

Herzaktion und Druckpuls

Voraussetzungen

In diesem Praktikum sollen durch gleichzeitige Registrierung der Herztöne, des arteriellen Druckpulses und des EKG die einzelnen Phasen der Herzaktivität gegeneinander abgegrenzt und die Ausbreitung der Pulswelle im Gefäßsystem untersucht werden. Für die Interpretation der Ergebnisse müssen folgende Sachverhalte bekannt sein: Mechanik des Herzens (Herzgröße, -klappen, -füllung, -zyklus, -töne, -geräusche), FRANK-STARLING-Mechanismus, Steuerung der Herztätigkeit, Koronardurchblutung und Energieumsatz, Funktionen der Gefäßabschnitte, Windkesselfunktion der Aorta, Druckpuls (GK 3.2 – 4.2),.

Inhaltsübersicht

1. Auskultation des Herzens
2. Pulspalpation und DOPPLER-Sonographie
3. Simultane Registrierung des EKG, der Herztöne (Phonokardiographie) und der Druckpulswelle (A. carotis; Sphygmographie)
4. Bestimmung der peripheren Pulswellengeschwindigkeit (Infraton-Pulsoszillographie)
5. Konstruktion von Druck-Volumen-Diagrammen des linken Ventrikels

1. Die Auskultation des Herzens

Während der Herzaktion werden Schwingungen auf die Brustwand übertragen, die mit Hilfe eines Stethoskops abgehört werden können. Die üblichen Stethoskope besitzen ein Membranteil für hohe Frequenzen und einen offenen Aufnahmetrichter für tiefere Frequenzen. Gebräuchliche Auskultationspunkte sind insbesondere der 4.-6. ICR li. (Herzspitze), der 2. ICR re. (Aortenklappe), der 2. ICR li. (Pulmonalklappe), der 3. ICR li. („ERBscher“ Punkt) und der Ansatz der 5. Rippe re. (oder li.) über dem Sternum (Tricuspidal-Klappe; ICR = Intercostalraum).

Beim Erwachsenen sind normalerweise zwei Herztöne hörbar: Der dumpfere erste wird v. a. durch die isovolumetrische Muskelanspannung und der hellere zweite v. a. durch den Schluss der zwei Taschenklappen hervorgerufen. Der zweite Herzton wird gespalten wahrgenommen, wenn der Schluss der Taschenklappen zeitlich deutlich versetzt erfolgt (normales Intervall $< 0,02$ s expiratorisch und $0,04$ s inspiratorisch). Bei Kindern ist gelegentlich während der schnellen Phase der Kammerfüllung ein dritter Herzton hörbar. Abnormal ist das Auftreten eines vierten Tones in der späten Diastole („Vorhoftön“ bei Vorhofüberlastung z.B. aufgrund einer Herzinsuffizienz) oder eines frühdiastolischen Mitralklappen-Öffnungstones (z.B. bei einer Mitralklappenstenose).

Zusätzliche Schallphänomene, die zwischen den Herztönen auftreten, werden als Herzgeräusche bezeichnet. Diese werden durch Turbulenzen im Blutstrom hervorgerufen und können - müssen aber nicht - Folge eines Herzklappenfehlers sein. Für die Beurteilung von Herzgeräuschen sind der Zeitpunkt ihres Auftretens (systolisch?, diastolisch?), ihr Geräuschcharakter und ihr lautester Wahrnehmungsort (*Punctum maximum*) wichtig.

Ein auf den 1. Herzton folgendes Geräusch nennt man systolisch, ein auf den 2. Herzton folgendes Geräusch diastolisch. Stellt eine Klappe infolge narbiger Schrumpfung ein Durchflusshindernis dar, sprechen wir von einer Stenose; kann sich eine Klappe infolge Gewebszerstörung nach Entzündung nicht mehr vollständig schließen, so sprechen wir von einer Insuffizienz. Eine stenosierte Klappe wird in der Regel in derjenigen Herzphase ein Geräusch verursachen, während der normalerweise Blut hindurchströmt. Eine insuffiziente Klappe wird dagegen dann zu einem Geräusch führen, wenn sie normalerweise dicht schließen sollte, infolge

III. Herzaktion und Druckpuls

der Schlussunfähigkeit aber Blut zurückfließen lässt. Daraus lassen sich den vier Paradebeispielen für Klappenfehler folgende Geräusche zuordnen: Ein systolisches Geräusch tritt bei Taschenklappenstenose oder Segelklappeninsuffizienz, ein diastolisches Geräusch bei Taschenklappeninsuffizienz oder Segelklappenstenose auf.

Eine Klappe kann gleichzeitig stenotisch und insuffizient sein: Ein starrer narbiger Ring kann sich nicht weit genug öffnen (Stenose) und ebenso wenig vollständig schließen (Insuffizienz).

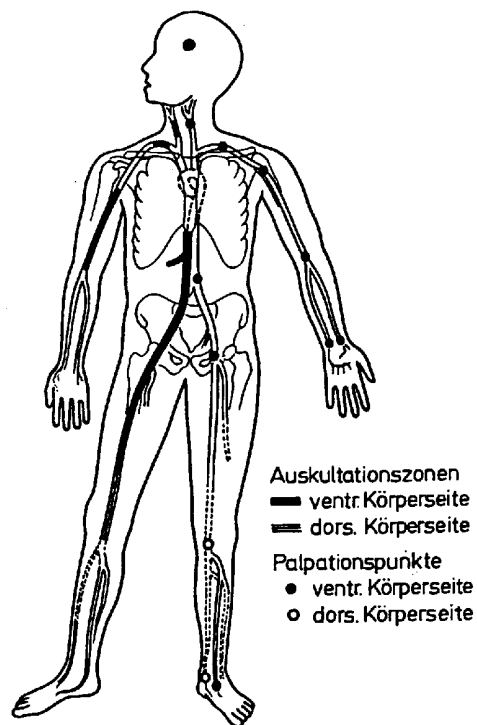
- Aufgaben:**
- 1.1. Inspektion und Palpation des Thorax und Aufsuchen des Herzspitzenstoßes an einer liegenden Versuchsperson
 - 1.2. Auskultation des Herzens an den typischen Auskultationspunkten
 - 1.3. Anhörung von Aufnahmen der normalen Herztöne und von Geräuschen bei Klappenfehlern (Computerpräsentation)

