

Hämodynamische Messmethoden in der klinischen Kardiologie

Autor(en): **Lüthy, E. / Scheu, H.D. / Veragut, U.P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin der Schweizerischen Akademie der Medizinischen Wissenschaften = Bulletin de l'Académie Suisse des Sciences Medicales = Bollettino dell' Accademia Svizzera delle Scienze Mediche**

Band (Jahr): **21 (1965)**

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-307617>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Aus den kardiovaskulären Laboratorien (Leitung: Prof. Dr. E. Lüthy)
der Medizinischen Poliklinik (Direktor: Prof. Dr. R. Hegglin) der Universität Zürich

Hämodynamische Meßmethoden in der klinischen Kardiologie

Von E. Lüthy, H. D. Scheu, U. P. Veragut, H. P. Krayenbühl
und M. Gander

O. Frank [1] und später H. Straub [2] wiesen um die letzte Jahrhundertwende am Papillarmuskel bzw. am isolierten Herzen Gesetzmäßigkeiten in der Kontraktion nach, welche für das physiologische und klinische Denken und Suchen wegweisend waren. Sie zeigten an sogenannten Arbeitsdiagrammen, daß das enddiastolische Kammervolumen, d. h. die diastolische Faserlänge, in einer bestimmten Beziehung zur systolischen Druckentwicklung und zur Schlagvolumenförderung steht (Abb. 1). Diese Gesetzmäßigkeiten, welche als *Starlingsche* Gesetze [3, 4] bekannt sind, schienen dem Kliniker sowohl diagnostisch als auch pathophysiologisch bedeutsam zu sein, wobei das Erkennen und Verstehen der Herzinsuffizienz im Vordergrund stand. Um aber den einzelnen dazu benötig-

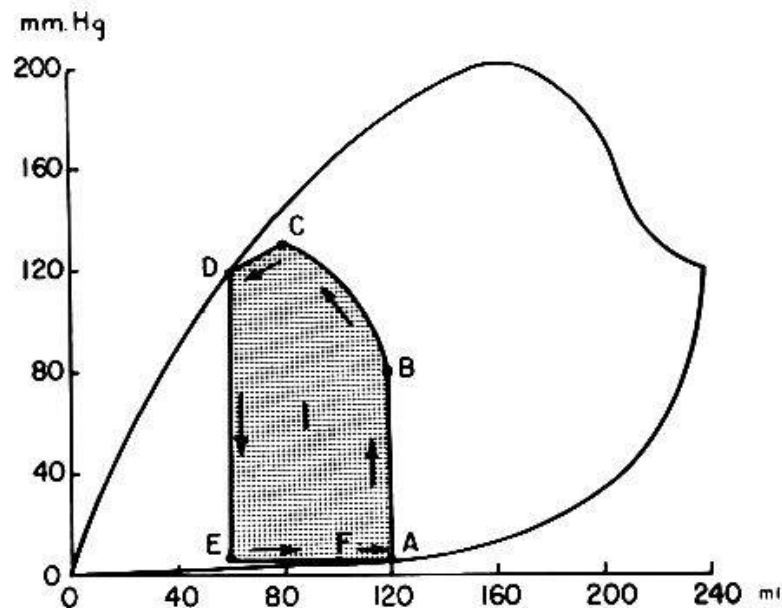


Abb. 1. Arbeitsdiagramm eines linken Ventrikels. A-B = isovolumetrische Kontraktion, B-D = «isobarische» Kontraktion, D-E = isovolumetrische Dilatation, E-A = «isobarische» Dilatation.

ten Meßgrößen am Menschen nachgehen zu können, mußten zuerst die entsprechenden Methoden entwickelt werden. Erst die routinemäßige Einführung des Herzkatheterismus durch *Cournand* vor etwa 30 Jahren eröffnete die Möglichkeit, am geschlossenen Thorax intrakardiale und intravasale Messungen durchzuführen.

Welche Meßmöglichkeiten, die am Menschen bei geschlossenem Thorax ohne Narkose verwendet werden können, stehen heute zur Verfügung, und wie ist ihre methodische Genauigkeit?

A. Ältere, allgemein gebräuchliche Meßmethoden

1. Das Herzminuten-(zeit-)volumen bzw. Schlagvolumen

Zur Messung des Herzminutenvolumens wird dem zirkulierenden Blut ein Indikator beigemischt, oder es wird ein dem Blute eigener Indikator verwendet. Dabei muß die Menge des zugeführten Indikators wie auch seine Konzentration im Blut leicht meßbar sein. Folgende Methoden haben sich eingebürgert:

a) Die Methode nach dem *Fickschen* Prinzip [5]: Als Indikator wird Sauerstoff verwendet. Der durch die Lungen aufgenommene Sauerstoff entspricht der meßbaren zugefügten Indikatormenge, während die durch den Indikator erhöhte arterielle Konzentration und die venöse Ausgangskonzentration die Sauerstoffdifferenz ergeben. Die Messungen erfolgen über 2–5 Minuten und repräsentieren somit gemittelte Größen. Auch das Schlagvolumen, welches sich daraus errechnen läßt, ist gemittelt. Ein Herzkatheterismus ist unumgänglich, da nur das venöse Mischblut aus der A. pulmonalis einen verbindlichen venösen Sauerstoffwert ergibt. Rasche Veränderungen des Minuten- bzw. Schlagvolumens werden nicht erfaßt. Die methodische Fehlerbreite liegt bei etwa $\pm 15\%$, wobei bei Erwachsenen in Ruhe kleine Minutenvolumen genauer als große gemessen werden können.

