



---

# Praktikumsanleitung zum Versuch „Messung wichtiger Kreislaufgrößen“

UNIVERSITÄT LEIPZIG  
MEDIZINISCHE FAKULTÄT  
CARL-LUDWIG-INSTITUT FÜR PHYSIOLOGIE

VERSION 2022

---

**Stichwörter:** *Blutdruckmessung<sup>1</sup>, zentrale und periphere Pulskurve, Anspannungs- und Austreibungszeit, Windkesselfunktion der Aorta, Schlagvolumen und dessen Bestimmungsmethoden,  $p_t$ - ,  $V_t$ - und  $pV$ -Diagramm des Herzens, Frank-Starling-Mechanismus.*

## Lernziele zur Praktikumsvorbereitung

Nach der Vorbereitung zum Praktikumsversuch sind die Studierenden in der Lage:

- die Methode der unblutigen Blutdruckmessung von Riva-Rocci korrekt zu beschreiben sowie die Entstehung der Korotkoffschen Geräusche zu interpretieren,
- die Auskultationspunkte der Herzklappen aufzusuchen und ihre Position zu interpretieren,
- typische Registrierungen wie EKG, PKG (Phonokardiogramm) sowie zentrale und periphere Pulskurven zu zeichnen, zu interpretieren und in den richtigen zeitlichen Zusammenhang zu bringen,
- die mechanische Herzaktion einschließlich der Herzklappentätigkeit zu beschreiben und die Bedeutung der Windkesselfunktion zu erklären,
- die wichtigen Kreislaufgrößen Blutdruck, Herzschlagvolumen, Herzfrequenz, Gefäßwiderstand, Gefäßdehnbarkeit (Compliance) und Pulswellengeschwindigkeit sowie die Beziehungen zwischen ihnen zu erklären.

## Einführung

Die Beurteilung des Kreislaufs – als Vorbedingung jeglicher geordneter Organfunktion – ist eine der wichtigsten Aufgaben des Arztes. Größen wie Herzkraft und peripherer Widerstand sind nicht unmittelbar zu messen, jedoch der von beiden abhängige arterielle Blutdruck. Die Förderleistung des Herzens, das Schlagvolumen, lässt sich u.a. indirekt aufgrund mathematisch-physikalischer Überlegungen aus unblutig gewonnenen Messgrößen bestimmen. Außerdem ist es zur Beurteilung der Herzfunktion wichtig, den zeitlichen Erregungsablauf (EKG) und den zeitlichen Ablauf der mechanischen Herztätigkeit synchron zu erfassen (systolische Zeitintervalle: Anspannungs-, Austreibungszeit).

## 1 Station Blutdruckmessung

### 1.1 Bestimmung des systolischen Blutdrucks (palpatorisches Kriterium)

Die Versuchsperson, deren Blutdruck gemessen werden soll, muss bequem sitzen und den Unterarm auf den Tisch auflegen. Die Manschette wird am Oberarm so angelegt, dass die Ellenbeuge vollkommen frei ist. Dann wird der Druck in der Manschette mit dem Gummiballon so lange gesteigert, bis der Radialis puls eben nicht mehr fühlbar ist. - Ablesen des Druckes am Manometer. Ebenso wird bei hohem Manschettendruck, etwa 180 mmHg, durch langsame Verminderung des Druckes der Wert bestimmt, bei dem der Puls gerade wieder tastbar wird. Diese Messung sollten Sie 5mal wiederholen, wobei zwischen jeder Messungen der Druck abzulassen ist, damit keine Stauung entsteht. Zwischen den Messungen sollte ca. 1 Minute gewartet werden.

---

<sup>1</sup> s. WHO-Kriterien der Blutdruckmessung

Messung (re. oder li.)	$P_S \uparrow$	$P_S \downarrow$
1		
2		
3		
4		
5		
Mittel		

**Tabelle 1:** Systolischer Blutdruck nach palpatorischem Kriterium

**Protokoll:** Der Mittelwert aus 5 derartig durchgeführten Messungen ergibt den systolischen Druck.  
Geben Sie die Körperseite der Messung an (re. oder li.):

## 1.2 Bestimmung des systolischen und diastolischen Blutdrucks (auskultatorisches Kriterium)

Der Manschettendruck wird um etwa 20 mmHg über den zu erwartenden systolischen Druck erhöht (s. Tab. 1). Bei langsamem Absinken des Manschettendruckes wird mit dem Stethoskop über der A. brachialis in der Ellenbeuge festgestellt, bei welchem Druckwert ein klopfendes Geräusch eben auftritt (systolischer Druck) und bei weiterem Absinken des Manschettendruckes plötzlich dumpfer und leiser wird oder verschwindet (diastolischer Druck).

**Protokoll:** Bestimmen Sie den Mittelwert aus 5 Messungen am gleichen Arm wie bei 1.1. Was ist die Ursache der auskultatorischen und palpatorischen Phänomene? Messen Sie die Blutdrücke auch einmal am anderen Arm. Wiederholen Sie eine Messung an der A. dorsalis pedis bei stehendem Probanden. Welche Blutdruckunterschiede sind zu erwarten?

- Ursache der Phänomene:

- erwartete Unterschiede zwischen beiden Armen:

- erwartete Unterschiede zwischen Arm und Bein:

Messung	A. brachialis (re. oder li.)	
	$P_S$	$P_D$
1		
2		
3		
4		
5		
Mittel		
andere Körperseite		
	A. dorsalis pedis (re. oder li.)	
	$P_S$	$P_D$

**Tabelle 2:** Blutdruck nach auskultatorischem Kriterium

## 1.3 Künstliche Blutleere

Ein Arm wird einige Zeit senkrecht in die Höhe gehalten und das Blut herzwärts ausgestrichen. Die Blutdruckmanschette wird fest um den erhobenen Arm gelegt und schnell auf etwa 180 mmHg aufgepumpt. Senken des Armes, dabei Kontrolle durch Tasten des Pulses, dass der Manschettendruck sicher über dem systolischen Druck liegt.

**Protokoll:** Protokollieren Sie die Unterschiede des in seiner Blutzufuhr abgedrosselten mit dem normal durchbluteten Arm.

