Druckordinaten, die V -Achse und die Dehnungskurve (Druck-Volumkurve) des ruhenden Ventrikels begrenzt wird.

1) O. Frank, Die Grundform des arteriellen Pulses. Zeitschr. f. Biol. Bd. 37 S. 483. 1899.

Diese Dehnungskurve, deren Verlauf für das Säugetierherz sich bisher nicht ermitteln lässt, sei in Analogie mit den von Frank am Fröschherzen gefundenen Verhältnissen in durchaus hypothetischer Weise durch die Kurve $G-H$ dargestellt. Der dritte Summand lässt sich aus dem Tachogramm ermitteln.

Wie man sieht, wird durch die bisher umgrenzten Flächen die geometrische Figur unseres Arbeitsdiagramms nicht vollständig umschrieben, vielmehr bleibt noch eine Fläche unberücksichtigt, die durch die Druckordinaten von V_1 und V_2 , die Dehnungskurve des ruhenden Herzmuskels, von G bis H , und durch die Kurve des Arbeitsdiagramms während der Diastole begrenzt wird. Auch darauf hat Frank¹⁾ schon hingewiesen, dass die Zustände bei der Wiederausdehnung nicht immer oder selten der Dehnungskurve des ruhenden Herzmuskels folgen. Fig. 1 zeigt aufs deutlichste die Hochgradigkeit dieses Unterschiedes, dessen Vernachlässigung bei der Berechnung der Herzarbeit einen sehr erheblichen Fehler bedingt. Gerade die so begrenzte Fläche ist von grosser theoretischer Bedeutung.

Das Minimum an äusserer Arbeit, das notwendig ist, um den Ventrikel vom Zustand am Ende der Systole bis zu dem Volumen V_1 wieder zu füllen, führt isometrisch entlang der zu V_2 gehörigen Druckordinate bis G (hypothetischer Punkt!) und von da auf der Dehnungskurve der Minima des ruhenden Herzmuskels. Dieser Weg ist nur dann gangbar, wenn die Füllung beginnt, nachdem der Herzmuskel in völligen Ruhezustand übergegangen ist. Die Arbeit, die auf diesem Wege an dem Ventrikel während der Diastole geleistet wird, ist repräsentiert durch die Fläche, deren Begrenzung die V -Achse, die Druckordinaten von V_1 und V_2 und die Dehnungskurve $G-H$ darstellen. Diese Arbeit ist also identisch mit dem zweiten Summanden unserer Gleichung, der die durch die Elastizität des ruhenden Muskels wieder zu gewinnende Arbeit ausdrückt. Würde also der Weg $E-F-G-H$ in unendlich langsamer Zeit durchlaufen, so würde es sich um einen reversiblen Prozess in dem strengen Sinne handeln, in dem dieser Begriff in der Thermodynamik gebräuchlich ist. Die potentielle, dem Ventrikel so erteilte Energie ist reversibel, das heisst in ihrem ganzen Betrag unter Ausnützung der elastischen Eigenschaften des Ventrikels wiederzugewinnen.

1) O. Frank, Die Grundform des arteriellen Pulses. Zeitschr. f. Biol. Bd. 37 S. 518. 1899.

Das Arbeitsdiagramm zeigt unmittelbar, dass diese in reversibler Form geleistete Arbeit nur einen kleinen Teil der gesamten während der Diastole am Ventrikel geleisteten Arbeit ausmacht. Der Grund hierfür liegt einmal in dem Umstand, dass die für reversible Prozesse notwendigen unendlich langen Zeiten für die Verhältnisse des natürlichen Kreislaufs nicht zu Gebote stehen, dass vielmehr die Füllung in verhältnismässig kurzer Zeit vollendet sein muss. Aber auch in irreversibler Weise, während verhältnismässig kurzer Zeiten, wäre die Energietransformation auf demselben Wege $E-F-G-H$ annähernd denkbar, wenn der Prozess mit einer Wärmetönung verläuft. Immer noch wäre dabei Voraussetzung, dass die Arbeit gegen den ruhenden Herzmuskel geleistet wird.

Die Tatsache, dass das Arbeitsdiagramm nicht der Dehnungskurve des ruhenden Herzmuskels, sondern der Kurve $F-A$ folgt, belehrt uns also darüber, dass während der Diastole die Kontraktion noch nicht beendet ist, dass ein Kontraktionsrückstand besteht, gegen den Mehrarbeit geleistet werden muss, wenn der Ventrikel gefüllt werden soll. Wie gross die Mehrarbeit ist, ergibt sich aus den Integralen der beiden Wege von V_1 bis V_2 , das heisst aus den Flächen, die von der Abszisse, den Druckordinaten und den beiden Kurven begrenzt werden. Da die Dehnungskurve des ruhenden Herzmuskels $G-H$ hypothetisch ist, lassen sich genaue Zahlenangaben über die gegenüber dem Minimum erforderliche Mehrarbeit nicht geben. Doch ergibt sich aus Fig. 1, dass im vorliegenden Falle die während der Füllungszeit am Ventrikel zu leistende Arbeit dadurch nahezu verdoppelt wird, dass sie gegen einen Kontraktionsrückstand und nicht gegen den ruhenden Herzmuskel geleistet wird.

Die Energie, die während der Diastole dem Ventrikel von aussen zugeführt wird, stammt zum Teil von früheren Systolen der anderen Kammer her, soweit sie nicht durch die Reibungswiderstände der Gefässbahn während des Kreislaufs in Wärme umgesetzt, zum kleinen Teil auch zur Leistung anderweitiger Arbeit in Anspruch genommen wurde. Der messbare Ausdruck dieser vom Venensystem her zugeführten Energie ist der Venendruck. Zum zweiten stammt Energie, die dem Ventrikel zugeführt wird, aus der Vorhofsystole. Durch die Kräfte, die so während der Diastole eine irreversible Energietransformation bewirken, wird eine Blutbewegung gewährleistet. Durch die Teilung der Herzrevolution in zwei Phasen, Systole und Diastole, muss die kinetische Energie des während der

Diastole einströmenden Blutes, die im Blutkreislauf Verwendung finden soll, die also durch den vierten Summanden der Arbeitsgleichung ausgedrückt wird, in potentielle Energie umgesetzt werden. Das Arbeitsdiagramm, das die bei der Herzrevolution auftretenden Änderungen der potentiellen Energie vollständig enthält, gibt also auch den vierten Summanden der Arbeitsgleichung wieder, nicht getrennt, sondern enthalten in der Arbeitsfläche, die während der Diastole am Ventrikel geleistet wird.