b) Die sogenannten Indikatormethoden [6]: Als Indikatoren werden vorwiegend Farbstoffe, Kälte, radioaktive Substanzen, Gase und Kontrastmittel verwendet. Sie können teilweise peripher venös injiziert und peripher arteriell gemessen werden, wodurch ein Katheterismus sich erübrigt. Zusätzlich besteht aber auch die Möglichkeit, dieselben intrakardial, d. h. zentral zu injizieren und zu messen. Die Meßdauer, d. h. der zeitliche Ablauf einer Verdünnungskurve beträgt bei peripherer Anwendung etwa 20–60 sec, während bei intrakardialer Anwendung nur 5–20 sec benötigt werden. Die aus diesen Verdünnungskurven errechneten Minuten- oder Schlagvolumen sind daher nur über kurze Zeiträume

gemittelte Größen und somit nicht direkt vergleichbar mit den *Fickschen* Werten. Kälte als Indikator hat sich bei zentraler Anwendung besonders bewährt, da wegen der fehlenden Toxizität des Indikators (physiologische Kochsalzlösung) fast unbegrenzte Wiederholungen möglich sind und da wegen einer fast vollständig fehlenden Rezirkulation der Kälte eine rasche Folge der Messungen gegeben wird. Die Genauigkeit dieser Methoden entspricht ungefähr derjenigen der *Fickschen* Technik, und die Streuung beträgt etwa $\pm 15\%$. Dabei werden große Minutenvolumen genauer gemessen als kleine, und zwar besonders dann, wenn die kleinen mit einer Herzinsuffizienz einhergehen.

2. Die Messung intrakardialer Druckabläufe

Ein Katheter wird über arterielle oder venöse periphere Gefäße in die zu messende Kammer vorgeschoben. Die äußere Öffnung des Katheters ist mit dem Meßinstrument verbunden. Quecksilber- oder Wassersäulen sind durch die großen Volumenverschiebungen, welche zur Messung mit Hilfe dieses dünnen Kathetersystems benötigt werden, zu träge. Sie erlauben nur Messungen eines Mitteldruckes. Mit Hilfe hochelastischer Membranmeßköpfe könnte die im System benötigte Volumenverschiebung so stark vermindert werden, daß die in der spätern Diastole und Systole gemessenen Drucke den wirklichen entsprechen. Die druckbedingte Membranbewegung wird durch elektrische Meßgeräte registriert («strain gauges», induktive, kapazitive Meßköpfe).

Das Hauptproblem der Druckmessung in bezug auf Absolutwerte stellt die Wahl des Nullpunktes in einem räumlich geordneten Kreislaufsystem dar, welches außerdem noch einem unbekanntem transmuralen Druck ausgesetzt ist. Besonders die diastolischen Drucke erfahren dadurch Ungenauigkeiten von $\pm 2-3$ mm Hg, was für den rechten Ventrikel einer Unsicherheit von 50% und mehr und für den linken von 30 bis 40% entspricht.

3. Das enddiastolische Kammervolumen

Das enddiastolische Kammervolumen wird erst seit wenigen Jahren mit Hilfe von intrakardialen Indikatormethoden bestimmt, wobei die Genauigkeit dieser Meßgrößen noch unbekannt ist. Werden Indikatoren in eine Kammer injiziert, so treten in den Verdünnungskurven, welche im Gefäß, das die Kammer verläßt, gemessen werden, pulssynchrone Konzentrationsstufen auf, mit deren Größe bei Kenntnis des Schlagvolumens rechnerisch das enddiastolische bzw. endsystolische Kammervolumen erhalten wird (*Holt* [7]). Wird der Indikator aber rasch mit Hilfe einer Düse in einer Diastole in die Kammer injiziert, so ist die erste Konzen-

trationsstufe repräsentativ für die diastolische Blutmenge, welche sich in der Kammer befand (Lüthy [8]). Diese beiden Berechnungs- und Meßarten ergeben weitgehend gleiche Größen.

Aus diesen Angaben geht hervor, daß es seit einigen Jahren gelingt, sämtliche Größen, welche zur Rekonstruktion der Gesetzmäßigkeiten der *Frank-Straubschen* Arbeitsdiagramme benötigt werden, auch am Menschen zu messen. Daß nun aber die einzelnen Meßgrößen und auch deren Korrelationen nicht den erhofften Beziehungen und Prinzipien entsprachen, ging schon aus den Ausführungen meines Vorredners, Prof. *Hegglin*, hervor. Die in bezug auf die Herzinsuffizienz beste Korrelation dieser einfachen Meßgrößen scheint in der Beziehung zwischen enddiastolischem Kammervolumen und der Compliance, d. h. der elastischen Dehnbarkeit des Herzmuskels zu liegen, wie sie in Abb. 2 dargestellt ist.