## 1.4 Venöse Stauungshyperämie

Nachdem die Erscheinungen der Blutleere im Versuch 1.3 deutlich geworden sind (nach mehreren Minuten), wird der Manschettendruck so weit gesenkt, dass der arterielle Zustrom wieder geöffnet, der venöse Abstrom noch gedrosselt bleibt. Dazu wird der Manschettendruck auf etwa 40 bis 50 mmHg gehalten. Der Arterienpuls muss deutlich fühlbar sein. Der Arm sollte dabei locker herabhängen.

**Protokoll:** Nach mehreren Minuten sind alle Zeichen der venösen Stauung deutlich erkennbar und zu protokollieren. Wie verhalten sich Finger und Venen?

## 2 Station Herztöne und Ultraschall

### 2.1 Herztöne und Auskultation des Herzens

#### Überblick

Im Zusammenhang mit der Tätigkeit des Herzens entstehen mechanische Schwingungen im Bereich von 15 – 400 Hz, die an der Thoraxoberfläche mit Hilfe eines Stethoskops (Auskultation) oder Herzschaall-Mikrofons und elektronischer Verstärkung als Phonokardiogramm registriert werden können.

*Bereits Hippokrates empfahl den Ärzten zur Beurteilung der Herzätigkeit das Ohr direkt auf den Thorax des Patienten zu legen. 1816 erfand Laënnec, ein französischer Arzt, mehr zufällig das Stethoskop (Brustseher), das sich schnell zu einem wichtigen Untersuchungsinstrument entwickelte. In der ursprünglichen Form als dünnes Holzrohr mit trichterförmigen Erweiterungen an den Enden wird es heute noch in der Geburtshilfe beim Abhören der kindlichen Herztöne angewendet. Die Möglichkeit der zeitlichen Registrierung der Schallphänomene am Herzen als Phonokardiogramm seit 1908 hat bedeutend zur Objektivierung der Befunde durch Auskultation mit dem Stethoskop beigetragen.*

Vom Standpunkt der Akustik stellen diese Schwingungen in jedem Fall Geräusche dar. Die physiologischen Geräusche werden nach allgemeinem Sprachgebrauch der Klinik als Herztöne bezeichnet. Herzgeräusche stellen danach pathologische Veränderungen der Schallphänomene dar.

Herztöne sind über dem gesamten Herzen hörbar. Die klassischen Auskultationsstellen sind dadurch charakterisiert, dass die von den Klappen ausgehenden Geräusche beim Erwachsenen vorwiegend stromabwärts geleitet werden. Während der Herzaktion sind unter physiologischen Bedingungen zwei Herztöne hörbar, die durch die Bewegung der Klappen und durch Muskelanspannung entstehen. Im Kindesalter bzw. bei Jugendlichen können bei der Auskultation bis zu 4 Herztöne auftreten.

#### *Erster Herzton*

Er entsteht am Beginn der Systole durch Kontraktion der Herzmuskulatur (Anspannungston, auch: Muskelton) als dumpfes, längeres Geräusch.

#### *Zweiter Herzton*

Entsteht am Beginn der Diastole beim Schließen der Taschenklappen von Aorta und A. pulmonalis (Klappenton) als kürzerer und hellerer Schalleindruck. Gelegentlich ist eine Spaltung des 2. Herztones zu beobachten. Die Systole des linken Ventrikels ist dann geringfügig kürzer als die des rechten Ventrikels. Verstärkt wird dieser Effekt bei temporär erhöhter Füllung des rechten Ventrikels durch tiefe Einatmung (Anstieg des venösen Rückstromes).

#### *Dritter Herzton*

Tritt 120 - 160 ms nach dem 2. Herzton als dumpfes, leises Geräusch (Punctum maximum über der Herzspitze) auf und entsteht durch Schwingung des Ventrikels während der schnellen Füllung in der frühdiastolischen Phase (Füllungston). Bei Kindern und Jugendlichen ist das Auftreten physiologisch. Bei Erwachsenen tritt er als Folge einer Vorhofbelastung und vermehrter Ventrikelfüllung bei Herz- und Mitralinsuffizienz auf.

#### *Vierter Herzton*

Wird durch Vorhofkontraktion (Vorhoftön) in der späten Diastole hervorgerufen (Punctum maximum über der Tricuspidalklappe). Während das Auftreten bei Jugendlichen und Kindern physiologisch ist, kommt er bei Erwachsenen bei Druckbelastung von linkem und rechtem Ventrikel in Verbindung mit Myokardinfarkt, Cor pulmonale, arterieller und pulmonaler Hypertonie vor.

### Durchführung

Die Versuchseinrichtung besteht aus Mikrofon, Impedanzwandler zur Anpassung an ein Mischpult mit nachgeschaltetem Kopfhörerverstärker. Die Voreinstellungen am Mischpult sind markiert und sollen nicht verstellt werden. Die Lautstärkeregel am Kopfhörer-Verstärker befinden sich im Linksanschlag (Nullstellung). Nachdem das Mikrofon aufgesetzt ist, werden individuell von den Versuchsteilnehmern die Lautstärkesteller so weit nach rechts aufgedreht, dass die Herztöne deutlich hörbar werden. Parallel zur akustischen Wiedergabe ist an einem Monitor das Phonokardiogramm sichtbar.

Vom Versuchsleiter wird das Mikrofon an verschiedenen Stellen des Thorax aufgelegt und das Ergebnis von allen protokolliert. Am Tisch befindet sich eine schematische graphische Darstellung für die günstigsten Auskultationspunkte (Punctum maximum) der unterschiedlichen Schallphänomene.

Das Herzschaall-Mikrofon ist äußerst sorgfältig zu behandeln. Es besteht aus einer massiven Metallkapsel in einer Halterung mit zwei Füßen. In die Kapsel ist ein Stößel (rot) zur Schallübertragung eingeschraubt (austauschbar), der zusammen mit den Füßen eine Dreipunkt-Auflage bildet. Anfangs wird das Mikrofon auf das Brustbein (Sternum) aufgesetzt.

**Beachte:** Zum Schutz gegen Beschädigung ist das Mikrofon immer mit dem Stößel nach oben im Aufbewahrungskasten abzulegen.