Wir können uns die Betrachtungsweise deshalb erleichtern, wenn wir die Trennung der verschiedenen Summanden, die mit negativem Vorzeichen versehen in der Arbeitsgleichung enthalten sind, mit Ausnahme des sechsten, unterlassen und alle diese Summanden in einem zusammenfassen, wenn wir also an Stelle des zweiten und vierten Summanden einen neuen setzen, dessen mathematischer Ausdruck dann ist: $-\int_{V_1}^{V_2} \varphi(V) dV$. Wenn $\psi(V)$ der ursprünglichen Frank'schen Gleichung die Dehnungskurve des ruhenden Herzmuskels darstellt, so ist $\varphi(V)$ die Kurve $F-A$ des Arbeitsdiagramms während der Füllungszeit. Der geometrische Ausdruck der sämtlichen negativen Summanden, die wir in dem einen $-\int_{V_1}^{V_2} \varphi(V) dV$ zusammengefasst haben, ist dann die von der Abszisse, den Druckordinaten von V_1 und V_2 und der Kurve $F-A$ begrenzte Fläche.

Aus dem Umstande, dass das Arbeitsdiagramm am Ende der Diastole noch immer einen gegen die Abszisse absteigenden Verlauf besitzt, schliessen wir, dass auch zu diesem Zeitpunkt der Kontraktionsrückstand noch nicht vollständig beseitigt ist. Denn wäre die Muskulatur in vollkommene Ruhe übergegangen, so müsste der Verlauf des Arbeitsdiagramms fast vollkommen mit der Dehnungskurve des ruhenden Ventrikels zusammenfallen, um so mehr, weil die Blutbewegung, also die kinetische Energie, die das Arbeitsdiagramm von dieser Kurve entfernen könnte, um diese Zeit ziemlich gering geworden ist. Dieser Tatsache haben wir in Fig. 1 dadurch Rechnung getragen, dass wir den Punkt H nicht mit dem Punkte A zusammenfallen liessen. Die Erkenntnis, dass die Minima der natürlichen Zuckung des Säugetierherzens in der Regel nicht auf der Dehnungskurve des ruhenden Herzmuskels liegen, hat ihr Analogon in der Feststellung Frank's, dass die Dehnungskurve der isotonischen Minima des Froschherzventrikels bei niedrigen Füllungs-

drucken mit den Dehnungskurven des ruhenden Herzens nicht zusammenfallen. Frank hat darauf hingewiesen, welche grosse Bedeutung diese Tatsache hat für die Analyse der diastolischen Wirkung zahlreicher Eingriffe, besonders der Vagusreizung und der Wirkung von Digitalis. Frank hat gezeigt, in welcher irrtümlicher Weise meist der Begriff des Tonus verwendet wurde in Nichtbeachtung dieses bedeutungsvollen Unterschiedes der Dehnungskurven der Minima unter verschiedenen Arbeitsbedingungen.

Unsere Beobachtung hat aber auch eine Bedeutung für die Analyse der Dynamik der Systole. Wissen wir doch, dass der Verlauf der Systole in ihrer ursprünglichen Anlage eindeutig bestimmt wird von der Beschaffenheit des Herzmuskels und von den Anfangsbedingungen, unter denen der Muskel steht. Es ist also keineswegs gleichgültig, ob die Systole vom Punkte *A* oder *H* des Arbeitsdiagramms beginnt. Von inotropen Wirkungen eines Eingriffs zu sprechen, geht so lange nicht an, als die Analyse der Anfangsbedingungen unter dem Einfluss des Eingriffs nicht durchgeführt ist. Für das Säugetierherz ist eine solche Analyse bisher nicht einmal versucht worden. Alles, was über inotrope Wirkungen gesagt wurde, muss deshalb als unbewiesen betrachtet werden und bedarf der Nachprüfung.

Noch ein weiterer Punkt ist zu berücksichtigen. Nicht nur Anfangsspannung und Anfangsfüllung, deren Beziehungen das Arbeitsdiagramm ausdrückt, bestimmen die Zuckung, sondern auch der Zustand des Muskels. Dieser ist nun mit Sicherheit ein verschiedener, je nachdem der Kontraktionsrückstand der vorhergehenden Kontraktion ein grosser oder geringer ist. Solange die Kontraktion auf ihrer Höhe ist, verhält sich der Ventrikel deshalb neuen Reizen gegenüber refraktär. Trifft der Reiz während des absteigenden Schenkels der Kontraktionskurve, so wird die Zuckung um so kleiner, je höher oben der Reiz eintrifft. Daher stammt zum guten Teil der geringe Arbeitseffekt der vorzeitig einsetzenden Extrasystole. Man vergewärtige sich, dass ein Kontraktionsrückstand während der ganzen oder doch während des grössten Teils der Diastole besteht, und man wird die Bedeutung dieser Tatsache auch für den Verlauf der rechtzeitig einsetzenden Systole würdigen. Nehmen wir an, eine Substanz wirke auf den Kontraktionsrückstand während der Diastole ein, indem sie die Dauer seiner Wirkung verlängert oder verkürzt, so werden wir verstehen, dass diese Substanz eine „positiv oder negativ

inotrope“ Wirkung auf die nächste Systole ausüben muss, rein durch Beeinflussung der Erschlaffung. Da wir von den Digitalissubstanzen, um nur ein Beispiel zu nennen, wissen, dass sie die Kontraktionskurve in ihrer Dauer verlängern ¹⁾ so werden wir im vorliegenden Zusammenhang mit einem Male verstehen, weshalb es unter der Wirkung der Digitalis zum Auftreten von Alternans und schliesslich von Halbrhythmus kommen muss. Das sollte bei pharmakologischen Analysen nicht vergessen werden. In solchen Fällen von Hypodynamie oder Adynamie zu sprechen, wäre unberechtigt. Die Darstellung des diastolischen Verlaufs des Arbeitsdiagramms halten wir deshalb für solche Analysen für unerlässlich. Auf die klinische Bedeutung dieser Feststellungen werde ich in einer späteren Arbeit zurückkommen.