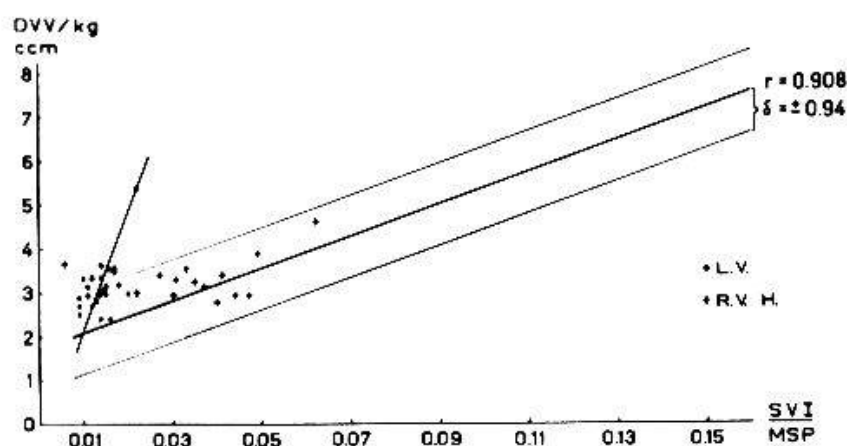


Abb. 2. Korrelation zwischen enddiastolischem Kammervolumen (DVVI) und Compliance (SVI/MSP) beim Menschen. SVI = Schlagvolumenindex, MSP = mittlerer systolischer Druckanstieg. Korrelationslinie r = Beziehung zwischen normalen und volumenbelasteten rechten Ventrikeln in Suffizienz. +RV.H = rechtsventrikuläre Hypertonie bei suffizientem Myokard. • = normale linke Ventrikel (Gerade entspricht derjenigen linker Kammern beim Hund).

In dieser Abbildung fällt besonders auf, daß die Korrelationslinien des rechten und des linken Ventrikels unterschiedlich sind. Diese Verschiedenheit könnte mit der unterschiedlichen Wanddicke der Kammern in Beziehung stehen.

Wo nun könnte der Fehler liegen, welcher es verunmöglicht, in der Klinik entweder die *Starlingschen* Gesetze wiederzufinden oder entsprechende gültige neue Gesetze aufzudecken? Betrachten wir noch einmal die erste Abbildung mit dem Arbeitsdiagramm des Herzmuskels, so fällt auf, daß ein in zeitlich unterschiedlichen Intervallen ablaufender Vorgang ohne Berücksichtigung der Zeit wiedergegeben ist. Bei einem

dreidimensionalen Vorgang (Volumen, Druck, Zeit) werden nur zwei Dimensionen dargestellt. Daß aber gerade dem zeitlichen Ablauf der Leistung eines Herzmuskels besonderes Interesse gebührt, scheint einleuchtend zu sein.

Der sicher am einfachsten zu messende Zeitabschnitt einer Herzrevolution ist die elektromechanische Systolendauer, das Intervall vom Q im Ekg. zum phonokardiographischen II. Aortenton. Daß zwischen dieser Zeit und hämodynamischen Vorgängen Korrelationen vorliegen, zeigt Abb. 3, welche eine Beziehung $Q-II/F$ zu Compliance bei suffizien-