2. Pulspalpation und DOPPLER-Sonographie

2.1. Palpation

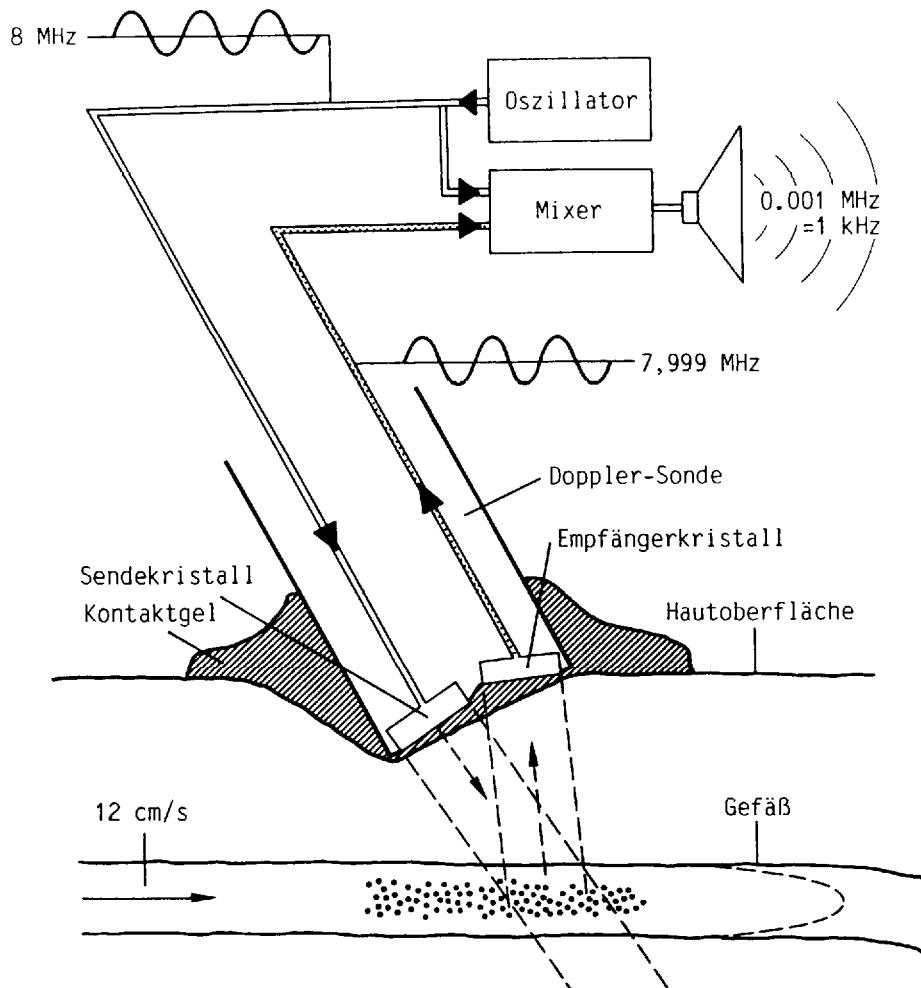
Die vom Herzen ausgehende systolische Druckwelle bewirkt in den peripheren Arterien eine als „Puls“ sicht- und tastbare Ausdehnung der Gefäßwand. Die Palpation des Pulses dient der Erkennung von Frequenz- und Rhythmusanomalien des Herzens und von arteriellen Gefäßverschlüssen. Zudem lassen sich aus der Pulsqualität diagnostische Rückschlüsse ziehen.

Aufgabe: Benennen und palpieren Sie die auf untenstehender Abbildung gekennzeichneten Arterien.



2.2. DOPPLER-Sonographie

Mit einem Gefäß-DOPPLER-Taschengerät soll die Blutströmung in peripheren Gefäßen untersucht werden. Das Gerät arbeitet nach folgendem Messprinzip:



Der Schallkopf (Transducer) des DOPPLER-Gerätes enthält einen Sende- und einen Empfängerkristall. Der Sendekristall wird durch hochfrequenten Wechselstrom in mechanische Schwingungen versetzt, die er als Ultraschall (8 MHz) auf das anliegende Medium überträgt.

Der Ultraschall wird an den Grenzflächen zwischen Geweben unterschiedlicher Dichte reflektiert und vom Transducer wieder empfangen. Bewegen sich diese Grenzflächen, erfährt die Frequenz des reflektierten Ultraschalls eine Veränderung gegenüber der Sendefrequenz. Diese sogenannte DOPPLER-Verschiebung ist proportional zur Geschwindigkeit der reflektierenden Grenzfläche und liegt frequenzmäßig im Hörbereich (80 bis 5000 Hz). Durch diese akustischen Signale kann die Strömungsgeschwindigkeit beurteilt werden: scharfe, kurze Signale deuten auf eine hohe Strömungsgeschwindigkeit; niederfrequente, gleichmäßige Töne charakterisieren eine niedrige Strömungsgeschwindigkeit. Ein hoher Ton entspricht einer schnellen, arteriellen Blutströmung, ein tiefer Ton einem langsamen, venösen Durchfluss. Bei Strömungsstillstand sind keine Signale vorhanden.

III. Herzaktion und Druckpuls

Gefäß-DOPPLER dieser Art dienen in der klinischen Praxis zur Bestätigung vermuteter Gefäßverschlüsse, zur postoperativen Gefäßkontrolle, zur Überprüfung des Venensystems insbesondere der unteren Extremitäten und – als Ultraschallstethoskop – zur Blutdruckmessung, wenn die normalen KOROTKOW-Geräusche nicht hörbar sind (z.B. bei Kleinkindern oder Schockpatienten).

