

Name: _____

Praktikumsleiter/~in: _____

Matrikel: _____

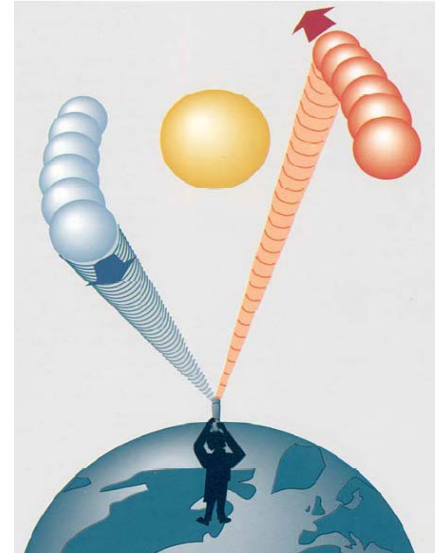
Unterschrift/Stempel: _____

Datum: _____

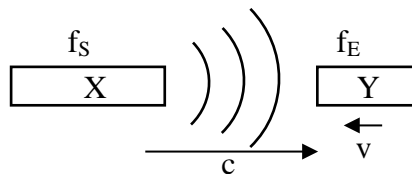
Aufgabe VI: Kreislauf II - Blutströmungsmessungen mit dem Ultraschall-Doppler-Verfahren

1. Einführung

Der Dopplereffekt begegnet uns im Alltag sehr häufig. Steht man z. B. an einer Straße und fährt ein Auto mit konstanter Geschwindigkeit vorüber, so empfindet man beim sich nähernden Fahrzeug ein helleres Geräusch als beim sich entfernenden Fahrzeug, obwohl der Motor stets das gleiche Geräusch produziert. Die Entdeckung des Dopplereffektes geht auf das Jahr 1842 zurück: Christian Johann Doppler (1803-1853) beobachtete bei umeinander kreisenden Doppelsternen eine Rotverschiebung, wenn sie sich vom Beobachter entfernen, und eine Blauverschiebung, wenn sie sich dem Beobachter nähern. Er erklärte diese Beobachtung durch den später nach ihm benannten Dopplereffekt: Ein Sender X sendet mit der Frequenz f_S Wellen aus, die sich mit der Geschwindigkeit c ausbreiten. Bewegt sich ein Empfänger Y mit der Geschwindigkeit v genau auf den Sender X zu und gilt ferner $v \ll c$, so übersteigt die empfangene Frequenz f_E die gesendete Frequenz f_S um den Betrag $f_S v/c$. Dieser Term wird Dopplerfrequenz genannt.



Quelle: http://www.elcat.de/download/public/public_downloads/doppler-sonographie.pdf



$$f_E = f_S + f_S \cdot v/c = f_S + \Delta f \quad (1)$$

Umgekehrt ergibt sich: Entfernen sich Sender und Empfänger voneinander, so gilt

$$f_E = f_S - f_S \cdot v/c = f_S - \Delta f \quad (2)$$

Den Dopplereffekt macht man sich bei der Ultraschall-Dopplersonographie zur nicht-invasiven Bestimmung der Geschwindigkeit der Blutströmung zunutze. In den Ultraschallköpfen sind sowohl ein Sender als auch ein Empfänger für Ultraschallwellen (2-8 MHz) untergebracht. Die Ultraschallwelle gelangt zuerst zu den Blutzellen. Die dort empfangene Frequenz ist bereits um Δf höher bzw. niedriger. Die Ultraschallwelle wird dann an den Blutzellen reflektiert, und das Echo gelangt in den Schallkopf zurück, wobei ebenfalls eine höhere bzw. niedrigere Frequenz registriert wird. Der Doppler-Effekt findet somit zweimal hintereinander statt, man multipliziert deshalb mit dem Faktor 2, d. h. es gilt:

$$\Delta f = 2 \cdot f_S \cdot v/c$$

(mit $c_{\text{Blut}} \sim 1500 \text{ m/s}$).