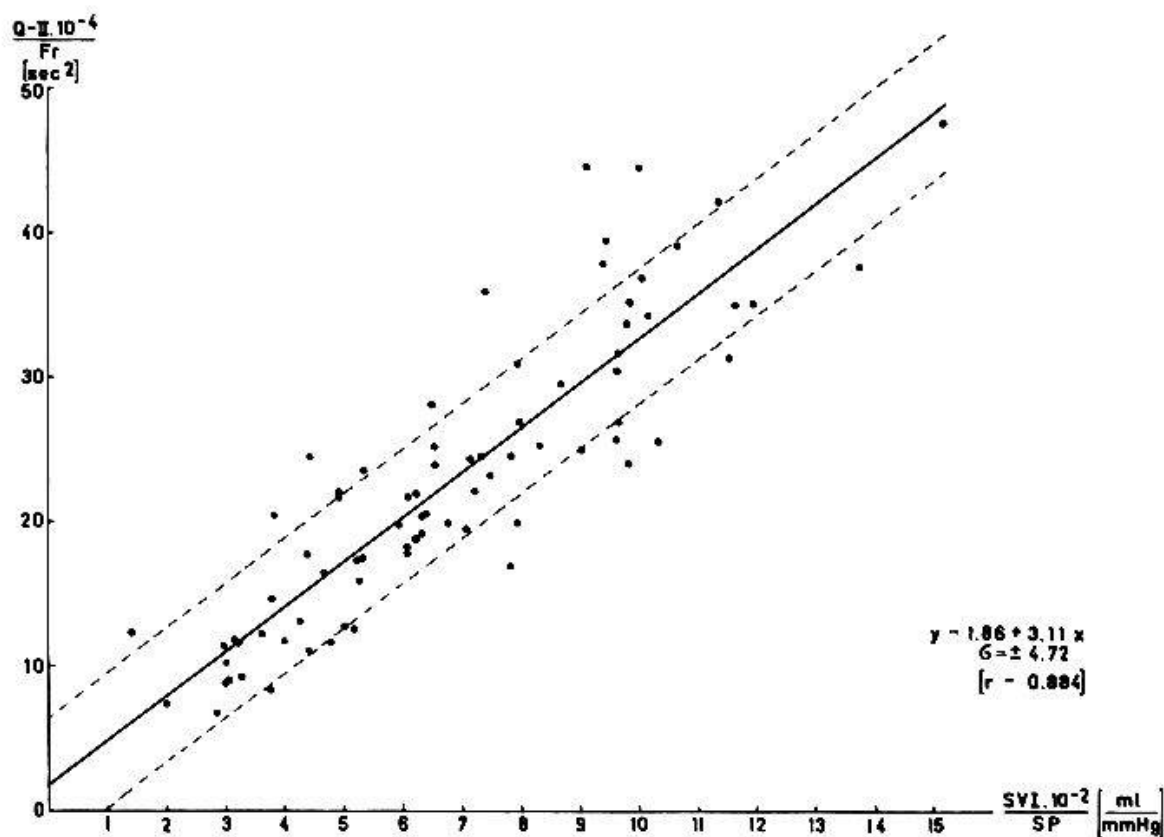


Abb. 3. Korrelation zwischen frequenznormierter Systolendauer ($Q-II/F$) und Compliance (SVI/SP) des suffizienten linken Ventrikels beim Menschen.

ten linken Herzen ergibt, während die Insuffizienten außerhalb dieser Beziehung liegen. Diese Korrelation soll nichts weiter wiedergeben als die Annahme, daß die zeitlichen Abläufe von nicht zu vernachlässigender Wichtigkeit sind.

Möchten wir nun das Arbeitsdiagramm des Herzens zeitgerecht registrieren, so muß es gelingen, die beiden isovolumetrischen Phasen des Kontraktionsablaufes frei von technischen Fehlern zu gewinnen und in der isobarischen Phase die Auswurfgeschwindigkeit des Blutes mit ihrem frühsystolischen Maximum zu erfassen. Die den zeitlichen Bedingungen gerecht werdenden Methoden sind teilweise aber erst in Entwicklung,

wobei ihre Anwendung am Menschen nur mit Vorbehalt durchzuführen ist. Es handelt sich dabei um folgende Meßtechniken:

B. Zukünftige, anzustrebende Meßmethoden

1. Zeitgerechte intrakardiale Druckmessung

Wie das Beispiel des Quecksilber- oder Wassermanometers als Säule zeigt, kann das Meßsystem starke Verfälschungen der effektiven Druckabläufe ergeben. Je enger, je länger und je dehnbarer das Verbindungsstück (Katheter) zwischen Meßort und Meßinstrument ist, desto mehr Zeit wird benötigt, um zwischen beiden Stellen einen Druckausgleich zu erhalten. Zugleich können Schwingungen in diesem Meßsystem auftreten. Viele kommerziell erhältliche externe Manometer haben eine sehr rasche Ansprechbarkeit, verlieren aber durch die engen verbindenden Katheter ihre Qualitäten (Abb. 4). Ein einziger, vielversprechender Weg blieb zur Verbesserung der Druckregistrierung offen, nämlich die Verkleinerung des Manometers selbst, so daß es auf die Katheterspitze aufgesetzt und in die Herzkammer selbst eingeführt werden kann. Dadurch wird, wie in Abb. 4 dargestellt ist, eine amplituden- und frequenzgerechte Druckschreibung bis zu 160 Hz erreicht. Diese Frequenzen dürften auch für extremste physiologische wie pharmakologische Bedingungen ausreichen.

Was nun verbessern wir wirklich durch eine solche intrakardiale Druckmessung? In Abb. 5 sind simultane Messungen mit intra- bzw.