Aufgabe

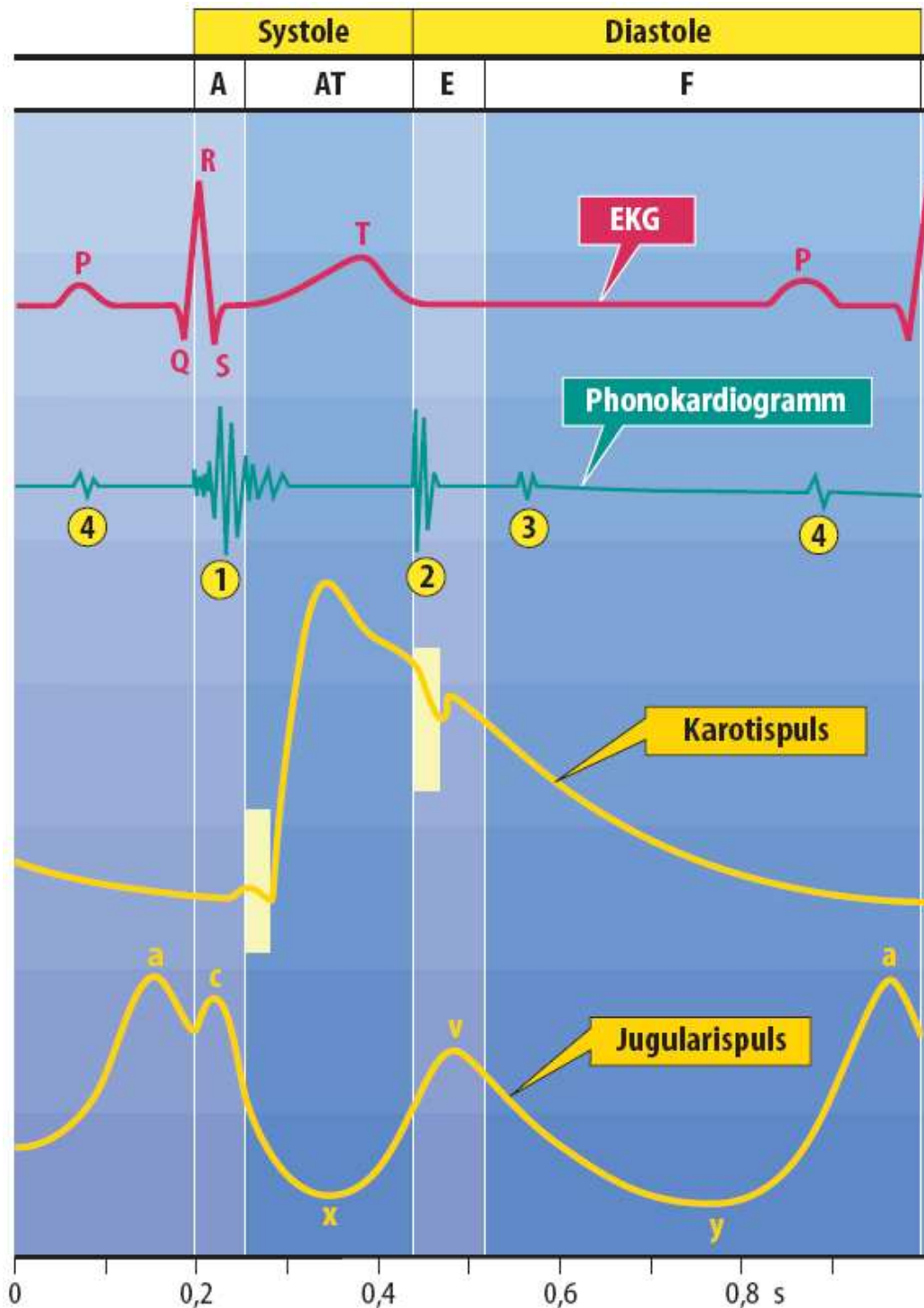
Bestreichen Sie die Transducerspitze mit Gel und führen Sie diese im 45°-Winkel zur Längsrichtung auf die oberflächennahen Gefäße des Armes. Üben Sie die Geräuschunterscheidung!

Beschreiben Sie die Signale für die durchgängige Strombahn der *A. radialis*, der *V. basilica* und der peripheren Kapillaren in den Fingerspitzen.

Ergebnisse:

3. Simultane Registrierung des EKG, der Herztöne (Phonokardiographie) und der Druckpulswelle (A. carotis; Sphygmographie)

Durch die simultane Aufzeichnung von EKG, Phonokardiogramm und zentraler Druckpulskurve ist es möglich, die einzelnen Phasen der Herzaktion zeitlich zu bestimmen.



(aus: Antoni H. – Mechanik der Herzaktion. In: Schmidt R.F., Thews G., Lang F. (Hrsg.) Physiologie des Menschen, 28. Aufl.; Springer, Berlin, 2000, 447-471)

III. Herzaktion und Druckpuls

Phasen der Herzaktion

Die Dauer des Einzelzyklus ist gleich dem zeitlichen RR-Abstand im EKG. Die Systolenzeit ist ungefähr die Zeitspanne zwischen dem Beginn der R-Zacke und dem Beginn des 2. Herztones (Die R-Zacke wird statt der Q-Zacke genommen, um eine Korrektur für die elektromechanische Latenz vorzunehmen). Die Diastolendauer entspricht der Differenz zwischen der Gesamtzyklusdauer und der Systolendauer. Die Anspannungsphase einschließlich der Umformungsphase errechnet sich vom Beginn der R-Zacke bis zum Anstieg der Carotispulskurve, vermindert um die zentrale Pulswellenlaufzeit. Die zentrale Pulswellenlaufzeit ergibt sich aus dem zeitlichen Abstand der Inzisur der gegenüber dem Beginn des 2. Herztones. Die Austreibungsphase entspricht der Zeit zwischen dem Beginn des Steilanstieges und der Inzisur in der Carotispulskurve.

Normalwerte

Gesamtzyklusdauer	700 - 900 ms
Systolendauer	300 - 400 ms
Diastolendauer	400 - 500 ms
Anspannungszeit	50 - 100 ms
Austreibungszeit	280 - 320 ms
Zentrale Pulswellenlaufzeit	20 - 40 ms

Aus der zentralen Pulswellenlaufzeit lässt sich – bei Abmessung der zentralen Pulswellenlaufstrecke (2. ICR re. – Pulsabnahmestelle, Gefäßverlauf imitieren!) – außerdem die zentrale Pulswellengeschwindigkeit bestimmen (Normalwert 3 - 5 m/s).

Die Pulswellengeschwindigkeit (PWG)

Die PWG gibt die Geschwindigkeit an, mit der sich der Druckpuls über die Arterien fortbewegt. Sie darf nicht mit der Strömungsgeschwindigkeit des Blutes verwechselt werden. Die PWG gibt Hinweise auf die Gefäßwandelastizität des arteriellen Systems: Der Volumenelastizitätsmodul κ , definiert als $\kappa = V \times \Delta P / \Delta V$ (V = Volumen des Systems, ΔP = Druckänderung hervorgerufen durch die Volumenänderung ΔV), ist über die Dichte ρ (im Blut 1060 kg/m³) aus der $PWG = c$ zu berechnen: $\kappa = \rho \times c^2$. Die Arterien werden zur Peripherie hin steifer. Damit nimmt die PWG zur Peripherie hin zu.

Zudem kann man den Volumenelastizitätskoeffizienten E' berechnen: $E' = \Delta P / \Delta V$. Je größer E' , desto steifer („starrer“) ist die Gefäßwand. Im arteriellen System ist E' etwa 200mal so hoch wie im Niederdrucksystem. E' entspricht dem Reziprokwert der Compliance („Weitbarkeit“; s. in der Atmungsphysiologie Beschreibung der Compliance von Lunge und Thorax).

3.1. Versuchsbeschreibung

Phonokardiographie

Ein empfindliches Mikrophon wird am ERBschen Punkt aufgesetzt und die Herztöne nach Vorverstärkung und Filterung registriert. Bei der klinischen Phonokardiographie werden verschiedene Frequenzfilter verwendet, die es ermöglichen, unterschiedliche Schallkomponenten abzugrenzen und Herzgeräusche besser zu klassifizieren.