Protokoll:

1. Skizzieren Sie den Zeitverlauf der Herztöne
2. Beschriften Sie den 1. und 2. Herzton.
3. Wie unterscheiden sich die Herztöne im Klang?
4. Wodurch entstehen die Herztöne?

### Auskultierung

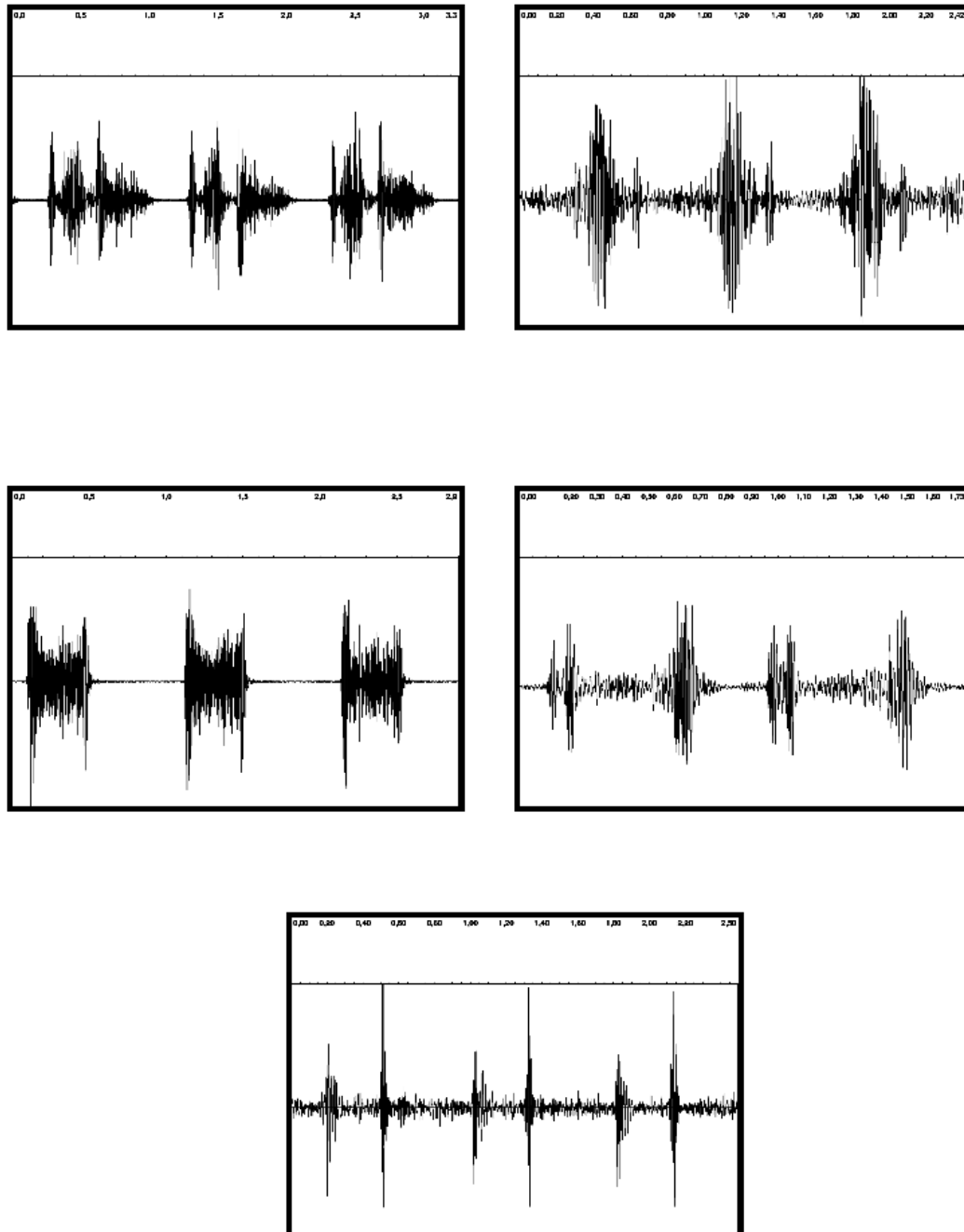
Nachdem die Arbeitsgruppe auf diese Weise erste Erfahrungen mit den Herztönen gewonnen hat, werden anschließend von allen Versuchsteilnehmern individuell mit dem Stethoskop die 5 klassischen Auskultationsstellen im Brustwandbereich überprüft :

1. Aortenklappe : 1.-2. ICR rechts vom Brustbein (parasternal)
2. Pulmonalklappe : 2. ICR links parasternal
3. Tricuspidalklappe : 4.-5. ICR rechts parasternal
4. Mitralklappe : 5. ICR links Medioclavicularlinie, Auskultationsort durch Bewegung der Herzspitze als sog. Herzspitzenstoß meist fühlbar, bei sehr schlanken Personen oft sichtbar.
5. Erb-Punkt (Punctum quintum): 3. ICR links parasternal, zentraler Auskultationspunkt des Herzens.



**Abbildung 1:** Bezeichnen Sie die Herzklappen und zeichnen Sie die Auskultationspunkte ein.

### 2.1.2 Pathologische Herzgeräusche am Computer



**Abbildung 2:** Herztöne und –geräusche

Folgende Herzgeräusche finden Sie vor:

- normale Herztöne
- Aorteninsuffizienz
- Aortenstenose
- Mitralinsuffizienz
- Mitralstenose
- gespaltener zweiter Herzton
- dritter Herzton
- Korotkoff-Geräusche

**Protokoll:** Welchen mechanischen Vorgang im Herzen hört man an den jeweiligen Auskultationsstellen besonders gut? Erstellen Sie eine Zuordnung. Skizzieren Sie die Auskultationspunkte (Abb.1).

Hören Sie sich die Herzgeräusche an den Computern an.

Ordnen Sie in der Abb.2 die Phonogramme zu (normale Herztöne, Aortenstenose, Mitralstenose, Aorteninsuffizienz, Mitralinsuffizienz) und markieren Sie jeweils den ersten und zweiten Herzton.