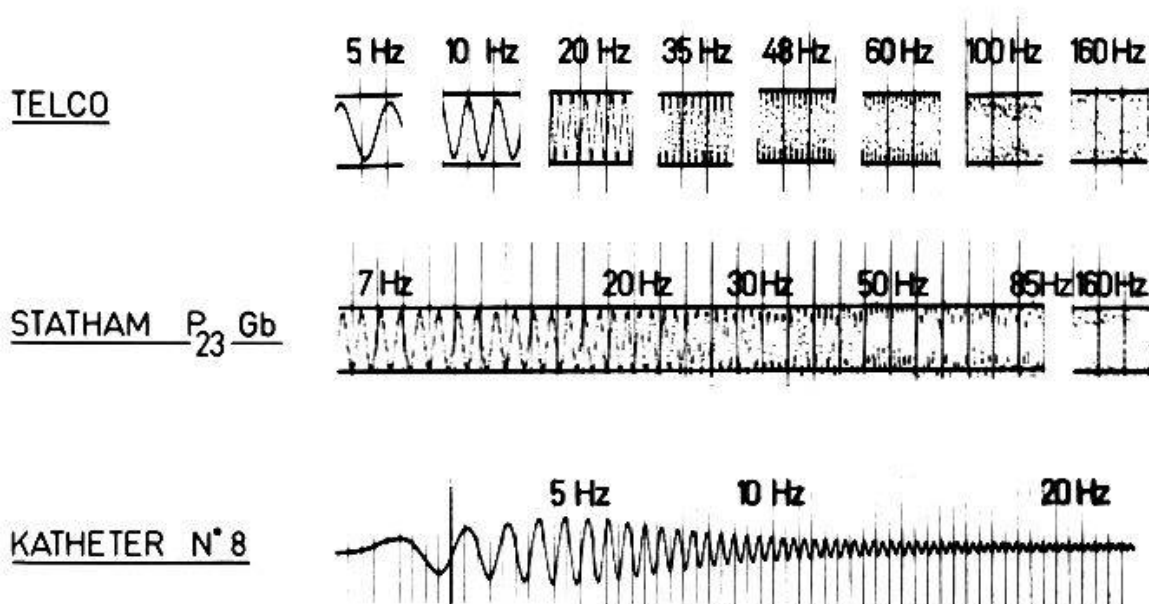


Abb. 4. Prüfung des Verhaltens der Amplitude in verschiedenen Frequenzbereichen des Telco-Mikromanometers für intrakardiale Druckmessung, des Satham-Manometers für extrakardiale Druckmessung ohne Verbindungskatheter und mit Katheter.



Abb. 5. Simultane intra- und extrakardiale Druckmessung des linken Ventrikels beim Hund. Rechts: alleinige intrakardiale Druckmessung mit dem Telco-Mikromanometer. Links: simultane intra- und extrakardiale Druckmessung.

extrakardialen Manometer wiedergegeben. Das externe Manometer gerät mit seinem ganzen Verbindungssystem zu Beginn der Kontraktion in Schwingung, wobei unternormale negative und übernormale positive Spitzen zu Beginn der Kontraktion auftreten. Erst in der isobarischen Spätphase der Kontraktion gleichen sich die Drucke an. Eine weitere negative Druckzacke folgt beim externen Manometer am Ende des systolischen Druckabfalls, wobei auch hier in der diastolischen Spätphase die beiden gemessenen Drucke identisch werden. Gerade zur Beurteilung der Druckanstiegsgeschwindigkeit aber benötigen wir die zeitgerechte isovolumetrische Druckanstiegsphase, in welcher beim externen Manometer durch die Überlagerung mit den Eigenschwingungen bedeutend schnellere Abläufe wiedergegeben werden, als sie der Wirklichkeit entsprechen. Der Nachteil der heute zur Verfügung stehenden intrakardialen Druckmanometer liegt in der ungenügend präzisen Eichung für Absolutdrucke und im erheblichen Nulliniendrift. Dieser Nachteil erfordert die Zuhilfenahme externer Manometer, mit welchen die diastolische und die systolische Endphase getreu wiedergegeben werden. Der intrakardiale Druckablauf, in seiner Größenordnung über den extern registrierten projiziert, läßt sich so mit genügender Genauigkeit eichen.

In Abb. 6 sind Meßgrößen aus dem intrakardial registrierten Druck wiedergegeben, welche wiederum nur zeigen sollen, daß in die Aussagekraft solcher Größen berechnete Hoffnungen gesetzt werden können. Leider ist die Kenntnis über diese Größen noch so bescheiden, daß kaum verbindliche und allgemeingültige Gesetze daraus abgeleitet werden können.

2. Zeitgerechte Messung des Schlagvolumens

Das Schlagvolumen wird vom Herzen nicht mit einer zeitlich konstanten Geschwindigkeit ausgeworfen, sondern analog zur Anstiegs-

geschwindigkeit des Druckes tritt zu Beginn der Auswurfphase eine rasch zunehmende Auswurfgeschwindigkeit auf, welche schon vor Erreichen des aortalen, systolischen Druckes wieder abnimmt. Solche Messungen werden seit einigen Jahren mit Hilfe elektromagnetischer «flow»-Meter am offenen und – nach operativer Implantation – auch am geschlossenen Thorax durchgeführt. Diese Methoden haben einen für die Klinik prohibitiven Nachteil, da ihre Anwendung an einen erheblichen chirurgischen Eingriff gebunden ist. Die Meßköpfe müssen nämlich ope-