Die Tatsache, dass die Kontraktion während des grössten Teils oder während der ganzen Dauer der Diastole noch anhält, ist aber nicht nur für die Dynamik der folgenden Systole von Wichtigkeit, sondern auch für den Vorgang der Füllung selbst. Je länger die Diastole dauert, desto mehr wird sich das Arbeitsdiagramm der Dehnungskurve des ruhenden Herzmuskels nähern. Verläuft das Diagramm auf dieser Dehnungskurve, so ist zwischen Vorhof- und Kammerinhalt ein Gleichgewichtszustand erreicht, der nur dadurch gestört wird, dass von den Venen her neues Blut zufliesst. Solange aber das Arbeitsdiagramm noch nicht die Dehnungskurve des ruhenden Herzmuskels erreicht, wird bei Verlängerung der Diastole ein Mehrzufluss nicht nur durch Druckerhöhung im Vorhofgebiet herbeigeführt, sondern auch durch Drucksenkung in der Kammer infolge der zunehmenden Erschlaffung. Der Blutzufuss zur Kammer wird also mit Verlängerung der Diastole desto länger ein erheblicher sein, je grösser der Kontraktionsrückstand ist und je langsamer er schwindet. Von dem Ablauf der Kontraktionskurve während der Diastole wird es also abhängen, ob eine Frequenzänderung das Zeitvolumen günstig oder ungünstig beeinflusst.

In der Klinik hat man sich vielfach angewöhnt, die Zeitdauer der Kontraktion mit derjenigen der Systole gleich zu setzen, sehr mit Unrecht, wie die angestellten Überlegungen zeigen. In pharmakologischen Betrachtungen andererseits wird wenigstens für das

---

1) W. Straub, Über die Wirkung des Antiarins am ausgeschnittenen suspendierten Froschherzen. Arch. f. exper. Pathol. u. Pharm. Bd. 45 S. 346.

Froschherz die Systole häufig nur bis zum Zuckungsgipfel gerechnet, von da ab die Diastole gezählt. Eine klarere Definition der gebrauchten Begriffe erscheint hier notwendig. Das hat nicht nur theoretische Bedeutung. A. Hoffmann¹⁾ hat bekanntlich aus der von ihm als gesetzmässig angesehenen Beobachtung, dass die T-Zacke des Elektrokardiogramms mit der Systole endige, den Schluss ziehen wollen, dass diese Zacke das elektrische Äquivalent der Kontraktion sei. Erinnern wir uns, dass die Kontraktion stets die Systole überdauert und meist auch die ganze Diastole einnimmt, so werden wir Hoffmann's Erklärung nicht zustimmen können, die auf einer Verwechslung von Systole und Kontraktion beruht.

Der Einfluss des Schlagvolumens auf das Arbeitsdiagramm.

Die in Fig. 3 der Tachogrammarbeit²⁾ abgebildeten Druck- und Volumkurven gestatten die Konstruktion der zugehörigen Arbeitsdiagramme. Der Nullpunkt der Volumordinate ist, wie besprochen, für jedes dieser Diagramme unbekannt, ihre gegenseitige Lage jedoch mit grosser Wahrscheinlichkeit durch den Umstand bestimmt, dass sich der Ventrikel trotz wechselnden Schlagvolumens bei gleichem arteriellen Widerstand immer auf ziemlich genau dasselbe Maass entleert³⁾. Der Irrtum in den Lagebeziehungen der verschiedenen Arbeitsflächen ist deshalb nur ein geringer. Der Verlauf der Arbeitsdiagramme entspricht im wesentlichen durchaus dem geschilderten. Die Kurven (Fig. 2) steigen (rechts) nahezu isometrisch während der Anspannungszeit an. Während der Austreibungszeit sind besonders schön und deutlich die dem Kurvenverlauf aufgesetzten Eigenschwingungen des in Bewegung gesetzten Systems zu erkennen, am deutlichsten in den Kurven 2—4, etwas weniger ausgesprochen bei 1 und 5. Von dem Momente der Aortenklappenöffnung bis zum Druckmaximum sind in den einzelnen Kurven ziemlich genau gleich viele Schwingungen erkennbar. Da die Zeit, die diese Phase der

---

1) A. Hoffmann, Zur Deutung des Elektrokardiogramms. Pflüger's Arch. Bd. 133 S. 552. 1910.

2) H. Straub, Das Tachogramm der Herzkammerbasis. Deutsches Arch. f. klin. Med. Bd. 118 S. 214. 1915.

3) H. Straub, Dynamik des Säugetierherzens. I. Deutsches Arch. f. klin. Med. Bd. 115 S. 531. 1914.

Herzrevolution in Anspruch nimmt, durch Vergrößerung des Schlagvolumens nur unbedeutend oder nicht beeinflusst wird¹⁾, werden also in gleichen Zeiten gleich viele Schwingungen ausgeführt (bis zur Grenze der Messfehler). Abgrenzung gleicher zeitlicher Intervalle in den Diagrammen bestätigt dies. Zwei Faktoren beeinflussen die Schwingungszahl, einmal die in Bewegung gesetzte Masse. Da sie durch Vergrößerung des Schlagvolumens offensichtlich wächst, muss durch ihre Wirkung die Schwingungszahl herabgesetzt werden. Andererseits wird aber der zweite Faktor, die Elastizität, durch Vergrößerung des Schlagvolumens zunehmen, da die Arterien stärker gefüllt und gespannt werden. Die Schwingungszahl wird dadurch erhöht werden. Die zwei antagonistischen Faktoren kompensieren sich offenbar in ihrer Wirkung ziemlich weitgehend. Dass in Kurve 1 die Eigenschwingungen weniger deutlich hervortreten, erklärt sich wohl aus der sehr geringen in Bewegung gesetzten Masse. In Kurve 5 andererseits trägt wohl die starke Beanspruchung der Elastizität des Gefäßgebietes durch die starke Füllung dazu bei, die Ausbildung der Schwingungen zu mildern.

Im zweiten Teile der Austreibungszeit, der bei sinkendem Drucke verläuft, verlaufen die Arbeitsdiagramme mit wachsendem Schlagvolumen immer mehr kreisbogenförmig, indem sie immer weniger steil in die der Druckachse parallele Richtung abbiegen. So kommt es, dass der der Austreibungszeit entsprechende Kurvenanteil bei wachsendem Schlagvolumen jeweils den aller bei kleinerem Schlagvolumen gezeichneten Diagramme umschliesst. Nur die bei grösstem Schlagvolumen gezeichnete Kurve 5 macht eine Ausnahme. Sie biegt steiler nach der Abszisse ab und durchschneidet die anderen Diagramme. Dies ist offenbar kein Zufall, denn auch eine Schar von Arbeitsdiagrammen, die auf Grund der weniger genauen Volumkurven der Fig. 10 der Arbeit über die Dynamik des Säugetierherzens¹⁾ konstruiert wurde, zeigt bei grösstem Schlagvolumen dieselbe Eigentümlichkeit. Dass sich in dieser Erscheinung eine beginnende muskuläre Insuffizienz dokumentiere, ist wohl kaum anzunehmen. Vielmehr sind offenbar, da durch die künstlichen Kapillaren in der Zeiteinheit nur beschränkte Blutmengen abfliessen können, die künstlichen Arterien an der Grenze ihres Fassungsvermögens angelangt, wodurch gerade im späteren Verlauf der Systole, bei maximaler

¹⁾ H. Straub, Dynamik des Säugetierherzens T. I. c.