Würde bspw. ein Sender eine Frequenz f_S von 8 MHz aussenden und käme es zum Registrieren einer Ultraschall-welle f_E von 8,001 MHz, so würde die Dopplerverschiebung insgesamt 0,001 MHz bzw. 1 kHz betragen. Gemessene Dopplerfrequenzen liegen im hörbaren Bereich (50 Hz bis 15 kHz). Wie die Abbildung zeigt, befindet sich die Achse von Sender und Empfänger in einem Winkel α zur Gefäß-Längsachse. Dies bewirkt, dass nicht die Geschwindigkeit v , sondern nur die

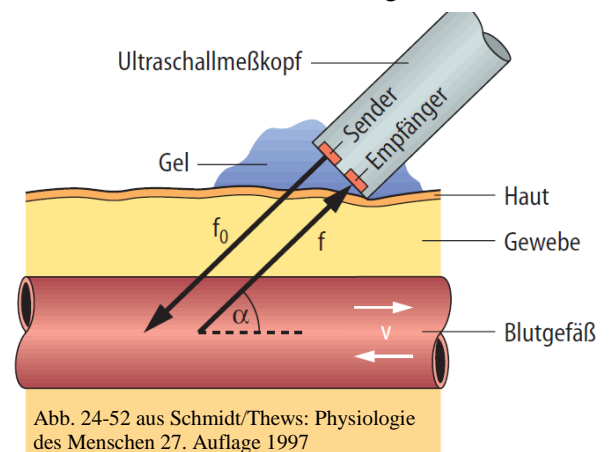
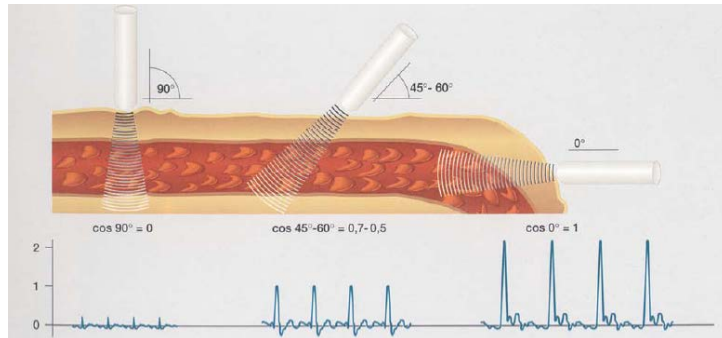


Abb. 24-52 aus Schmidt/Thews: Physiologie des Menschen 27. Auflage 1997

Geschwindigkeitskomponente ($v \cdot \cos \alpha$) in Richtung auf den Ultraschallkopf bei der Messung wirksam wird. Für die gemessene Dopplerfrequenz Δf gilt somit der Zusammenhang:

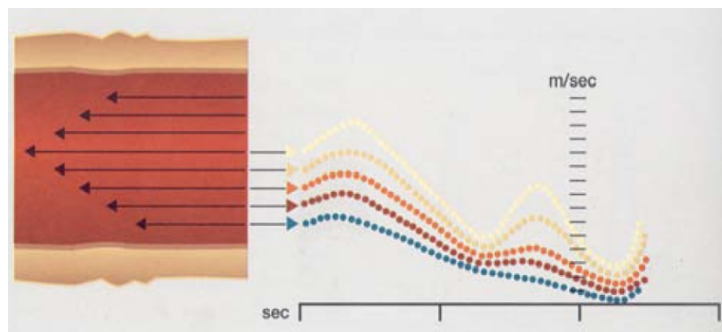
$$\Delta f = 2 \cdot f_s \cdot v/c \cdot \cos \alpha \quad (3)$$

Die Größe der Dopplerfrequenz Δf hängt in hohem Maße vom Winkel α ab: Eine flache Stellung des Ultraschallkopfes zur Gefäßachse bewirkt ein Signal mit großer Dopplerfrequenz, bei senkrechter Stellung zur Gefäßachse lässt sich keine Dopplerfrequenz messen. Die Geschwindigkeit der Blutzellen kann also nur dann korrekt ermittelt werden, wenn der am Gerät vorgegebene Winkel vom Untersuchenden eingehalten wird.

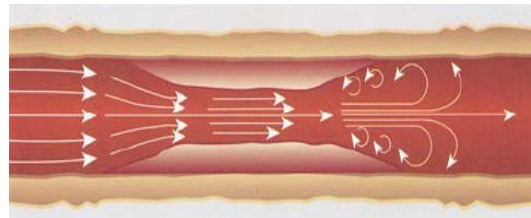


Quelle: http://www.elcat.de/download/public/public_downloads/doppler-sonographie.pdf