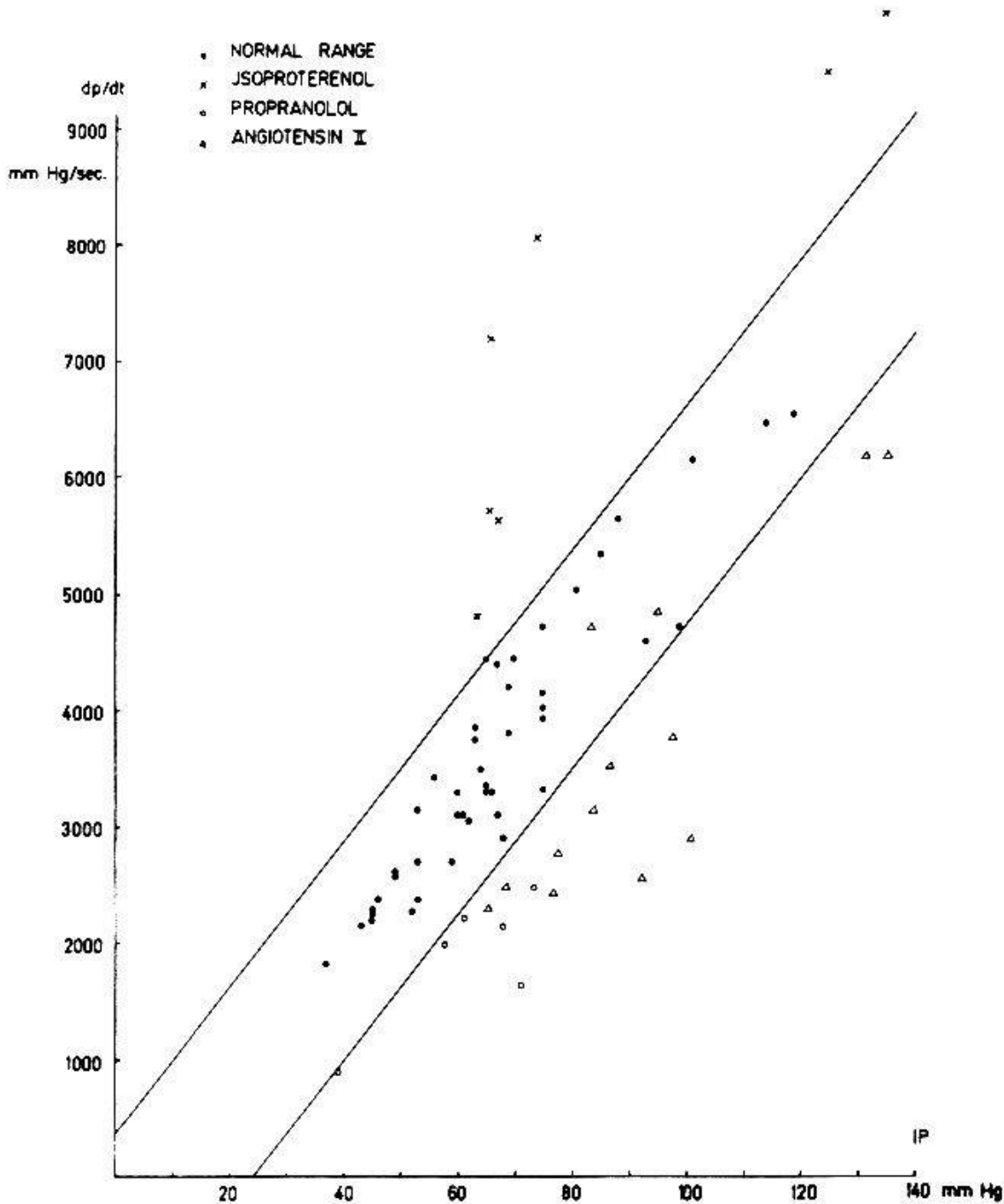


Abb. 6. Korrelation zwischen größter Steilheit des isovolumetrischen Druckanstieges (dp/dt) und der «instantaneous pressure» (IP) des linken Ventrikels beim Hund unter Blutvolumenveränderung («normal range») und pharmakologischer Beeinflussung.

rativ um die Aorta ascendens angelegt werden. Für die Klinik ergibt sich somit das Bedürfnis nach intravasal verwendbaren Meßköpfen, welche so nahe wie möglich an die Aortenklappen herangeführt werden können.

H. D. Scheu, ein Mitarbeiter unserer Gruppe, hat in Zusammenarbeit mit dem Institut für Hochfrequenztechnik der ETH (Prof. *F. Borgnis*) eine solche intravasale Sonde zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit entwickelt, die nach einem Ultraschallprinzip arbeitet. Leider ist diese Methode noch im Entwicklungsstadium und ihre Anwendung am Menschen wegen technischer Schwierigkeiten noch nicht möglich. Immerhin soll an Hand von Abb. 7 gezeigt werden, was unter einer zeitgerechten Messung der Strömung verstanden wird [10, 11].