Füllung der Arterien, der Entleerung grosse Widerstände erwachsen müssen.

Vor Schluss der Semilunarklappen zeigen sämtliche Diagramme deutlich die geringe Volumzunahme durch Rückfluss der zwischen den Klappen liegenden kleinen Blutmassen. Immerhin scheint die zurückfliessende Menge mit wachsendem Schlagvolum merkbar zuzunehmen, vielleicht, weil die Klappen durch den grossen Blutstrom vollständiger an die Wand der Aortenwurzel angelegt und deshalb weniger rasch geschlossen werden.

Nachdem die Kurven eine mehr oder minder lange Zeit isometrisch, parallel der Druckachse, verlaufen sind, öffnen sich die Atrioventrikularklappen, die Füllung beginnt. Die Druckhöhe, bei der die Klappenöffnung erfolgt, hängt von dem Vorhofdrucke zur Zeit der Kammerstauungswelle ab; sie ist deshalb niedrig bei kleinem, hoch bei grossem Schlagvolumen, entsprechend den verschiedenen während der Kammerstole im Vorhof gestauten Blutmassen. Auch der Grad der durch das Abfliessen der Kammerstauungswelle des Vorhofs bedingten Volumzunahme der Kammer ist bei wechselndem Schlagvolumen entsprechend verschieden, wodurch der Neigungswinkel der Arbeitsdiagramme an dieser Stelle wechselt. Bei den Kurven 2—4 macht sich der Abfluss der gestauten Blutmassen in einer ziemlich scharfen Eindellung des Diagramms bemerkbar, während des Abflusses ist die Volumveränderung erheblich, die Druckänderung bescheiden, der Kurvenverlauf nähert sich der Abszissenrichtung. Nach Abfluss der gestauten Welle fällt das Diagramm zunächst wieder steiler nach der Abszisse zu ab. In Kurve 1 ist die Delle der Kammerstauungswelle wenig deutlich wegen der sehr geringen überhaupt in Frage kommenden Blutmengen. In Kurve 5 sind die zufließenden Blutmassen so gross, dass der Einfluss der Stauungswelle sich weit in die späteren Zeiten der Diastole hineinerstreckt, dass die Welle spät und sehr allmählich verebbt. Sehr anschaulich lehren die Arbeitsdiagramme, wieviel grösser die gegen den erschlaffenden Ventrikel geleistete Füllungsarbeit bei grossem als bei kleinem Schlagvolumen ist, indem die Diagramme immer höher oben die Druckordinate, die dem kleinsten Volumen zugehört, verlassen und sich immer weiter von dieser Ordinate entfernen. An dieser Stelle verlaufen also die Arbeitsdiagramme im Gegensatz zu dem bei der Austreibungszeit Beobachteten so, dass die Arbeitsflächen der kleineren Schlagvolumina die der grösseren umschliessen.

Die Druckkurven des der Fig. 2 zugrunde liegenden Versuchs biegen während des Endes der Diastole viel mehr in die horizontale Richtung ab als bei Fig. 1. Daher kommt es, dass die Arbeitsdiagramme schliesslich fast vollkommen isotonisch verlaufen. Offenbar nähern sich also diese Diagramme mehr der Dehnungskurve des ruhenden Herzmuskels. Dass diese Dehnungskurve die Tendenz hat, langsam von der Abszisse aufzusteigen, geht vor allem daraus hervor, dass der diastolische Minimaldruck mit wachsendem Schlagvolumen merkbar, wenn auch nur um geringe Beträge ansteigt¹⁾.

Von Interesse ist es, zu erfahren, in welchem Verhältnis die vom Ventrikel mit wachsendem Schlagvolumen zu bewältigende Arbeit wächst. Da die Kurven im selben Maassstab gezeichnet sind, sind die Werte unter sich vergleichbar, wenn auch nicht in absolutem Maass ausdrückbar. Die Schlagvolumina der Kurven 1—5 wachsen im Verhältnis von 1:2,22:2,88:3,28:4,00. Die von den Kurven umschlossenen Flächen, die das Maass der geleisteten potentiellen Energie darstellen, wachsen gleichzeitig im Verhältnis 1:2,64:3,60:4,14:5,06,

also viel rascher. Das vierfache Schlagvolumen verlangt die mehr als fünffache potentielle Energie. Auch die kinetische Energie des ausströmenden Blutes wächst rascher als die ausgeworfenen Blutmengen.

Fig. 2. Kurvenschar von Arbeitsdiagrammen bei gleichem Widerstand und wechselndem Schlagvolumen.

1) H. Straub, Dynamik des Säugetierherzens. I. Deutsches Arch. f. klin. Med. Bd. 115 S. 531. 1894. — H. Straub, Über den kleinen Kreislauf. Deutsch. Arch. f. klin. Med. Bd. 121 S. 394. 1917.

Ihr Ausdruck ist $\Sigma \frac{dmv_1^2}{2}$. In dieser Summation wächst die Masse m proportional dem Schlagvolumen. Gleichzeitig wächst aber, wie das Tachogramm lehrt, auch die Geschwindigkeit v sehr beträchtlich, da ja der Querschnitt der Ausflussöffnung derselbe bleibt. Dass die erforderliche potentielle Energie schneller wächst als die Schlagvolumina, rührt davon her, dass die Austreibungszeit nicht isotonisch verläuft. Je mehr sie sich von isotonischen Arbeitsbedingungen entfernt, desto rascher wächst die erforderliche potentielle Energie. Die Abweichung von der isotonischen Arbeitsleistung hängt im wesentlichen von der Kapazität, das heisst der Dehnungskurve der Gefässe ab. Je weniger nachgiebig diese sind, desto rascher muss die Arbeit bei zunehmendem Schlagvolumen wachsen. Diese Feststellung ist von Interesse für die Dynamik des linken Ventrikels bei Arteriosklerose.