Nicht alle Blutzellen eines Gefäßes besitzen die gleiche Geschwindigkeit. Das empfangene Signal besteht aus einer Mischung vieler Dopplerfrequenzen Δf . Mittels einer im Gerät implementierten „Fast Fourier Transformation“ (FFT) wird die Zusammensetzung der einzelnen Frequenzen im Messsignal ermittelt. Die FFT ist ein mathematischer Algorithmus,



der das Messsignal in eine Summe von Sinusfunktionen verschiedener Dopplerfrequenzen und Amplituden (Gewichte) zerlegt (siehe hierzu auch den Praktikumsversuch „EEG“). Zum Zeitpunkt des maximalen Flusses zeigt eine schmale Verteilung der Dopplerfrequenzen somit eine Ähnlichkeit der Geschwindigkeiten der Blutzellen im Gefäß an, während eine breite Verteilung große Unterschiede der Geschwindigkeiten anzeigt. Laminare Strömungen produzieren trotz der bezüglich der Axialströmung langsameren Randströmung eine eher schmale Verteilung der Frequenzen, während turbulente Strömungen (z. B. poststenotisch) eine breitere Verteilung erzeugen, häufig auch mit negativen Dopplerfrequenzen, die durch zurückströmende Blutzellen in den Turbulenzen bewirkt werden.



In der Praxis werden verschiedene Dopplerverfahren eingesetzt, die ein- oder vielkanalig sind und aus einer gepulsten oder kontinuierlichen Schallquelle bestehen können. Vielkanalige Verfahren werden bildgebend eingesetzt. In den folgenden Versuchen wird ein einkanaliges cw-Verfahren (continuous wave) zur Messung des Frequenz-Zeit-Spektrums verwendet (Messgerät „rheoscreen“ der Firma medis; Medizinische Messtechnik GmbH, Ilmenau). Abhängig von der Sendefrequenz haben Ultraschallsonden unterschiedliche Arbeitsbereiche. Die 8-MHz-Sonde hat einen Arbeitsbereich von 0,5-2,5 cm und sollte deswegen für oberflächennah gelegene Gefäße verwendet werden. Die 4-MHz-Sonde hat einen Arbeitsbereich von 2-5 cm und sollte daher für entsprechend tiefer liegende Gefäße eingesetzt werden (A. carotis communis). Bei bekanntem Messwinkel berechnet die Software aus den Dopplerfrequenzen die Strömungsgeschwindigkeiten der einzelnen Blutkörperchen in cm/s und man erhält die Strompulskurve.