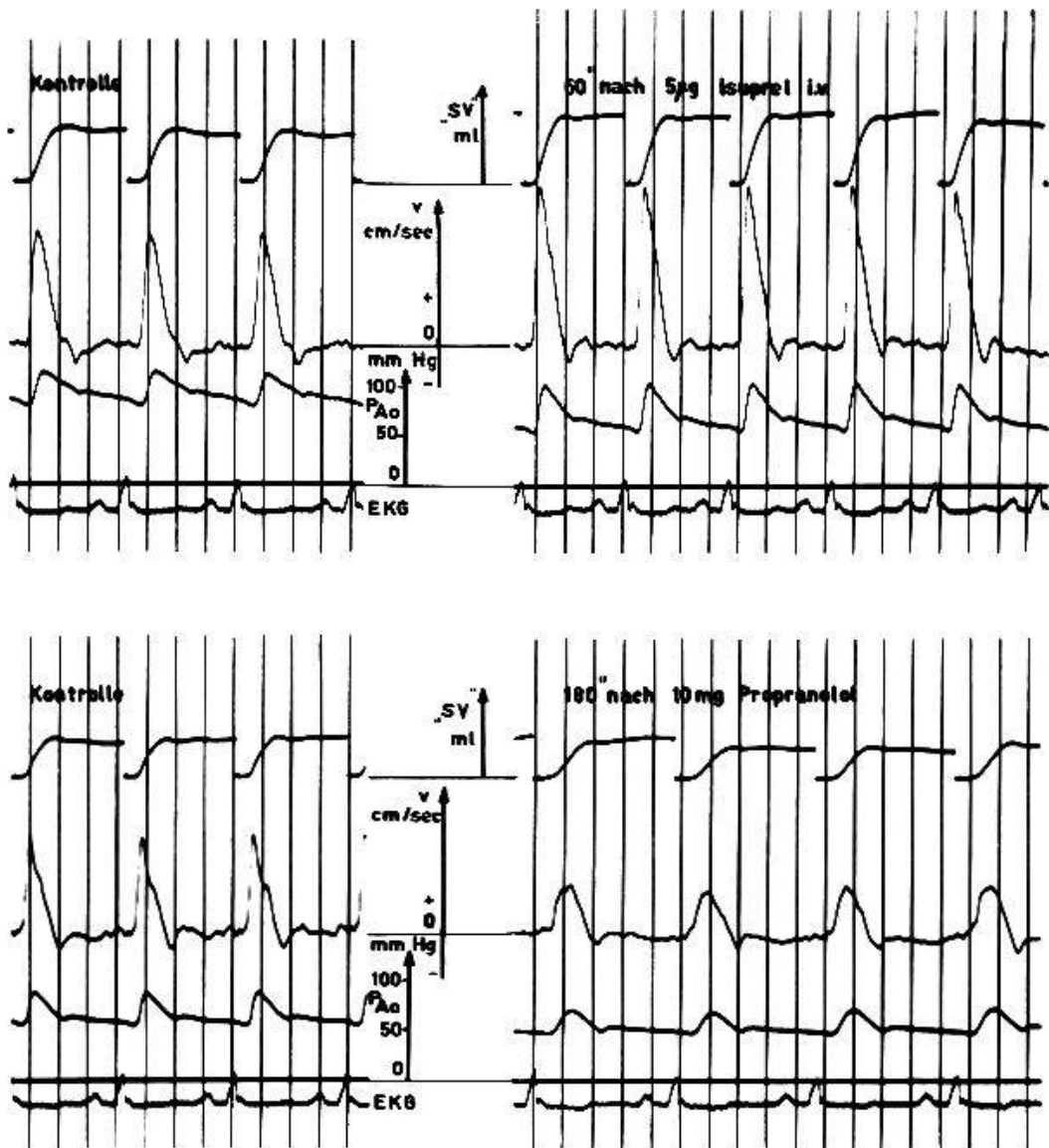


Abb. 7. Blutströmungsgeschwindigkeitsmessung (v) in der Aorta ascendens beim Hund mit Hilfe einer Überschallsonde unter pharmakologischer Beeinflussung. SV = Schlagvolumen elektronisch integriert aus der Strömungsgeschwindigkeit (v). PAo = Druck in der Aorta. EKG = Elektrokardiogramm.

3. Zeitgerechter diastolischer Einstrom

Nach den vorausgehend beschriebenen Erfolgen darf angenommen werden, daß in absehbarer Zeit das Arbeitsdiagramm einer Herzkammer druck-, volumen- und zeitgerecht gemessen werden kann. Dies trifft aber nur für die systolische Kontraktion zu, während die Volumenverhältnisse in Diastole der zeitlichen Registrierung noch nicht zugänglich sind. Die technischen Probleme, welche sich der zeitgerechten Messung des diastolischen Einstromes in den Weg stellen, sind außerordentlich kompliziert, weil die Ostien in jeder Phase der Herzevolution in ihrer Größe und Form verändert werden. Brauchbare Methoden stehen nach unseren Kenntnissen noch nicht zur Verfügung.