Pulskurvenregistrierung (Sphygmographie)

Es soll die Druckpulskurve an der *A. carotis communis* aufgenommen werden. Die Versuchsperson legt sich entspannt auf eine stabile Unterlage (Untersuchungsliege). Die *A. carotis* wird palpiert, vorsichtig der Messfühler senkrecht aufgesetzt und mit Muffen fixiert. Die Amplitude des Messsignals wird mit Hilfe des Verstärkers soweit erhöht, bis die Signallampe gerade nicht mehr aufleuchtet.

(Technische Erläuterung: Man verwendet als Pulsabnehmer einen Messfühler, der auf Längenänderungen reagiert. Diese bewirken an dem angeschlossenen Kondensator Kapazitätsänderungen, die in elektrische Signale umgewandelt und aufgezeichnet werden.)

Die Carotispuls-Druckkurve zeigt normalerweise folgendes Bild: Nach einer kleinen Vorschwingung folgt der Steilanstieg (anakroter Schenkel) bis zu einem ersten Gipfel; nach einem kurzen Abfall kann die Kurve noch einen zweiten Gipfel erreichen, fällt dann aber ab (katakroter Schenkel). Die sogenannte Inzisur, die dem Schluss der Aortenklappe entspricht, ist bei blutiger Druckregistrierung als scharfe Zacke im katakroten Schenkel zu erkennen. Bei der unblutigen Registrierung ist das Kurvenbild infolge der Dämpfung durch die Weichteile des Halses und die Schwingungseigenschaften des Pulsaufnehmers viel verwaschener, so dass die Inzisur nicht immer leicht zu erkennen ist. In den meisten Fällen kann man im katakroten Schenkel ein besonders steiles Stück identifizieren, dessen Übergang einem flacheren Teil der Inzisur entspricht. Fast nie ist der tiefste Punkt im katakroten Schenkel mit der Inzisur identisch.

Die Carotispuls-Druckkurve kann wertvolle Hinweise auf Aortenklappenfehler geben. So gibt die Halbgipfelzeit, das ist die Zeit, innerhalb derer die Carotiskurve 50% des Anstiegs bis zum ersten Gipfel benötigt, ein grobes Maß für die Druckerhöhungsgeschwindigkeit in der Carotis (siehe Abb. auf der folgenden Seite). Bei einer Aortenklappenstenose ist der Blutdruckanstieg verlangsamt und die Halbgipfelzeit verlängert; bei der Aortenklappeninsuffizienz ist die Inzisur verkleinert.

III. Herzaktion und Druckpuls

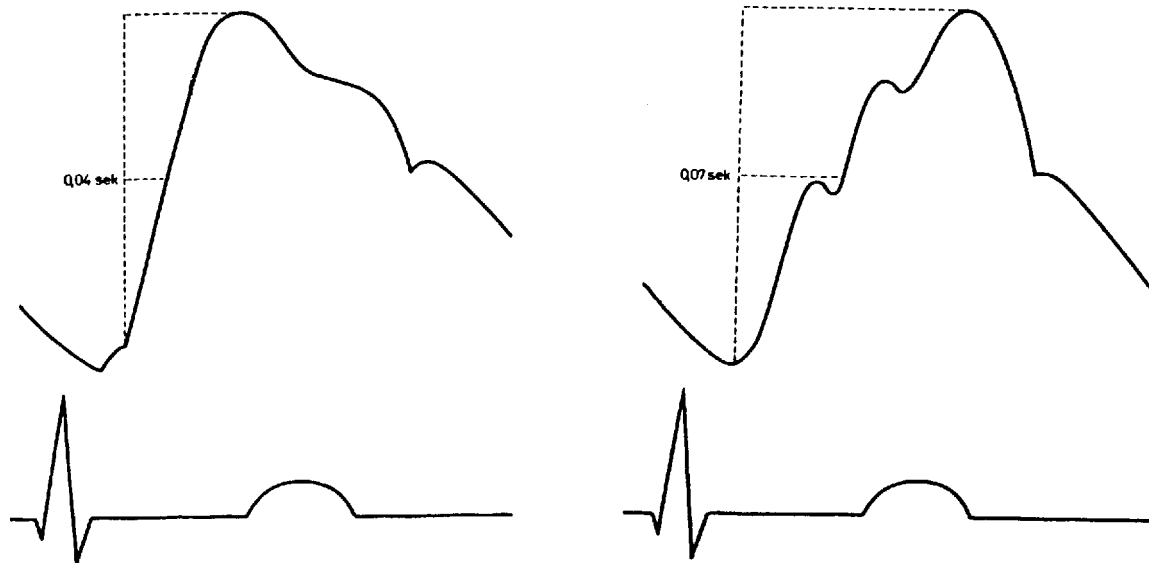


Abb.: Die Carotispulskurve in Normalform (links) und bei valvulärer Aortenstenose mit verlängertem Anstieg (Halbgipfelzeit $> 0,06$ s) und sägezahnähnlichen Schwingungen („Hahnenkammphänomen“, rechts)

3.2. Durchführung

Setzen Sie das Herzmikrophon auf den ERBschen Punkt. Legen Sie den Pulsabnehmer (A. *carotis*) und die EKG-Elektroden (II. Ableitung EINTHOVEN) an. Die Messung wird mit Hilfe eines Computer-Programms durchgeführt. Schließen Sie dazu die Messwertaufnehmer folgendermaßen an den Analog-Digital-Wandler an:

Kanal 1 >> Carotis Puls

Kanal 2 >> EKG

Kanal 3 >> Herzton

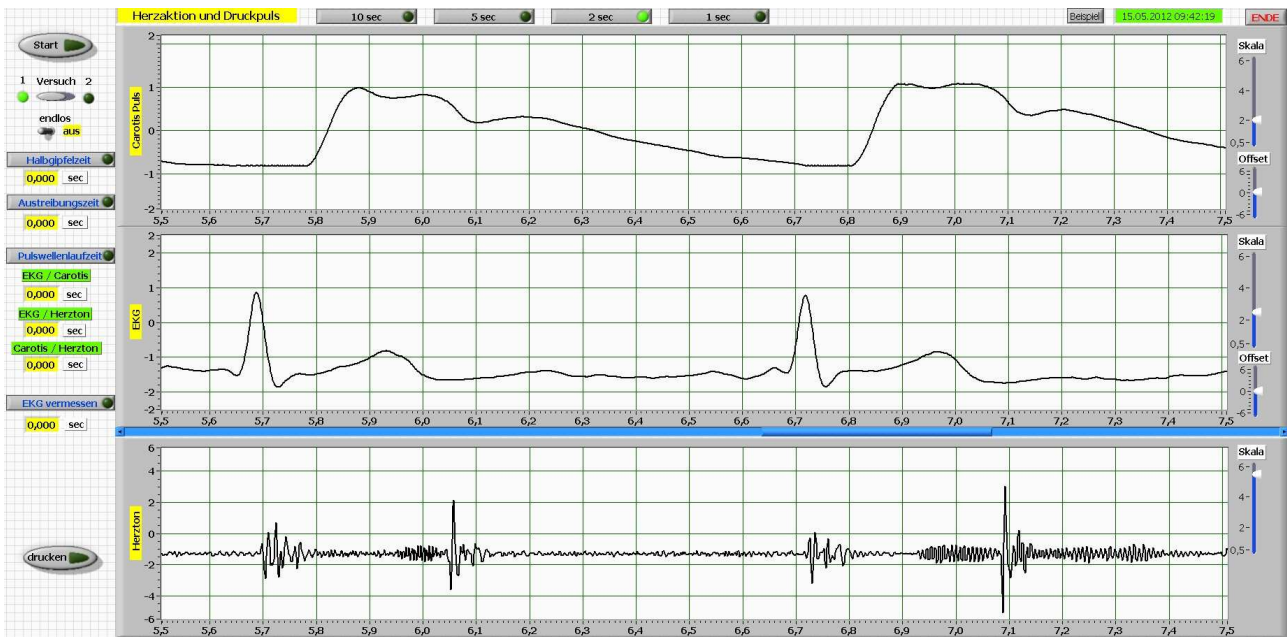
Verbinden Sie die Erdbuchsen der einzelnen Messwertaufnehmer mit der ADC-Erde.

Wählen Sie am PC den Versuch 1.

Die Versuchsperson muss in Expirationsstellung den Atem anhalten. Die Strecke A. *carotis* – 2. ICR ist abzumessen (anatomischen Verlauf imitieren!).

Starten Sie nun das Programm und überprüfen Sie, ob die Verstärkung und der Nullabgleich richtig eingestellt sind. Hierzu können Sie den Schalter „endlos“ einschalten, um eine kontinuierliche Messung zu erhalten.

III. Herzaktion und Druckpuls



Schalten Sie zur eigentlichen Messung den „endlos“ Modus wieder aus. Das Programm misst dann in einem Durchlauf 10 Sekunden lang die Signale. Wählen Sie nach der Messung einen geeigneten Zeitraum aus den 10 Sekunden. Bestimmen Sie nacheinander die „Halbgipfelzeit“ und „Austreibungszeit“ in der Carotispuls-Druckkurve, die „Pulswellenlaufzeit“ und vermessen Sie das EKG. Dazu werden je nach Versuch entsprechende Cursors eingeblendet, mit denen Sie die Messwerte ermitteln können. Links wird Ihnen die zeitliche Differenz zwischen den einzelnen Cursorpositionen in Sekunden eingeblendet. Tragen Sie diese Werte in Ihr Skript ein, und berechnen Sie hieraus die gesuchten Größen (siehe Protokollbogen auf der nächsten Seite). Alternativ können Sie die Werte mit Hilfe eines Ausdrucks ermitteln.

III. Herzaktion und Druckpuls

3.3. Auswertung

Name der/s Probandin/en:

Alter der/s Probandin/en: Jahre

Art der EKG-Ableitung:

rechte/linke *A. carotis*:

Pulswellen-Laufstrecke: cm

Position des Herzmikrophons:

Herzfrequenz: min^{-1}

Dauer des ausgewählten Herzzyklus: ms

Systole dieses Zyklus: ms

Diastole dieses Zyklus: ms

Pulswellenlaufzeit: ms

Anspannungsphase: ms

Austreibungszeit: ms

Halbgipfelzeit: ms

Pulswellengeschwindigkeit. $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Geben Sie an, welche Ergebnisse von den Normalwerten abweichen!

4. Bestimmung der peripheren Pulswellengeschwindigkeit (Infraton-Pulsoszillographie)

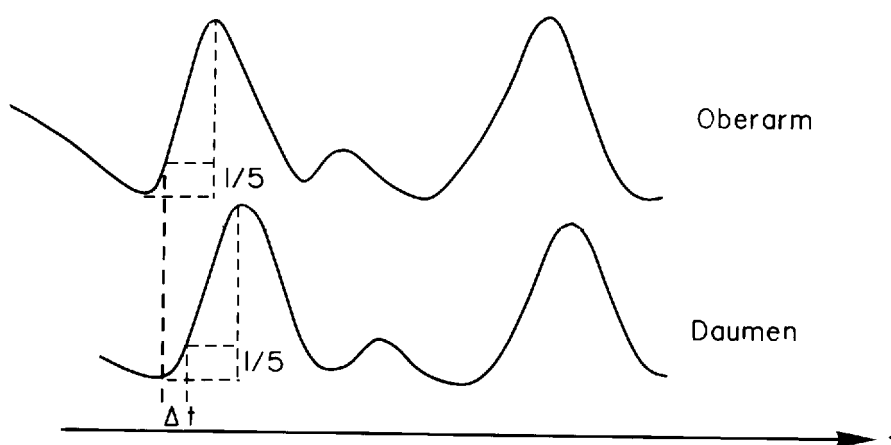
Die Pulsoszillographie stellt ebenfalls ein qualitatives Verfahren zur Registrierung arterieller Pulsationen dar. Im Gegensatz zur arteriellen Druckpulschreibung, bei der die Pulsationen gezielt von einem bestimmten Gefäß abgeleitet werden, werden bei der Pulsoszillographie mit einer die Extremität umschließenden Manschette Volumenänderungen aller Gefäße im Messbereich erfasst. Da die Druck- und Volumenamplitude in den kleineren arteriellen und den venösen Gefäßen gering ist, wird das Pulsoszillogramm trotzdem nur von den Pulsationen der großen Arterien entscheidend beeinflusst. Die pulsatorische Querschnittsänderung hängt von der Blutdruckamplitude und der Gefäßelastizität ab. Zudem wird sie vom Gefäß- und Muskeltonus beeinflusst.

Die synchrone, symmetrische Pulsoszillographie (Seitenvergleich) dient in der klinischen Praxis der Lokalisation von Gefäßstenosen. Außerdem ist es mit geeigneten Tests (z.B. Wärmetest, Stautest, Arbeitstest) möglich, zwischen organischen und funktionellen Durchblutungsstörungen zu unterscheiden.

Aufgabe

Registrieren Sie die Pulsoszillationen am Oberarm und Daumen mit Hilfe des Computer-Programms, indem Sie „Versuch 2“ wählen und die beiden Messfühler an Kanal 1 (Oberarm) + 2 (Daumen) anschließen. Bestimmen Sie die zeitliche Verzögerung, mit der die Pulswelle an beiden Abnahmestellen auftritt. Für den zeitlichen Vergleich dient der Moment, an dem $\frac{1}{5}$ des Maximalanstiegs des ersten Pulsgipfels erreicht ist (siehe folgende Abb.).