## 2.2 Transthorakale Echokardiographie

### Überblick

Mit der Transthorakalen Echokardiographie (TTE) lernen Sie eine der wichtigsten Untersuchungsmethoden der Kardiologie und Intensivmedizin kennen. Mit dieser nicht-invasiven Untersuchung kann eine morphologische sowie funktionelle Beurteilung der Herzhöhlen und –klappen ohne Strahlungsbelastung erfolgen.

Die physikalischen Eigenschaften von Ultraschall (US)-Wellen und deren Nutzung in der Medizin haben Sie bereits in der Biophysik kennengelernt. Bei der TTE, synonym Herzecho, werden US-Wellen durch einen Schallkopf mittels Piezokristallen mit Wellenlängen von 2,5 bis 7,5 MHz in den Thorax ausgesendet. Diese werden an Grenzflächen anatomischer Strukturen reflektiert und von dem Schallkopf, welcher nun als Empfänger dient, registriert und in elektrische Signale umgewandelt.

Aus diesen Daten erzeugt das Sonographiegerät im so genannten B-Mode (**B**rightness-Mode) ein zweidimensionales Schnittbild. Dabei wird die Intensität der reflektierten Signale in Graustufen (Brightness) dargestellt.

Bei der 2D-Echokardiographie achtet man besonders auf:

- Ventrikelgrößen → dilatative / hypertrophe Kardiomyopathie?
- Systolische und diastolische Herzfunktion → Herzinsuffizienz?
- Wanddicken → Hypertrophie?
- Regionalen Wandbewegungsstörungen → KHK? Herzinfarkt?

Außerdem kann man mittels Farbdoppler den Blutfluss im Herzen darstellen. Dabei wird der Doppler-Effekt genutzt: Wenn sich ein Schallsignal dem Empfänger nähert, wird seine Wellenlänge kürzer; entfernt es sich vom Empfänger, nimmt die Wellenlänge zu. Diese Änderungen der Wellenlänge werden farbkodiert: Ein Blutfluss zum Schallkopf hin erscheint rot; Blutfluss vom Schallkopf weg wird blau dargestellt.

### Durchführung

#### *Lagerung des Probanden und Schallkopfposition*

Um möglichst gute Untersuchungsbedingungen zu erhalten befindet sich der Proband in Links-Seitenlage (also auf der linken Körperseite liegend). Eine Abduktion des linken Armes um 90° im Schultergelenk ist von Vorteil. Dadurch werden die Intercostalräume (ICR) erweitert, was zu einem größeren Schallfenster führt. Ein abgedunkelter Raum ist auch von großem Vorteil, da hier Helligkeitsunterschiede auf dem Bildschirm besser zur Geltung kommen. Hinderlich ist natürlich direkte Sonneneinstrahlung auf den Röhren-Monitor des US-Gerätes.

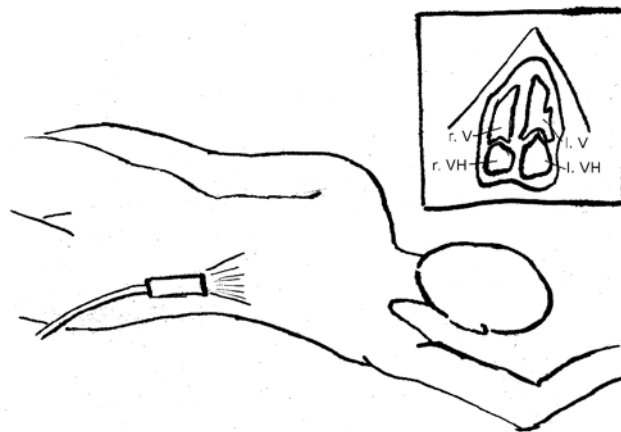
Aufgrund der schlechten Schalleitungseigenschaften der Lunge sowie der durch die Rippenknochen auftretenden Totalreflexion kann das Herz nur von wenigen Positionen angeschallt werden. Im Praktikum lernen Sie a) das parasternale und b) das apikale Schallfenster kennen. Für die Darstellung der parasternalen langen Achse wird der Sektorschallkopf zwischen 3. und 5. ICR links parasternal aufgesetzt; dabei weist die

Markierung des Schallkopfes zur rechten Schulter. Für den apikalen 4-Kammer-Blick setzt man den Schallkopf am Punkt des Herzspitzenstoßes, ca. im 5.ICR zwischen Medioclavicularlinie und vorderer Axillarlinie, auf. Die Markierung des Schallkopfes weist nach lateral.

#### Anatomie

Über die beiden Schallfenster werden Ihnen nun an einem Probanden das Bild der parasternalen langen Achse (lAx) und der apikale 4-Kammer-Blick (4CH) eingestellt. Versuchen Sie anhand des Herzmodells die dargestellte Anatomie sowie die Blutflüsse in der Systole und Diastole nachzuvollziehen.

**Protokoll:** Skizzieren Sie den apikalen 4-Kammer-Blick (4CH) und beschriften Sie die abgebildeten Herzhöhlen und -klappen!



**Abbildung 3:** Für den 4-Kammer-Blick wird der Schallkopf in die apikale Position gebracht. Da das Herz von der Herzspitze in Richtung Vorhöfe erfasst wird, erhält man auf dem Monitor ein kopfstehendes Bild mit der Herzspitze oben sowie rechtem Vorhof (r. VH) und rechtem Ventrikel (r. V.) auf der linken Monitorseite.