4. Messung der Herzmuskelmasse

Bei der Durchsicht der zur Verfügung stehenden Resultate modernster Meßtechniken fällt auf, daß der linke und der rechte Ventrikel unterschiedliche Beziehungen ergeben. Dabei sind das Schlagvolumen, die Systolendauer und die Dauer der Diastole beider Kammern identisch, während die Druckleistung und die anatomische Form unterschiedlich sind. Ein drucküberbelasteter rechter Ventrikel dagegen gleicht sich auch im Druckablauf und in der anatomischen Form dem linken an (Abb. 2). Daraus darf geschlossen werden, daß auch die Muskelmasse der einzelnen Kammer in die hämodynamischen Beziehungen eingeführt werden sollte. Eine vielversprechende Methode für die klinische Anwendung ist uns auch für diese Größe nicht bekannt.

Zusammenfassung

Es darf festgehalten werden, daß sämtliche der Routine zugänglichen Methoden zur Messung der Dynamik des Herzens vielversprechende Aussagen geben, daß aber ein allgemeingültiges Gesetz daraus nicht abgeleitet werden kann. Die Einführung neuer verbesserter Techniken, welche es erlauben, auch die zeitlichen Abläufe von Kontraktion und Dilatation zu messen, läßt die Erwartung zu, daß verbindlichere Gesetze gefunden werden. Daß trotz größter Anstrengungen in der Entwicklung der technischen Meßmöglichkeiten noch ungelöste Probleme übrig bleiben, welche wahrscheinlich zur gesamthaften Beurteilung der Dynamik notwendig sind, soll nur Ansporn zu vermehrter wissenschaftlicher Tätigkeit sein.

Résumé

Toutes les méthodes courantes pour mesurer le travail du cœur donnent des résultats très encourageants, mais ne nous permettent pas

d'en tirer des règles définies et généralement valables. L'introduction de nouvelles techniques plus perfectionnées, qui nous donnent la possibilité de suivre l'évolution dans le temps des contractions et des dilatations, permet d'espérer que l'on arrivera à trouver des lois définies de l'hémodynamique cardiaque. Le fait, que malgré d'immenses progrès dans les techniques de mesure il reste encore une foule de problèmes non résolus, qui probablement sont d'une importance capitale pour l'appréciation globale de la dynamique cardiaque, doit être un encouragement pour des recherches scientifiques encore plus approfondies.

Riassunto

In conclusione si può constatare che tutti i metodi pratici per misurare la dinamica del cuore danno risultati molto promettenti. D'altra parte però non se ne può dedurre una regola universalmente valida. L'introduzione di nuove tecniche perfezionate, le quali permettano di misurare anche i tempi di contrazione e dilatazione, lascia sperare che verranno trovate delle leggi più impegnative. Il fatto che, malgrado i grandissimi sforzi fatti nello sviluppo dei sistemi di misurazione tecnica, ancora rimangono dei problemi da risolvere necessari per l'interpretazione completa della dinamica, deve essere di incitamento ad una più grande attività scientifica.

Summary

All the methods which are available for routine measurements of the dynamic of the heart give promising information, but it is not possible to make one law of general validity out of them. The introduction of new, improved techniques which make it possible to measure also the time relations of contraction and dilatation, suggest that more general laws may soon be found. The fact that, inspite of the greatest efforts in the development of technical measurements, there are still unsolved problems which are probably necessary for the total evaluation of the dynamic, should only be a spur to further scientific activity.

1. *Frank O.*: Zur Dynamik des Herzmuskels. Z. Biol. 32, 370 (1895).
2. *Straub H.*: Das Arbeitsdiagramm des Säugetierherzens. Pflügers Arch. ges. Physiol. 169, 564 (1917).
3. *Starling E. H.*: Das Herz-Lungen-Präparat. Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden Bd. V/4, S. 829. Berlin 1929.
4. *Starling E. H.* und *Vischer M. B.*: The regulation of the energy output of the heart. J. Physiol. (Lond.) 62, 243 (1926/27).
5. *Fick A.*: Sitzungsber. physiol.-med. Ges. Würzburg 1870, S. 16.

6. *Hegglin R., Rutishauser W., Kaufmann G., Lüthy E. und Scheu H. D.:* Kreislaufdiagnostik mit der Farbstoffverdünnungsmethode. G. Thieme, Stuttgart 1962.
7. *Holt J. P.:* Estimation of the residual volume of the ventricle of the dog's heart by two indicator dilution technics. *Circulat. Res.* 4, 187 (1956).
8. *Lüthy E.:* Die Hämodynamik des suffizienten und insuffizienten rechten Herzens. *Bibliotheca Cardiologica Fasc. 11.* Karger, Basel/New York 1962.
9. *Veragut U. P. und Krayenbühl H. P.:* Estimation and qualification of myocardial contractility in the closed-chest dog. *Cardiologia (Basel)*, im Druck.
10. *Scheu H., Veragut U. P. und Sager O.:* Die Ultraschallsonde. *Helv. physiol. pharmacol. Acta* 22, 141 (1964).
11. *Scheu H., Sager O. und Veragut U.:* Eine neue Methode zur intravasalen Messung von Strömungsgeschwindigkeiten: die Ultraschallsonde. *Klin. Wschr.* 43, 608 (1965).