Der Einfluss des Widerstandes auf das Arbeitsdiagramm.

Arbeitsdiagramme bei verschiedenen Widerständen liessen sich konstruieren auf Grund der Druck- und Volumkurven der Fig. 4 der Tachogrammarbeit¹⁾. Die Unkenntnis bezüglich der Integrationskonstanten macht sich bei dieser Konstruktion insofern störend bemerkbar, als die verschiedenen Arbeitsdiagramme parallel der Volumachse beliebig verschoben werden können. Die so sehr wünschenswerte Konstruktion von Dehnungskurven der Maxima und Minima gelingt auf diesem Wege deshalb nicht. Doch ist auch der Vergleich der Arbeitsflächen an sich von Interesse. In Fig. 3 sind die Arbeitsflächen angegeben, die den Kurven 1, 3, 4 und 5 der genannten Fig. 4 der früheren Arbeit entsprechen. Die Kurve 2 blieb wegen der bestehenden Mitralinsuffizienz unberücksichtigt.

Der auf der rechten Seite der Diagramme ansteigende Anteil der Anspannungszeit weist besonders bei der höchsten Kurve sehr deutlich eine doppelte Schwingung auf, die das Widerspiel der an den Atrioventrikularklappen während der Anspannungszeit wirksamen Kräfte besonders hübsch illustriert. Die Eigenschwingungen der Austreibungszeit sind nur bei der kleinsten Kurve 1 undeutlich, bei allen anderen ausgesprochen. Der Beginn der Füllung zeichnet sich bei Kurve 1 durch eine sehr allmähliche Entfernung von der iso-

¹⁾ H. Straub, Das Tachogramm der Herzkammerbasis. Deutsches Arch. f. klin. Med. Bd. 118 S. 214. 1915.

metrischen Verlaufsrichtung aus. Wissen wir doch, dass bei geringem arteriellem Widerstand der Vorhofdruck sehr niedrig ist. Desto mehr macht sich in dieser Kurve die Wirkung der Vorhofsystole geltend, die sogar zu einem deutlichen Ansteigen des Kammerdruckes in späten Phasen der Füllungszeit führt. In den Kurven 3, 4 und 5

Fig. 3. Kurvenschar von Arbeitsdiagrammen bei steigendem Widerstand.

tritt die Wirkung der Kammerstauungswelle hervor in einer immer ausgesprocheneren Knickung des Diagramms aus der isometrischen Verlaufsrichtung heraus. In Kurve 4 und 5 entstehen dadurch fast winklige Einbiegungen am Anfang und Ende der Kammerstauungswelle. Die Vorhofsystole macht sich in allen Kurven durch eine zweite Eindellung mehr oder weniger deutlich erkennbar. Ent-

sprechend der Verbreiterung der Druckkurven mit wachsendem Widerstand ist der Kontraktionsrückstand bei den Kurven 3—5 am Ende der Diastole noch ein sehr erheblicher, die Arbeitsdiagramme sind noch weit entfernt von einem isotonischen, geschweige denn von einem der Dehnungskurve des ruhenden Muskels entsprechenden langsam ansteigenden Verlauf. Die Minima liegen also hoch über der Dehnungskurve des ruhenden Herzmuskels.

Der Einfluss des Widerstandes auf die zu leistende Arbeit ist im vorliegenden Versuch nicht ganz eindeutig bestimmbar, weil mit wachsendem Widerstand die Koronarzirkulation und damit das gesamte Schlagvolumen ziemlich stark gewachsen ist. Die kinetische Energie (III. Summand der Arbeitsgleichung) darf als einigermaassen unverändert angesprochen werden, da trotzdem weder die Masse, noch, nach Ausweis des Tachogramms, die Geschwindigkeit in der Aortenwurzel erheblich geändert wird. Die maximalen systolischen Druckwerte der vier Kurven sind 89, 158, 175 und 205 mm Hg., die Arbeitsflächen verhalten sich wie 1:2,51:3,22:4,27. Zieht man aber in Betracht, dass die Schlagvolumina sich verhalten wie 1:1,37:1,57:1,77, so wird man einen grossen Teil der Mehrarbeit durch die Vergrösserung der Schlagvolumina erklären müssen. Man kommt dann zu der Anschauung, dass die zu leistende Arbeit annähernd proportional den maximalen systolischen Druckwerten gewachsen ist, eher etwas langsamer als die Druckwerte. Den Grund lehrt uns Fig. 3. Die Integrale der Systole, das heisst die von dem systolischen Anteil des Arbeitsdiagramms, den dem maximalen und minimalen Volum zugehörigen Druckordinaten und der Abszisse begrenzten Flächen, wachsen ziemlich genau proportional den Druckmaxima. Von diesem Integral sind jedoch die mit negativem Vorzeichen versehenen Summanden der Arbeitsgleichung abzuziehen, welche die während der Diastole gegen den Ventrikel geleistete Arbeit repräsentieren. Die durch diese Arbeit dem Ventrikel zugeführte Energie wächst mit wachsendem Widerstand wegen der Erhöhung der Anfangsspannung. Ihr geometrischer Ausdruck ist die Fläche, die von dem diastolischen Anteil des Arbeitsdiagramms einerseits, den dem maximalen und minimalen Volum zugehörigen Druckordinaten und der Abszisse andererseits begrenzt wird. Wenn also die Arbeit eher langsamer wächst als die Druckmaxima, so liegt dies daran, dass der Subtrahent eher etwas rascher wächst als die Druckwerte. Ob dies eintritt, hängt offenbar vom Verlauf der Dehnungskurven und vom Grade des Kon-

traktionsrückstandes ab. Vermehrter Kontraktionsrückstand durch Verbreiterung der Druckkurve, die wir bei wachsendem Widerstand festgestellt haben; wird offenbar die Grösse des Subtrahenten in dem besprochenen Sinne beeinflussen.

Die hier verwendete geometrische Betrachtungsweise zeigt, wie gross der Fehler bei der üblichen Arbeitsberechnung des Herzens ist, bei der der mittlere Druck der Austreibungszeit mit dem Volum multipliziert wird. Diese Berechnung entspricht dem ersten Summanden der Arbeitsgleichung und lässt den Subtrahenten unberücksichtigt. Die so berechneten Arbeitswerte fallen für Kurve 1 um etwa 15%, für Kurve 3—5 um 17—18% zu hoch aus.