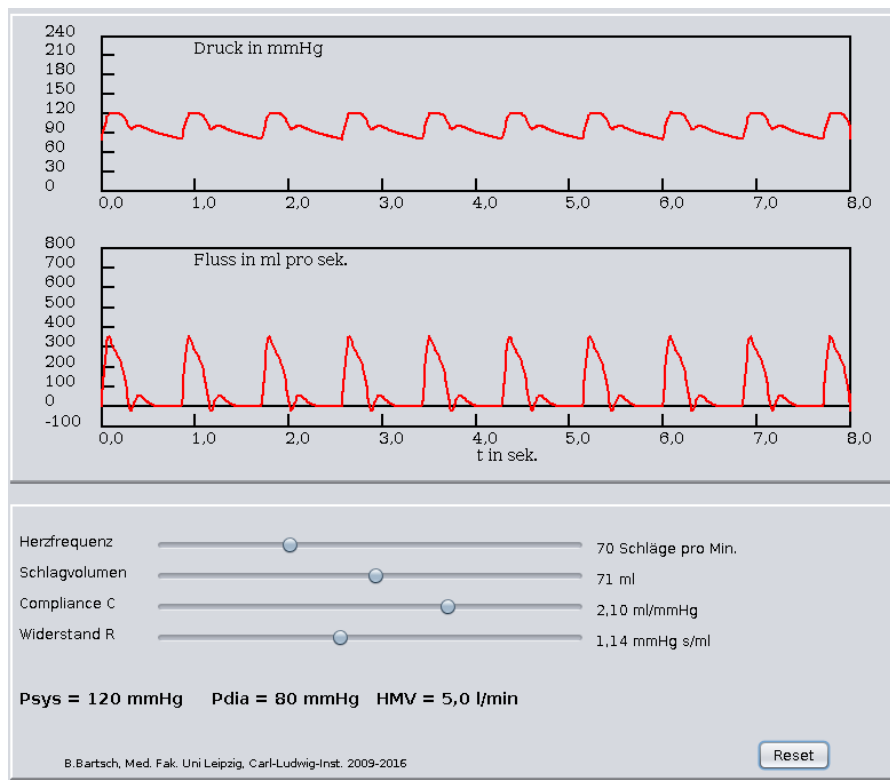
## 3 Station Windkesselmodell und Messung wichtiger Kreislaufgrößen

### 3.1 Windkesselmodell

Der Blutstrom  $i(t)$  aus dem Herzen fließt als Compliance-Strom  $i_c(t)$  in das Speichervolumen und über den Systemwiderstand  $R$  als  $i_R(t)$  in den Blutkreislauf:

$$i(t) = i_c(t) + i_R(t) \approx C \cdot \frac{dP(t)}{dt} + \frac{P(t)}{R}$$

Numerisch läßt sich für einen vorgegeben Strom  $i(t)$  der zeitliche Druckverlauf  $P(t)$  errechnen. Tragen Sie die Ergebnisse in Tab. 3 ein.



**Abbildung 4:** Simulation des Blutdrucks.

1. Der Reset-Knopf stellt für Ihr Alter gängige Werte ein. (Herzfrequenz = 70 Schläge/min, Schlagvolumen = 71 ml, Systemwiderstand = 1,13 mmHg s/ml, Compliance = 2,1 ml/mmHg)
2. Simulieren Sie ein Kind (5 Jahre) mit einer typischen Pulsfrequenz von 100 Schlägen pro Minute und Blutdruckwerten von  $P_{sys} = 95$  mmHg und  $P_{dia} = 60$  mmHg. Das Schlagvolumen beträgt etwa 25 ml. Was sind die wesentlichen Unterschiede zum Erwachsenen mit normalen Blutdruckwerten?
3. Stellen Sie wieder die Ausgangswerte ein. Simulieren Sie jetzt einen Ausdauersportler mit einem Schlagvolumen von etwa 90 ml. Dieser hat keinen Bluthochdruck! Welche Größen müssen verändert werden, damit der Blutdruck bei körperlicher Ruhe normale Werte erreicht?
4. Stellen Sie nur unter Veränderung des Systemwiderstandes und der Compliance einen Bluthochdruck, wie er v.a. bei alten Menschen vorkommt, ein ( $P_{sys}$  etwa 180 mmHg und  $P_{dia}$  etwa 100 mmHg). Wie haben sich Systemwiderstand und Compliance verändert? Warum steigt der systolische Blutdruck hier stärker als der diastolische?
5. Überprüfen Sie das Ohm'sche Gesetz:  
**Mittlerer Blutdruck  $\approx$  Schlagvolumen  $\cdot$  Herzfrequenz  $\cdot$  Systemwiderstand  $R$**   
(Eingestellte Werte protokollieren! Sie müssen dazu vorher die Herzfrequenz in Schläge pro Sekunde umrechnen!)

	P <sub>sys</sub>	P <sub>dia</sub>	SV	Herzfrequenz		HMV	R	C	Mittlerer Blutdruck
	mmHg	mmHg	ml	min <sup>-1</sup>	s <sup>-1</sup>	l/min	mmHg s/ml	ml/mmHg	mmHg
Normalwerte	120	80	71	70		5,0	1,14	2,1	
Kleinkind	95	60	25	100					
Leistungssportler	120	80	90			5,0			
Bluthochdruck (Senior)	180	95				5,0			