Starten Sie nun das Programm und überprüfen Sie, ob die Verstärkung und der Nullabgleich richtig eingestellt sind. Hierzu können Sie den Schalter „endlos“ einschalten, um eine kontinuierliche Messung zu erhalten. Zur eigentlichen Messung schalten Sie den „endlos“ Modus wieder aus. Das Programm misst dann in einem Durchlauf 10 Sekunden lang die Signale. Wählen Sie nach der Messung einen geeigneten Zeitraum aus den 10 Sekunden. Blenden Sie jetzt die Cursors über den Schalter „Pulswellenlaufzeit“ ein und positionieren Sie die Cursors auf die Minima und Maxima der Kurven. Die Position $\frac{1}{5}$ des Maximalanstiegs wird vom Computer-Programm ermittelt. Den zeitlichen Unterschied zwischen den Kurven können Sie links ablesen. Berechnen Sie die periphere Pulswellengeschwindigkeit (Normalwert 8 - 15 m/s) unter Berücksichtigung der Pulswellenlaufstrecke. Tragen Sie die gefundenen Werte in Ihr Skript ein.



5. Konstruktion von Druck-Volumen-Diagrammen des linken Ventrikels

Während des Kontraktionszyklus treten im linken wie im rechten Ventrikel charakteristische Druck- und Volumenänderungen auf, die in Form eines Druck-Volumen-Diagramms dargestellt werden können. Am Ende der Diastole sind beide Ventrikel mit je 120 bis 140 ml Blut gefüllt. Der zugehörige enddiastolische Druck beträgt im linken Ventrikel 6 bis 10 mmHg, im rechten Ventrikel 2 bis 6 mmHg. Da die diastolischen Drücke in der Aorta und in der *A. pulmonalis* weit über diesen Werten liegen, sind die Klappen der entsprechenden Ausstrombahnen geschlossen.

Mit Einsetzen der Ventrikelsystole und beginnendem Druckanstieg in den Herzkammern schließen sich die Atrioventrikularklappen. Während der 1. Phase der Systole, der Anspannungsphase, wird der Ventrikeldruck bei konstantem Ventrikelvolumen erhöht, das Myokard kontrahiert sich isovolumetrisch. Sobald der Ventrikeldruck den Druck der nachgeschalteten Strombahn überschreitet, öffnet sich die Aorten- bzw. die Pulmonalklappe, und es beginnt die Austreibungsphase der Systole.

Durch eine auxotonische Kontraktion, die durch eine Drucksteigerung bei gleichzeitiger Volumenabnahme gekennzeichnet ist, wird vom linken wie vom rechten Ventrikel ein Volumen von ca. 70 ml ausgeworfen. Der Anteil des Schlagvolumens am enddiastolischen Ventrikelvolumen, die Auswurffraktion (Ejektionsfraktion), beträgt bei körperlicher Ruhe normalerweise > 55 %. Die maximalen Drücke liegen in der linken Herzkammer zwischen 120 und 140 mmHg und in der rechten Herzkammer zwischen 20 und 30 mmHg. Die Systole der Ventrikel endet mit dem Schluss der Aorten- und der Pulmonalklappe, wenn nach Einsetzen der Erschlaffung der Ventrikeldruck unter den in der Aorta bzw. in der *A. pulmonalis* herrschenden Druck abfällt.

Die weitere Erschlaffung des Ventrikelmyokards führt in beiden Kammern zur isovolumetrischen Druckabnahme; das in den Ventrikeln verbliebene Blutvolumen beträgt je ca. 60 ml. Die Entspannungsphase der Diastole endet, wenn der Ventrikeldruck unter den Druck in den Vorhöfen abgesunken ist, die Atrioventrikularklappen sich öffnen und, der Druckdifferenz folgend, Blut aus den Vorhöfen in die Ventrikel strömt. Am Ende der Füllungsphase der Diastole wird der Blutstrom in die Ventrikel durch die Vorhofkontraktion unterstützt.

Bei akut auftretenden Druck- und Volumenbelastungen kann sich das Myokard durch intrakardiale Mechanismen anpassen. Nach Erhöhung der Vordehnung ist es den Myokardfasern möglich, größere Drücke zu entwickeln und eine größere Volumenabnahme herbeizuführen.

Dieser – zuerst von OTTO FRANK und ERNEST STARLING beschriebene – Zusammenhang ermöglicht es dem Herzen, ein vergrößertes venöses Angebot („preload“) durch die Erhöhung des Schlagvolumens oder die Zunahme des Widerstandes in der Ausstrombahn („afterload“) mit einer stärkeren Druckentwicklung zu beantworten. Da die Anpassungsvorgänge im Myokard kurzfristig nach Erhöhung der Belastung durch die Vergrößerung des enddiastolischen Ventrikelvolumens ausgelöst werden und jeweils auf das rechte oder linke Herz beschränkt bleiben können, führen sie zu einer ständigen Anpassung des Schlagvolumens des einen Ventrikels an das des anderen.

Zellphysiologische Mechanismen

Beim FRANK-STARLING-Mechanismus führt die stärkere Ventrikeldehnung zur Zunahme der Kontraktionskraft. Die Ca^{2+} -Empfindlichkeit des kontraktile Systems nimmt nämlich mit der Länge der Myozyten zu (steigende Affinität des Troponins für Kalzium bei Faserdehnung). Anders als früher angenommen, spielt die Optimierung des Überlappungsbereiches der Aktin- und Myosinfilamente (Sarkomerenlänge $\approx 2,1 \mu\text{m}$) nur eine untergeordnete Rolle.