Über die Dehnungskurven der Maxima und Minima der Zuckung des Herzens im Kreislauf.

In den vorangehenden Kapiteln wurde ausgeführt, dass die Lagebeziehungen unserer, unter Verwendung der durch Integration des Tachogramms ermittelten Volumkurven, konstruierten Arbeitsdiagramme wegen Unkenntnis der Integrationskonstante unbekannt sei, weil bei der Darstellung der Volumkurven durch Integration der Tachogramme die Integrationskonstante sich um unbekannte Beträge ändere. Darum war es unmöglich, die Gesetze dieser Lagebeziehungen durch Darstellung der Dehnungskurven der Maxima und Minima zu erkennen. Die Schwierigkeit kann überwunden werden durch direkte Verzeichnung von Volumkurven. Leider steht uns bisher keine Methode zu Gebote, die die grossen und raschen Volumschwankungen eines Säugetierherzens zugleich mit den Druckschwankungen in technisch möglicher Weise zureichend genau verzeichnet. Die Seifenblasenmethode¹⁾ lässt sich sehr schwer bei gleichzeitiger Druckregistrierung anwenden, auch stört die Vergänglichkeit des Materials. Über die Lage ausgezeichneter Punkte verschiedener Arbeitsdiagramme im Druck-Volum-Koordinatensystem können wir uns jedoch eine annähernd richtige Vorstellung machen auf Grund von Kurven, die mit primitiverer Technik am Russkymographion verzeichnet wurden, wenn diese Kurven Angaben enthalten über den Druckablauf in der Aorta, über den Vorhofdruck und über die Volumschwankungen der Kammern. Da wir den Vor-

---

1) H. Straub, The diastolic filling of the mammalian heart. Journ. of Physiol. vol. 40 p. 378. 1910.

Fig. 4. Kurvenschar von Arbeitsdiagrammen bei steigendem Widerstand, 1—3 bei kräftigem Muskel, 4—7 nach Schädigung durch Extrasystolen. — Konstruktion von Dehnungskurven der Minima (oben, in zehnfach vergrössertem Maassstab der Druckkoordinaten) und der Maxima. — Beachte, dass durch Schädigung des Muskels die Dehnungskurve der Minima nicht beeinflusst, die der Maxima gesenkt wird.

hofdruck als einen annähernden Ausdruck des diastolischen Minimaldrucks der Kammer ansehen dürfen, kennen wir die Koordinaten folgender Punkte: des Beginns der Anspannungszeit (Koordinaten: diastolisches Volum und Vorhofdruck), des Beginns der Austreibungszeit (Koordinaten: diastolisches Volum und Aortenöffnungsdruck), des Druckmaximums unter der Annahme, dass um diese Zeit knapp die Hälfte des Schlagvolums ausgeworfen ist (Koordinaten: Mittellage des Volums zwischen Systole und Diastole, Aortendruckmaximum); schliesslich gibt das systolische Volum den Verlauf des isometrischen Stücks der Verschlusszeit.

Fig. 4 enthält eine Schar solcher in etwas roher Weise konstruierter Arbeitsdiagramme der linken Kammer bei konstantem Schlagvolumen und wechselnden Widerständen. Die Diagramme sind dargestellt auf Grund von Kurve 3 der Arbeit über den kleinen Kreislauf¹⁾. Bei der Konstruktion ist die Voraus-

1) H. Straub, Über den kleinen Kreislauf. Deutsch. Arch. f. klin. Med. Bd. 121 S. 394. 1917.

setzung gemacht, dass die verzeichneten Volumkurven, da sie das Volum beider Kammern enthalten, jedesmal der Ausdruck des doppelten Schlagvolums sind. Die Schlagvolumina einer Kammer wurden deshalb als die Hälfte der verzeichneten Volumschwankungen berechnet, da es sich ja jeweils um stationäre Kreislaufverhältnisse handelt. Die Vergrößerung des systolischen Rückstandes, die sich in Veränderungen des systolischen Volums ausdrückt, wurde dagegen ausschliesslich auf den linken Ventrikel bezogen, da wir wissen, dass durch Widerstandserhöhung in der Aorta die Dynamik des rechten Herzens nicht erkennbar beeinflusst wird. Diese Volumveränderungen wurden also in ihrem ganzen Betrag für den linken Ventrikel in Rechnung gesetzt. Die auf diesem Wege erhaltenen sieben Arbeitsdiagramme entsprechen sieben Abschnitten der Kurve 3 der früheren Arbeit. Diagramm 1 entspricht dem Abschnitt vor 1, Diagramm 2 = dem Abschnitt vor 2, Diagramm 3 = dem Abschnitt vor 3 usw., Diagramm 7 = dem Abschnitt nach 6. Es hatte sich gezeigt, dass die Kurvenabschnitte bis 3 bei tadellos arbeitendem, muskelkräftigem Herzen aufgeschrieben waren, dass aber bei 3 infolge von Auftreten mehrerer Extrasystolen die Muskelkraft dauernd beeinträchtigt wurde. Dementsprechend sind in Fig. 4 die mit durchgehenden Linien gezeichneten Diagramme 1—3 von muskelkräftigem, die punktierten Kurven 4—7 von einem in seiner Muskulatur geschädigten Herzen gewonnen.

Man erkennt aus der Kurvenschar der Fig. 4, dass der Einfluss der Schädigung der Muskulatur im wesentlichen in einer Verschiebung des Arbeitsdiagramms parallel der Volumachse sich ausdrückt, dass also vom Ventrikel fast absolut identische Arbeit geleistet wird, nahezu ausschliesslich unter Verschiebung der Volumeinstellung. Man vergleiche zu diesem Zweck die Diagramme 1 und 7. Betrachten wir nun den Verlauf der Dehnungskurven der Maxima und Minima.