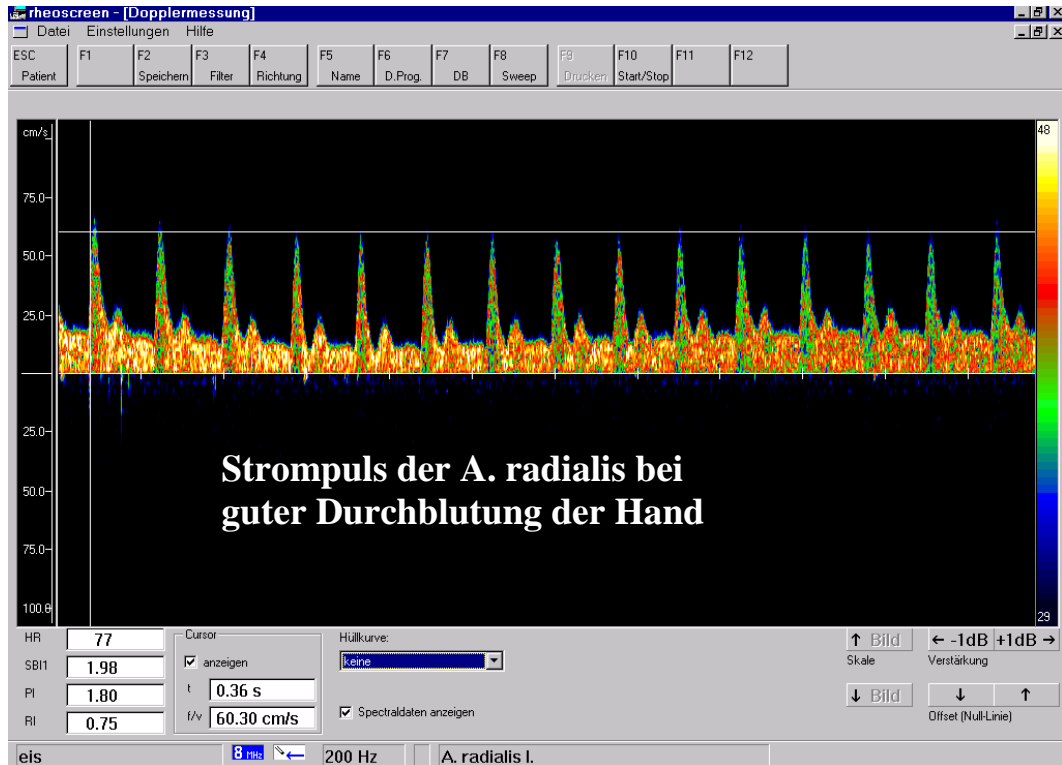
2. Aufgabenstellung

1. Aufzeichnen der Strompuls der Arteria radialis, A. brachialis und A. carotis communis
2. Veränderungen des Strompulses bei proximaler Stenose und durch Vasokonstriktion distaler Gefäße
3. Messung von systolischem Blutdruck mit der Ultraschallsonde an der A. radialis
4. Flussmessungen in der V. jugularis interna dextra und V. mediana cubiti
5. Ermittlung des Knöchel-Arm-Index (Ankle-brachial-Index, ABI) zur Beurteilung einer möglichen peripheren arteriellen Verschlusskrankheit (pAVK)

3. Durchführung

3.1. Das Messprogramm

Die registrierten Signale werden auf nachfolgender Programmoberfläche sichtbar gemacht. Beachten Sie dabei, dass die Intensität als Maß für die Anzahl der erfassten Blutkörperchen nicht aber die Dopplerfrequenz selbst farbkodiert dargestellt wird.



F2	Speichern	Speichern eingefrorener Kurven. Funktioniert nur im Offline Modus.
F3	Filtern	Hochpassfilterung zur Unterdrückung von Wandbewegungen. Funktioniert nur im Online Modus.
F4	Richtung	Normale Richtung - Symbol auf weißem Hintergrund: Dopplerfrequenzen oberhalb der Nulllinie bedeuten Fluss zur Sonde hin.
F6	Dopplerprogramm	Definition und Bearbeitung von Dopplerprogrammen.
F7	Dezibel	Änderung des Intensitätsbereiches (Anfang und Ende) der farbigen Dezibelskala.
F8	Sweep	Wiederholtes Drücken schaltet zwischen verschiedenen Stufen der Zeitablenkung um.
F9	Drucken	Eine eingefrorene und gespeicherte Messung wird gedruckt.
F10	Start/Stop	Umschaltung Online/Offline Modus. Bei Online → Offline wird Kurve eingefroren.
F12	Sonden wechsel	Achtung: Online-Anzeigeeinstellungen werden auf Default-Werte zurückgesetzt. Die Sonden (4 oder 8 MHz) können im Online Modus gewechselt werden.
↑↓		Offsetverschiebung.
←→		Änderung der Intensität, mit der eine Dopplerfrequenz im Signal vorkommt.
Bild↑		Änderung des messbaren und darstellbaren Frequenzbereiches des Dopplersignals (Änderung der Ordinate).
Bild↓		
Strg S		Speicherung der aktuellen Anzeigeparameter als Default-Werte.

Bei Anklicken von „Einstellungen/Messprogramme“ in der Menüleiste können zahlreiche Einstellungen vorgenommen werden. Im Fenster „Skala“ kann die Ordinate zwischen der Darstellung kHz und cm/s umgeschaltet werden.

3.2. Versuchsaufgaben

Zur Anpassung der Eingangswiderstände zwischen Schallkopf und Haut wird stets ein Ultraschallgel verwendet. Reflektion von Schallenergie an der Hautoberfläche wird so weitgehend verringert. **Die Ultraschallsonden sind sehr stoßempfindlich und teuer; sie sollten mit entsprechender Sorgfalt benutzt werden!**

3.2.1. Strompuls der Arteria radialis

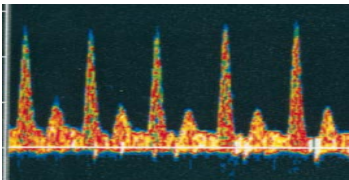
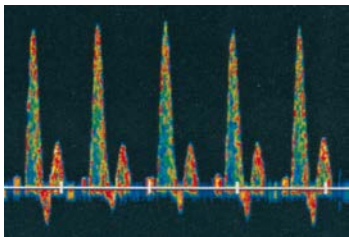
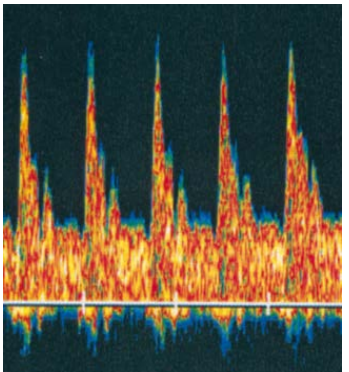
Tasten Sie den Puls der A. radialis, bringen Sie etwas Gel auf die Haut (ca. 0.1 ml) und positionieren Sie den Messkopf (8 MHz) in einem Winkel von 45° zur angenommenen Achse der A. radialis, so dass das Blut auf den Messkopf zufließt. Verändern Sie Richtung und Neigung des Messkopfes so lange, bis Sie das größte Signal registrieren. Verstellen Sie mit den Pfeiltasten (←→) die Empfindlichkeit zur Ermittlung einer optimalen Hüllkurve: Eine zu hohe Empfindlichkeit führt dazu, dass die Hüllkurve verrauscht ist; eine zu niedrige Empfindlichkeit bewirkt, dass die Hüllkurve abreißt. Es sollten keine weißen Stellen in der Aufzeichnung der Strompulskurve sichtbar sein. Nach einem vollständigen Durchlauf bitte F10 drücken, um in den Offline-Modus überzugehen. Durch Anklicken des Kästchens „Cursor anzeigen“ am unteren Bildschirmrand werden eine horizontale und eine vertikale Cursorlinie dargestellt und die zugehörigen Werte angezeigt. Bestimmen Sie mit Hilfe der Cursorfunktion