III. Herzaktion und Druckpuls

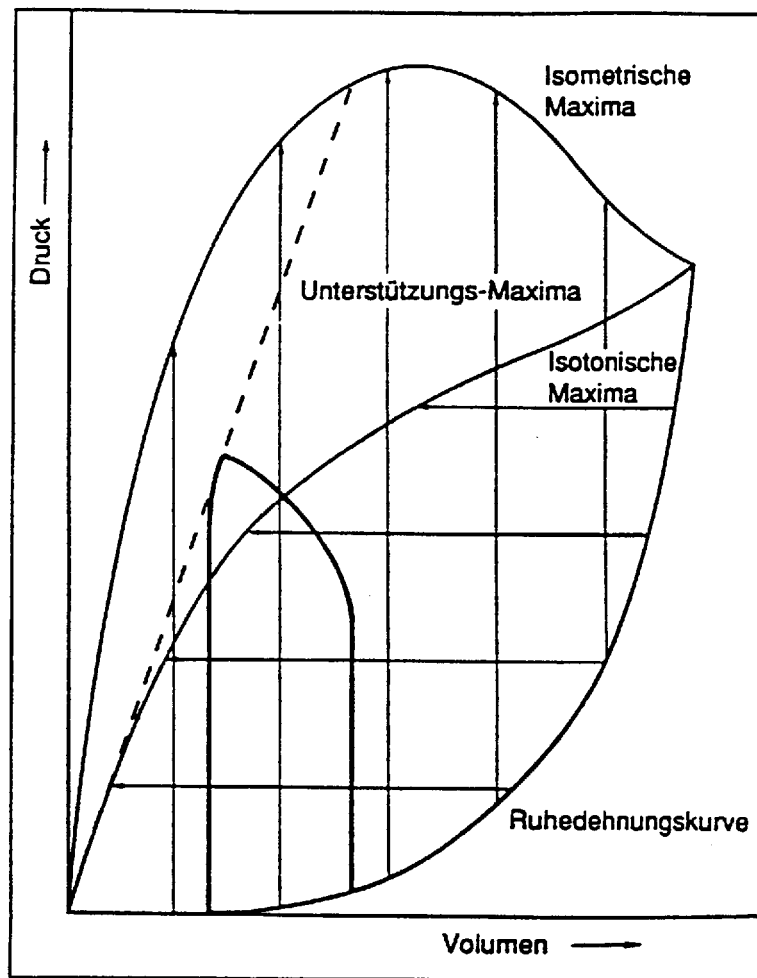


Abb.: Schematische Darstellung der Druck- und Volumenänderungen (Arbeitsdiagramm) der Ventrikel eines normalen Herzens

Ruhedehnungskurve = Druck-Volumen-Beziehung im entspannten Herzen

Kurve der iso(volu)metrischen Maxima = maximale Druckentwicklung bei iso(volu)metrischer Kontraktion des Myokards in Abhängigkeit von der Ventrikelfüllung

Kurve der isotonischen (isobaren) Maxima = maximale Volumenabnahme bei isotonischer Kontraktion des Myokards in Abhängigkeit von der Ventrikelfüllung

Kurve der Unterstützungsmaxima = maximale Druckentwicklung und Volumenabnahme bei vorgegebener Ventrikelfüllung während der Austreibungsphase

III. Herzaktion und Druckpuls

5.1. Übung

Bei einem isolierten Säugetierherzen, dessen Größe etwa der des normalen menschlichen Herzen entspricht, werden folgende Werte im linken Ventrikel gemessen:

Füllungsvolumen (ml)	Füllungsdruck (mmHg)	V_{\min} (ml)	P_{\max} (mmHg)
25	1,2	4	96
50	2,3	6	153
75	3,7	7	199
100	6,2	10	238
125	9,5	15	269
150	15,3	25	285
175	26,2	41	293
200	46,5	68	291
225	92,5	135	280

V_{\min} = minimales Volumen bei isotonischer Kontraktion
 P_{\max} = maximaler Druck bei isovolumetrischer Kontraktion

Zur Berechnung der Druck-Volumen-Arbeit:

$$1 \text{ mmHg} = 133 \text{ N/m}^2 \quad 1 \text{ ml} = 10^{-6} \text{ m}^3$$

III. Herzaktion und Druckpuls

Aufgabe 5.1.1

Konstruieren Sie auf der folgenden Seite im P-V-Diagramm die Ruhedehnungskurve sowie die Kurven der isotonischen und isovolumetrischen Maxima.

Aufgabe 5.1.2

Tragen Sie die Druck- und Volumenänderungen im linken Ventrikel für einen Herzzyklus unter normalen Bedingungen in das P-V-Diagramm ein.

EDV	130 ml
P_d	80 mmHg
max. P_s	130 mmHg
Schluss der Aortenklappe bei	110 mmHg

EDV = enddiastolisches Volumen
 P_d = diastolischer Druck in der Aorta
max. P_s = maximaler Druck während der Systole

Warum schließt die Aortenklappe?

Aufgabe 5.1.3

Konstruieren Sie mit anderen Farben in demselben Diagramm „Druck-Volumen-Schleifen“ für die Bedingungen

a) bei erniedrigter Vorlast	EDV = 80 ml
b) bei erhöhter Vorlast	EDV = 180 ml

(Berücksichtigen Sie dabei die gleichen Druckwerte wie bei Aufgabe 5.1.2.)