**Tabelle 3:** Werte vom Windkesselmodell

Kleinkind	
Leistungssportler	
Bluthochdruckpatient	

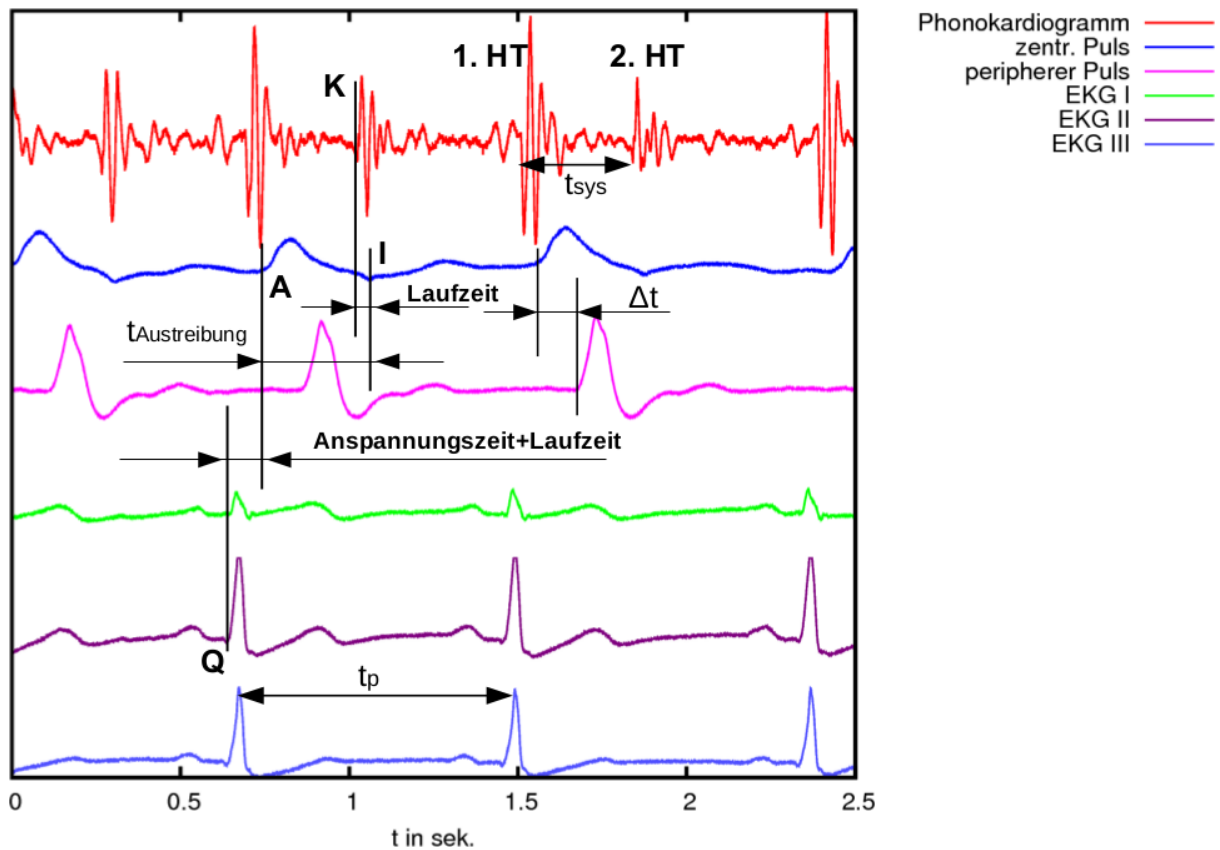
**Tabelle 4:** Tragen Sie hier in Stichpunkten die wesentlichen Unterschiede zu den Normalwerten ein.

### 3.2 Abschätzung des Schlagvolumens und Bestimmung wichtiger Zeiten des Herzzyklus

#### Messung

An einem Probanden werden gleichzeitig die angegebenen Kreislaufgrößen gemessen (Abb. 5).

Kreislaufgröße	Sensor	Ort
Phonokardiogramm	Herzschallmikrofon	Sternum
Zentraler Puls	Pulssensor	linke A. carotis (Subclavia)
Peripherer Puls	Pulssensor	linke A. radialis
EKG	Einthoven-Schema	
syst. und diastol. Blutdruck	Messung nach Riva-Rocci	



**Abbildung 5:** Beispielkurven: A - Beginn des Druckanstiegs in der Carotis, I - Incisur, Q Q-Zacke des EKG's, K - Klappenton (2. Herzton). Berechnen Sie als Übung **vor dem Praktikum** das Schlagvolumen bei den Blutdrücken  $P_{\text{sys}} = 120 \text{ mmHg}$ ,  $P_{\text{dia}} = 80 \text{ mmHg}$  und einem Aortenquerschnitt  $A_0 = 3,5 \text{ cm}^2$ . Der Weg der Pulswellen beträgt  $60 \text{ cm}$ . Sie müssen dazu die Zeiten  $t_p$ ,  $t_{\text{Austreibung}}$  und die zeitliche Verschiebung der Pulskurven  $\Delta t$  aus der Abb. ablesen. Lösungsweg: Berechnen Sie  $C$ ,  $\Delta P$ ,  $\Delta V$ , HZV und  $V_{\text{sys}}$ . Abfluss .

## Auswertung

Probandendaten	
Alter	Jahre
Größe	m
Geschlecht	
Aortenquerschnitt $A_O$ aus Abb. 6	cm <sup>2</sup>
Blutdrücke	
systolischer Blutdruck $P_{sys}$	mmHg
diastolischer Blutdruck $P_{dia}$	mmHg
Blutdruckänderung $\Delta P = \approx \frac{1}{2}(P_{sys} - P_{dia})$	mmHg
mittlerer Blutdruck $\bar{P} = P_{dia} + 0,38 * (P_{sys} - P_{dia})$	mmHg
Zeiten	
Austreibungszeit $t_{Austreibung} = \overline{AI}$	s
Anspannungszeit $t_{Ans} = \overline{QA} - \overline{KI}$	s
Systolendauer $t_{sys} = t_{Ans} + t_{Austreibung}$	s
Systolendauer aus der Differenz 1. und 2. Herzton	s
Periodendauer $t_p$	s
Diastolendauer $t_{dia} = t_p - t_{sys}$	s
Pulswellengeschwindigkeit	
Wegdifferenz Pulsabnehmer $\Delta s$	cm
Zeitdifferenz Pulskurven $\Delta t$	s
Pulswellengeschwindigkeit $c_{Puls} = \Delta s / \Delta t$	m/s
Windkesselwerte	
Compliance $C$	ml/mmHg
Speichervolumen $\Delta V = C \cdot \Delta P$	ml
Syst. Abflussvolumen $V_{sys.Abfluss}$	ml
Schlagvolumen $SV = V_{sys.Abfluss} + \Delta V$	ml
Herzminutenvolumen HMV	l/min
Aus dem HMV abgeleitete Größe	
Herzzeitvolumen HZV	ml/s
Systemwiderstand $R = \frac{\bar{P} - P_{r.Vorhof}}{HZV}$	mmHg s/ml

**Tabelle 5:** Wichtige Kreislaufparameter

**Austreibungszeit  $t_{\text{Austreibung}}$ :** Öffnungsdauer der Aortenklappe (linksventrikuläre Ejektionszeit), gemessen vom Druckanstieg A im zentralen Puls bis zur Inzisierung I.

**Anspannungszeit  $t_{\text{Ansp}}$ :** Dauer der Anspannung des Myokards vom Beginn der elektrischen Erregung (Q-Zacke im EKG) bis zum Öffnen der Aortenklappe (Druckanstieg in der Aorta). Da nur der Druckanstieg A in der A. subclavia gemessen wurde, muss die Laufzeit der Druckwelle von der Aortenwurzel bis zum Pulsabnehmer von der Zeitdifferenz Q bis A abgezogen werden. Die Laufzeit ergibt sich aus dem Beginn des Klappentons (2. Herzton) K im Phonokardiogramm und der Inzisierung I im zentralen Puls.