Die Dehnungskurve der Minima ist eine Kurve, die durch die dem Beginn der Anspannungszeit entsprechenden Punkte der Kurvenschar gelegt wird. Im Vorangehenden wurde ausgeführt, dass diese Dehnungskurve der Minima der Zuckung des Herzens im Kreislauf mit der Dehnungskurve des ruhenden Herzmuskels nicht zusammenfällt, wenn am Ende der Diastole noch ein Kontraktionsrückstand besteht. Da die Druckangaben der in die Vorhöfe eingebundenen Wassermanometer zur Konstruktion der Fig. 4 in Millimeter Quecksilber umgerechnet werden mussten, kommt der Verlauf der Dehnungs-

kurve bei dem gewählten Maassstab nicht sehr deutlich zum Ausdruck. Am oberen Rande der Fig. 4 ist deshalb die Dehnungskurve der Minima bei zehnfach grösserem Maassstab der Druckordinaten wiedergegeben, wodurch die Beziehungen eindeutiger sichtbar werden. Man erkennt, dass die Dehnungskurve der Minima der Zuckung des Säugetierherzens im Kreislauf denselben Verlauf hat, den Frank als charakteristisch für die Dehnungskurve der Minima der Zuckung des Froschherzens festgestellt hat¹⁾. Die Dehnungskurve nimmt einen von der Abszisse zuerst sehr langsam, allmählich immer steiler ansteigenden Verlauf. Für die Beurteilung der Dynamik des in seiner Muskelkraft geschädigten Herzens ist es nun von grösster Bedeutung, dass die Punkte der Minima nach eingetretener Schädigung (Punkt 4—7) vollkommen genau auf derselben Dehnungskurve liegen wie die bei guter Muskelkraft bestimmten Punkte 1—3. Die Ermüdung ist also jedenfalls in dem vorliegenden Versuch ohne jeden Einfluss auf den Grad der Dehnbarkeit während der Diastole. Die Dilatation des muskelschwachen Herzens ist also nicht zu beziehen auf vermehrte Dehnbarkeit des diastolischen Herzens. Die geometrisch fassbare Definition des so vielfach missbrauchten Wortes Tonus ist die Dehnungskurve des ruhenden Herzmuskels [Frank²⁾]. Zwar darf aus Änderungen der Dehnungskurve der Minima des tätigen Herzens wegen der Veränderlichkeit des Kontraktionsrückstandes nicht auf entsprechende Änderung der Dehnungskurve des ruhenden Herzens geschlossen werden. Konstanz der Minima des tätigen Herzens weist aber mit grosser Wahrscheinlichkeit auf Gleichbleiben der Dehnungskurve des ruhenden Herzens hin. Muskelschwäche des Säugetierherzens lässt nach dem Gesagten den Tonus des Herzens in dem eben definierten Sinne unbeeinflusst. Socin³⁾ war auf Grund seiner Versuche zu der Ansicht gekommen, dass bei Schädigung des Herzmuskels durch Chloroform eine vermehrte Dehnbarkeit des Herzens nicht auftrete; doch bemerkt er, dass bei der gewählten Versuchs-

---

1) O. Frank, Die Wirkung von Digitalis (Helleborein) auf das Herz. Sitzungsber. d. Gesellsch. f. Morphol. u. Physiol. in München H. 2 S. 14. 1897. — O. Frank, Die Grundform des arteriellen Pulses. Zeitschr. f. Biol. Bd. 37 S. 483. 1899.

2) O. Frank, Die Wirkung von Digitalis (Helleborein) auf das Herz. Sitzungsber. d. Gesellsch. f. Morphol. u. Physiol. in München H. 2 S. 14. 1897.

3) Ch. Socin, Experimentelle Untersuchungen über akute Herzschwäche. Pflüger's Arch. Bd. 160 S. 132. 1914.

anordnung der direkte Nachweis einer primären Veränderung der Diastole nicht geführt werden kann. Der direkte Beweis der Richtigkeit für Socin's Annahme ist in Fig. 4 zum ersten Male erbracht. Für das Froschherz kam Bruns¹⁾ zu entgegengesetzten Ergebnissen, da er nach langdauernder isometrischer Arbeit beträchtliche Vermehrung der diastolischen Dehnbarkeit feststellte. Die von Bruns an das Herz gestellten Anforderungen gehen freilich weit über das hinaus, was im vorliegenden Versuch dem Säugetierherz zugemutet wurde, wohl auch über die in der menschlichen Pathologie in Betracht kommenden Anforderungen. Man wird deshalb gut daran tun, sich auch in der menschlichen Pathologie an die hier für das Säugetierherz gemachten Feststellungen zu halten.

Als Dehnungskurve der Maxima ist in Fig. 4 eine Kurve eingezeichnet, welche die dem Druckmaximum entsprechenden Punkte verbindet. Man sieht, dass die Arbeitsdiagramme diese Kurve überschneiden und sich dem vermutlichen Verlauf der Dehnungskurve der Maxima der isometrischen Zuckung nähern, welche nahe benachbart der Mantelkurve der Arbeitsdiagramme zu denken ist²⁾. Die Dehnungskurve der Maxima der Zuckung im Kreislauf verläuft nach der Abszisse konkav. Die der Abszisse benachbarten Punkte sind bei unserer Versuchsanordnung nicht zu bestimmen, weil bei starker Senkung des arteriellen Drucks der Blutumlauf durch die Kranzgefäße ungenügend und dadurch der Herzmuskel geschädigt wird. Der Nullpunkt der Volumachse, d. h. der Punkt vollständiger Entleerung während der Systole, ist zwar unbekannt, doch kann er nicht weiter rechts liegen, als in Fig. 4 angenommen. Die Richtung der Dehnungskurven der Maxima scheint die Abszisse rechts von dem angenommenen Nullpunkt zu schneiden. Das ist an sich selbstverständlich, da mit dem Druckmaximum die Entleerung noch nicht vollendet ist.

Die konstante Wirkung der Schädigung des Muskels ist nun eine Verschiebung der Dehnungskurve der Maxima nach unten, d. h. eine Schädigung der Kontraktionskraft. Man vergleiche zum Beispiel die Maxima der Diagramme 2 und 6, die von fast identischen Anfangsbedingungen ausgehen. Obgleich die Anfangsbedingungen noch etwas

1) O. Bruns, Experimentelle Untersuchungen über die Phänomene der Herzschwäche infolge von Überanstrengung. Deutsches Arch. f. klin. Med. Bd. 113 S. 179. 1913.

2) H. Straub, Zur Dynamik der Klappenfehler des linken Herzens. Deutsches Arch. f. klin. Med. Bd. 121. 1917.

Pflüger's Archiv für Physiologie. Bd. 169.

zugunsten des Diagramms 6 gestaltet sind (etwas grössere Anfangsfüllung und -spannung), liegt doch das Maximum von 6 um 18 mm Quecksilber tiefer als das von 2. Als einzig rationellen objektiven Maassstab der Schädigung der Kontraktionskraft möchte ich deshalb zwei Möglichkeiten vorschlagen: entweder die Senkung des Druckmaximums bei gleichen Anfangsbedingungen oder, wegen leichter Bestimmbarkeit, die Änderung der Anfangsbedingungen bei gleichem systolischen Maximum. Nach dem ersten Maassstab würde man, um ein Beispiel zu wählen, die Lagebeziehungen der Punkte 2 und 6 der Dehnungskurven der Maxima bestimmen, nach dem zweiten Maassstab die der Punkte 1 und 7 der Dehnungskurven der Minima.