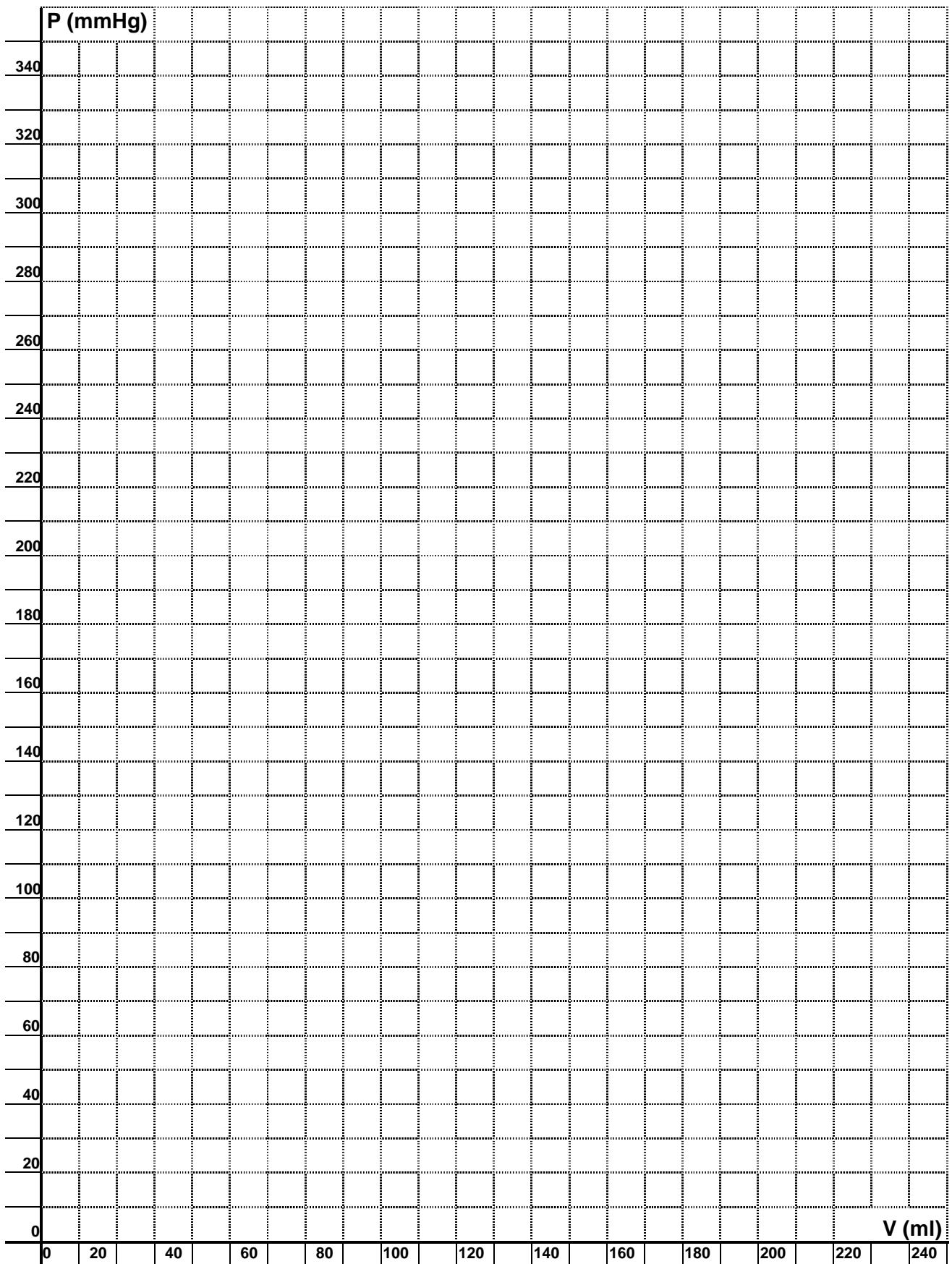
Aufgabe 5.1.4

Lesen Sie die zugehörigen Werte für das Schlagvolumen (SV) ab, und berechnen Sie für die Bedingungen bei erniedrigter, normaler und erhöhter Vorlast die Druck-Volumen-Arbeit für den linken Ventrikel nach: $W = [P_{m, \text{Austreibungsphase}} - P_{m, \text{Füllungsphase}}] \times SV$ (P_m = mittlerer Druck). Tragen Sie die Ergebnisse in die Tabelle auf der übernächsten Seite ein.

Aufgabe 5.1.5

Tragen Sie auf der übernächsten Seite im Diagramm die Schlagvolumina als Funktion der vorgegebenen enddiastolischen Volumina auf, und berechnen Sie die Ejektionsfraktionen. Welcher Zusammenhang lässt sich aus der Graphik erkennen?

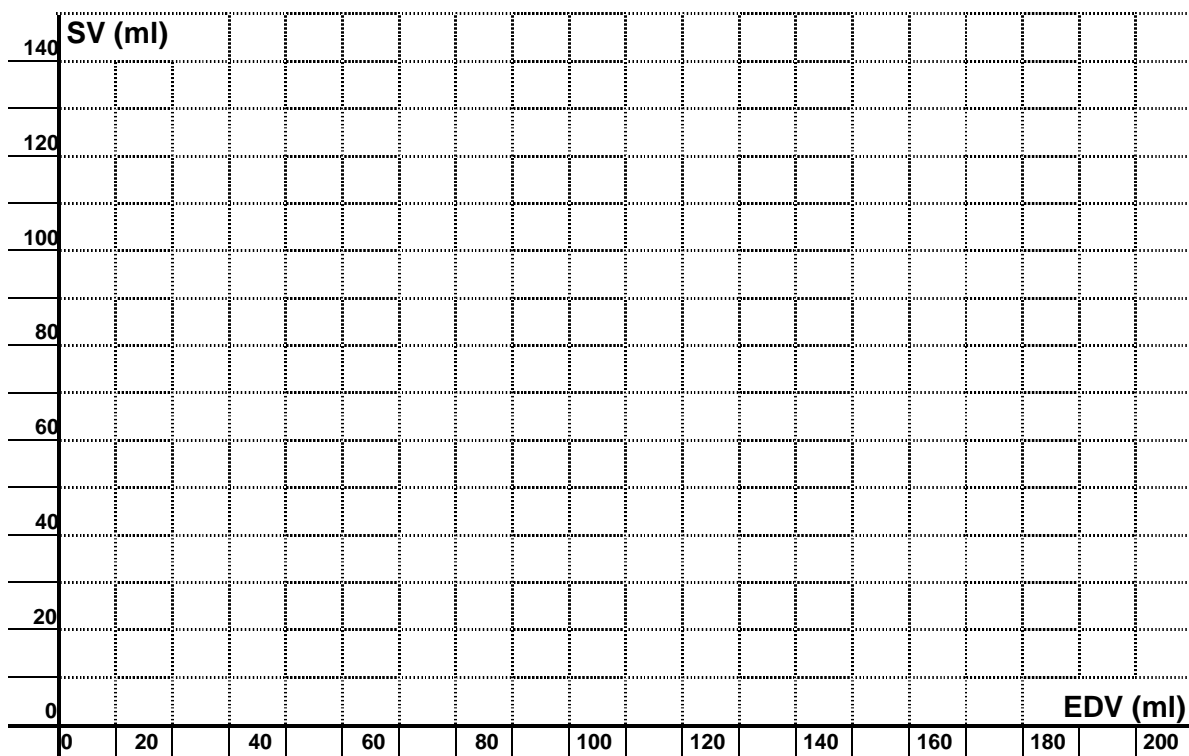
III. Herzaktion und Druckpuls



III. Herzaktion und Druckpuls

Tabelle: Ergebnisse der Aufgaben 5.1.4 und 5.1.5

EDV (ml)	80	130	180
P_d (mmHg)	80	80	80
max. P_s (mmHg)	130	130	130
Schluss der Aortenklappe (mmHg)	110	110	110
SV (ml)			
P_{mA} = mittlerer Druck in der Auswurfphase (mmHg)			
P_{mF} = mittlerer Druck in der Füllungsphase (mmHg)			
$P_{mA} - P_{mF}$ (mmHg)			
$P_{mA} - P_{mF}$ (N/m ²)			
Druck-Volumen-Arbeit: W (N × m)			
Ejektionsfraktion			



Seminarthemen „Herzaktion und Druckpuls“

1. Mechanik des Herzens

- Funktionszyklus des Herzens
- Äußere Signale der Herztätigkeit (Herzschlag)

2. FRANK-STARLING-Diagramme

- Druck-Volumen-Beziehung
- Anpassung des Herzens an wechselnde Belastungen

3. Energiestoffwechsel und Herzfunktion

- Herzarbeit und Sauerstoff- bzw. Nährstoffverbrauch
- Myokarddurchblutung

4. Gefäßsystem

- Arterielle Hämodynamik (Druckpuls, Pulswellengeschwindigkeit, Pulswelle)