**Systolendauer  $t_{\text{sys}}$ :** Die Dauer zwischen Beginn der Systole und der Inzisierung (Klappenschluss). Der Beginn ist nicht einheitlich definiert. Liegt der Beginn bei der Q-Zacke ist  $t_{\text{sys}} = t_{\text{Aus}} + t_{\text{Ansp}}$ . Oft wird der Beginn erst nach dem QRS-Komplex festgelegt, entweder der Beginn des 1. Herztons oder die Systolendauer wird gleich der Austreibungsdauer gesetzt, entsprechend verlängert sich dann die Diastole.

**Periodendauer  $t_p$ :** Dauer einer Herzperiode, beispielsweise der Abstand zweier R-Zacken.

**Pulswellengeschwindigkeit  $c_{\text{Puls}}$ :** Die Wegdifferenz  $\Delta s$  der Pulsabnehmer und die zeitliche Verschiebung  $\Delta t$  zwischen zentralem und peripherem Puls ergeben die Pulswellengeschwindigkeit  $c_{\text{Puls}} = \Delta s / \Delta t$  (Abb.7).

**Schlagvolumen SV:** Das Schlagvolumen ist das Volumen, welches bei der Herzkontraktion ausgeworfen wird. Es setzt sich aus dem Speichervolumen  $\Delta V$  und dem systolischen Abflussvolumen  $V_{\text{sys. Abfluss}}$  zusammen.

$$SV = \Delta V + V_{\text{sys. Abfluss}} = C \cdot \Delta P + V_{\text{sys. Abfluss}}$$

$\Delta P$  ist die Druckdifferenz zwischen den Blutdrücken am Systolenende, wenn die Aortenklappe schließt (knapp über 100 mmHg, nur mit Katheder messbar), und dem Systolenanfang (ca. 80 mmHg, entspricht dem diastolischen Blutdruck). Um das Schlagvolumen zu bestimmen, müssen die Größen C,  $\Delta P$  und  $V_{\text{sys. Abfluss}}$  bestimmt werden.

Für die Blutdruckdifferenz verwendeten Broemser und Ranke die empirische Näherung

$$\Delta P = P_{\text{Systolenende}} - P_{\text{Systolenanfang}} \approx \frac{1}{2}(P_{\text{sys}} - P_{\text{dia}})$$

Zusammenfassend ergibt sich nach Broemser und Ranke folgende Formel (SI-Einheiten, also Pa, m<sup>2</sup>, m/s...):

$$SV = \frac{\frac{1}{2}(P_{\text{sys}} - P_{\text{dia}}) \cdot A_0 \cdot t_{\text{Austreibung}} \cdot t_p}{\rho \cdot c_{\text{Puls}} \cdot (t_p - t_{\text{Austreibung}})}$$

Für die Bestimmung des Schlagvolumens gibt es weitere Methoden (Auswahl):

- Indikatorverdünnungsverfahren nach A. Fick (1870)
- Thermodilution, es wird kalte isotonische Kochsalzlösung in den rechten Vorhof injiziert und die Temperatur in der Pulmonalarterie gemessen.
- Pulskonturenanalyse nach Wesseling (1970)
- Echokardiographie, hier wird die Blutstromstärke gemessen. Zeitliche Integration liefert dann das Volumen.
- Kernspintomographie, auch hier wird der Fluss über Kontrastmittel bestimmt.

**Speichervolumen  $\Delta V$ :** Während der Systole dehnen sich die großen Arterien wegen des erhöhten Drucks um das Volumen  $\Delta V$  aus. Dadurch wird Blut für die Diastole gespeichert, wenn das Herz kein Blut liefert.

**systolisches Abflussvolumen  $V_{\text{sys. Abfluss}}$ :** Das Volumen, das während der Systole in den Körperkreislauf fließt. Aus der Annahme der näherungsweise Flussgleichheit  $\frac{V_{\text{sys. Abfluss}}}{t_{\text{Austreibung}}} \approx \frac{\Delta V}{t_p - t_{\text{Austreibung}}}$  folgt

$$V_{\text{sys. Abfluss}} = \frac{t_{\text{Austreibung}}}{t_p - t_{\text{Austreibung}}} \Delta V$$

**Compliance C:** Die (Volumen-)Compliance gibt den Zusammenhang zwischen dem Volumenzuwachs  $\Delta V$  (Speichervolumen) bei einem Druckanstieg  $\Delta P$  in einem Blutgefäß an:

$$\Delta V = C \cdot \Delta P$$

Broemser und Ranke fanden um 1938 eine Abschätzung für die Compliance<sup>2</sup> aus der Pulswellengeschwindigkeit und konnten auf unblutige Weise das Schlagvolumen bestimmen.

$$C = \frac{A_0 \cdot t_{\text{Austreibung}}}{\rho \cdot c_{\text{Puls}}}$$

Verwenden Sie hier bitte SI-Einheiten (m<sup>2</sup>, s, m/s) und rechnen Sie die Compliance von m<sup>3</sup>/Pa in ml/mmHg um.  $\rho$  ist die Dichte des Blutes (1060 kg/m<sup>3</sup>). Eine Schätzung des Aortenquerschnitts  $A_0$  liefert das Nomogramm (Abb. 6).

**Herzminutenvolumen HMV:** Aus dem Schlagvolumen kann über die Pulsfrequenz das Herzminutenvolumen HMV (das ist das vom Herz pro Minute gepumpte Blutvolumen) berechnet werden:

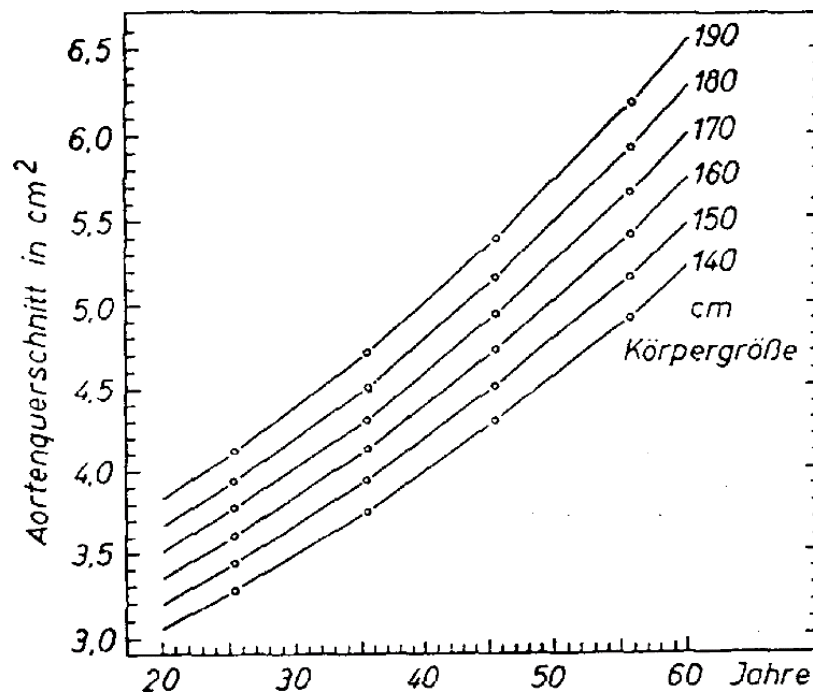
$$HMV = SV \cdot \frac{\text{Schläge}}{\text{Minute}}$$

Wird als Bezugszeit eine andere Zeitspanne als eine Minute gewählt (z.B. eine Sekunde), spricht man allgemeiner vom Herzzeitvolumen HZV.

**Totaler peripherer Widerstand R:** Aus dem Ohm'schen Gesetz  $R = U/I$  lässt sich (unter Vernachlässigung der Compliance) der totale periphere Systemwiderstand R bestimmen:

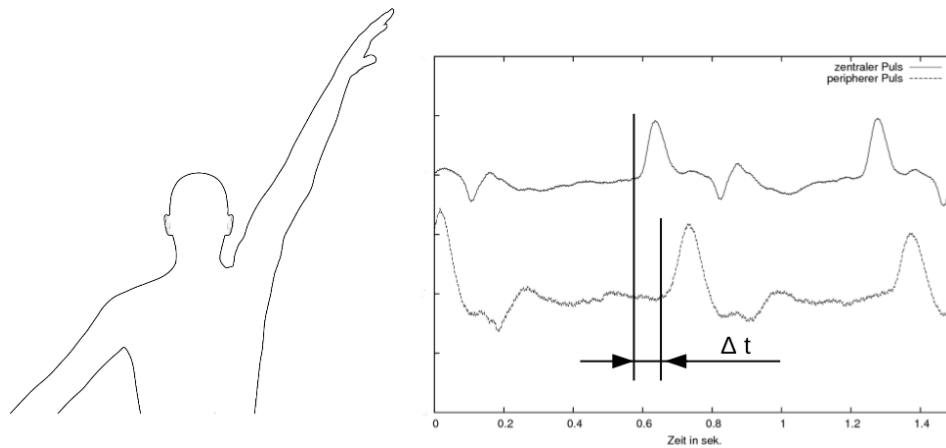
$$R = \frac{\bar{P} - P_{r.Vorhof}}{HZV}$$

Das Ohm'sche Gesetz gilt eigentlich nur für einen zeitlich konstanten Druck. Behelfsweise wird daher der mittlere Blutdruck  $\bar{P} = P_{dia} + 0,38 \cdot (P_{sys} - P_{dia})$  abzüglich des Blutdruckes im rechten Vorhof  $P_{r.Vorhof}$  (ca. 3 mmHg) und das Herzzeitvolumen bezogen auf 1 Sekunde eingesetzt.

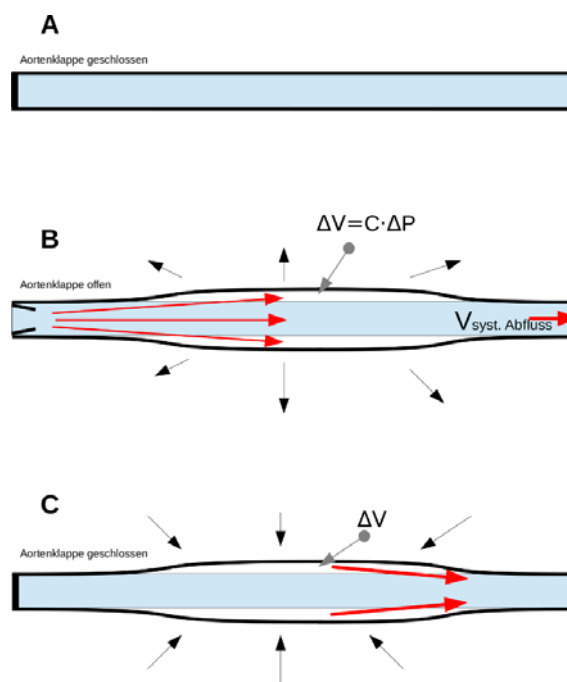


**Abbildung 6:** Aortenquerschnitt in Abhängigkeit vom Lebensalter und Körpergröße

<sup>2</sup> Der Begriff Compliance fand erst später Einzug in die Kreislaufphysiologie, Broemser und Ranke bestimmten die Volumenelastizität  $E' = 1/C$



**Abbildung 7:** Pulswellengeschwindigkeit: Zeichnen Sie bitte die Messorte der Pulsabnehmer und die Wege der Pulswellen ein.



**Abbildung 8:** Windkesselfunktion der großen Arterien

- A:** Nach Ablauf der Diastole herrscht der diastolische Blutdruck  $P_{\text{dia}}$  vor. Das Gefäß ist entspannt und nahezu zylinderförmig.
- B:** Während der Systole strömt das Schlagvolumen in diesen Gefäßabschnitt. Dabei wird das systolische Abflussvolumen  $V_{\text{Abfluss}}$  weitergeschoben. Die großen Arterien sind stark dehnbar, damit ist das Volumen im Inneren vom vorherrschenden Blutdruck abhängig. Steigt der Druck um jetzt  $\Delta P$ , wächst das Volumen um das systolische Speichervolumen  $\Delta V$ .
- C:** Nach dem Schließen der Aortenklappe erhält das Speichervolumen den Kreislauf in der Diastole aufrecht.