Zusammenfassung.

Eine vollständige Darstellung der Arbeitsbedingungen des Säugerherzens gibt das Arbeitsdiagramm, das den Druck als Funktion des Volums darstellt. Das Arbeitsdiagramm kann auf Grund der mit zureichenden Mitteln verzeichneten Druckkurve und der durch Integration des „Tachogramms der Herzkammerbasis“ gewonnenen Volumkurve nach dem Verfahren der deskriptiven Geometrie konstruiert werden.

Da die Volumkurven der beiden Kammern nicht getrennt verzeichnet werden können, ist die Konstruktion eines Arbeitsdiagramms nur zulässig unter stationären Kreislaufverhältnissen, unter der annähernd zutreffenden Voraussetzung, dass dann die Volumkurven der beiden Kammern identisch sind.

Das Arbeitsdiagramm weist nahezu isometrische Strecken auf, die der Anspannungs- und der Verschlusszeit entsprechen. Beide werden mit grosser Geschwindigkeit durchlaufen. Die Austreibungszeit verläuft zur Abszisse konkav, gleich weit entfernt von isometrischen und isotonischen Arbeitsbedingungen. Die Füllungszeit verläuft zur Abszisse konvex, nur gegen Schluss sich isotonischen Bedingungen annähernd.

Die Anspannungszeit weicht von streng isometrischen Arbeitsbedingungen etwas ab durch das Spiel der Atrioventrikularklappen unter Wirkung des Kammerdrucks, des Zugs der Papillarmuskeln und der Verengerung des Ansatzrings an der Vorhofkammergrenze.

Auf die Kurve der Austreibungszeit sind Eigenschwingungen der trägen, in Bewegung gesetzten Blutmassen aufgesetzt.

Dauer der Systole und Dauer der Kontraktion fallen nicht zu-

sammen. Vielmehr überdauert die Kontraktion regelmässig die Systole. Selbst am Ende der Diastole ist häufig noch ein Kontraktionsrückstand vorhanden.

Während der Füllungszeit wird das Arbeitsdiagramm mit geringer und immer mehr sinkender Geschwindigkeit durchlaufen.

Das Arbeitsdiagramm ist ein vollkommener Ausdruck der Änderungen der potentiellen Energie des Ventrikels während einer Herzrevolution. Die vom Herzen geleistete Arbeit, soweit durch dieselbe potentielle Energie geschaffen wird, ist dargestellt durch das Integral des Arbeitsdiagramms, d. h. die vom Arbeitsdiagramm umgrenzte Fläche.

Während der Diastole wird entgegen dem nur allmählich erschlaffenden Ventrikel Arbeit geleistet. Der erhebliche Mehraufwand an Arbeit, die auf diesem Wege geleistet werden muss gegenüber der Arbeit gegen den völlig erschlafften Ventrikel (ungefähr Verdoppelung des erforderlichen Arbeitsminimums), dient dazu, die Füllung in kurzer Zeit zu ermöglichen.

Wegen des am Ende der Diastole häufig noch bestehenden Kontraktionsrückstandes fällt die Dehnungskurve der Minima der Zuckung des Säugetierherzens im Kreislauf nicht mit der Dehnungskurve des ruhenden Herzens zusammen. Auf die Bedeutung dieser Tatsache für die Bestimmung des Tonus der Herzmuskulatur wird hingewiesen.

Das Bestehen eines Kontraktionsrückstandes beeinflusst auch den Verlauf der nächsten Systole. Von inotropen Wirkungen eines Eingriffs zu sprechen, ist erst zulässig, wenn der Einfluss desselben auf den Kontraktionsrückstand untersucht ist.

Die Erklärung der T-Zacke des Elektrokardiogramms als Ausdruck der Kontraktion kann nicht zutreffen. Sie gründet sich auf das angebliche zeitliche Zusammenfallen des Endes der T-Zacke mit dem Ende der Systole und beruht auf einer Verwechslung von Systole und Kontraktion.

Das beschränkte Fassungsvermögen des arteriellen Teiles der Blutbahn setzt bei sehr grossem Schlagvolumen dem Ausfluss des Blutes einen im Verlauf der Systole zunehmenden Widerstand entgegen.

Wegen des vom isotonischen weit entfernten Verlaufs der Austreibungszeit des Arbeitsdiagramms wächst mit zunehmendem Schlagvolumen die Arbeit rascher als die zu fördernde Blutmenge. Das Verhältnis wird um so ungünstiger, je starrwandiger die Gefässe sind.

Bei wachsendem Widerstand wächst die Arbeit annähernd proportional dem Widerstand, eher sogar etwas langsamer als dieser.

Die Berechnung der Ventrikelarbeit als Produkt des Schlagvolums mit dem mittleren Druck der Austreibungszeit gibt wesentlich zu hohe Werte, weil die während der Diastole dem Ventrikel erhaltene und zugeführte Energie abzuziehen ist.

Die Dehnungskurve der Minima des Herzens im Kreislauf stellt eine bogenförmig von der Abszisse erst langsam, dann immer steiler ansteigende Kurve dar.

Die Dehnungskurve der Minima des (durch Extrasystolen) geschädigten Herzmuskels fällt mit der des kräftigen zusammen. Schädigung in dieser Form führt also nicht zu einem Nachlass des „Tonus“.

Die konstante Wirkung der Schädigung des Herzmuskels ist eine Senkung der Dehnungskurve der Maxima.

Einen objektiven Maassstab der Schädigung der Kontraktionskraft des Herzmuskels gibt entweder die Senkung des Druckmaximums bei gleichen Anfangsbedingungen oder die Änderung der Anfangsbedingungen bei gleichem systolischem Maximum.

Herr Professor Otto Cohnheim aus Hamburg hat uns um Aufnahme folgender Mitteilung gebeten:

„Professor **Otto Cohnheim**, Vorsteher des physiologischen Institutes am Krankenhaus Hamburg-Eppendorf, wird künftig den Familiennamen **Kestner** führen.“

Bonn, 30. November 1917.

Die Redaktion.