- die Dauer einer Pulsperiode
- zum Zeitpunkt des maximalen Flusses die maximale Dopplerfrequenz ($\Delta f_{\text{syst,max}}$) bzw. die maximale Strömungsgeschwindigkeit ($v_{\text{syst,max}}$) und die mittlere Dopplerfrequenz ($\Delta f_{\text{syst,mean}}$) bzw. die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ($v_{\text{syst,mean}}$). (Hierzu müssen Sie am unteren Bildschirmrand die entsprechende Hüllkurve auswählen.)
- zum Ende der Diastole die maximale Dopplerfrequenz ($\Delta f_{\text{enddiast,max}}$) bzw. die entsprechende Strömungsgeschwindigkeit ($v_{\text{enddiast,max}}$).

Tragen Sie diese Werte in die unten aufgeführte Tabelle ein und skizzieren Sie die Strompulskurve.

3.2.2. Strompulse der A. brachialis und A. carotis communis

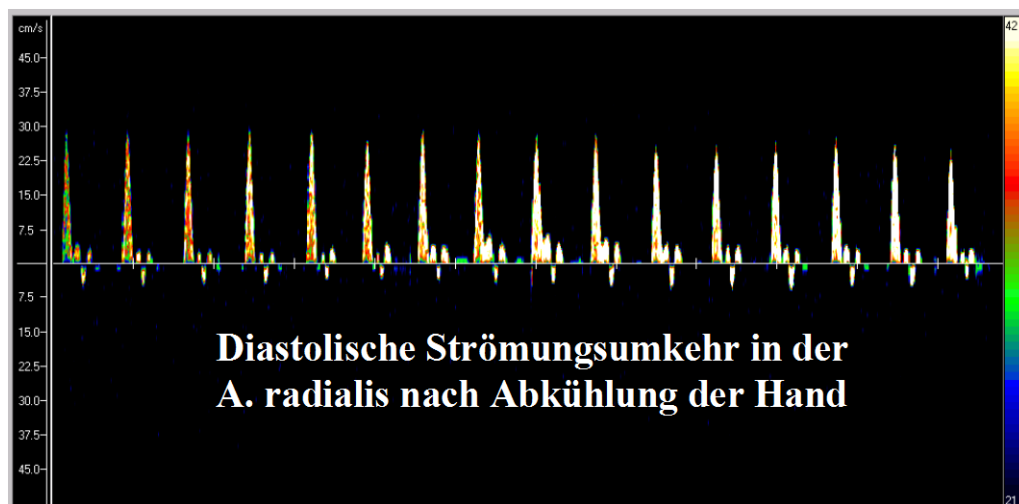
Wiederholen Sie die Messungen an der A. brachialis (8-MHz-Messkopf) und an der A. carotis communis (4-MHz-Messkopf) desselben Probanden! Tragen Sie die Ergebnisse und Beobachtungen in Ihre Unterlagen ein und skizzieren Sie die Hüllkurven der Strompulskurven. Diskutieren Sie den unterschiedlichen Verlauf der Strompulskurven. Wie ändert sich die Strompulskurve der A. brachialis bei Anspannung der Unterarmmuskulatur?

A. radialis	A. brachialis	A. carotis communis
		
systolisch: ca. 40 cm/s	systolisch: ca. 60 cm/s	systolisch: 80-120 cm/s

	A. radialis	A. brachialis	A. carotis communis
Dauer einer Pulsperiode			
$\Delta f_{\text{sys,max}}$ bzw. $v_{\text{sys,max}}$			
$\Delta f_{\text{sys,mean}}$ bzw. $v_{\text{sys,mean}}$			
$\Delta f_{\text{enddiast}}$ bzw. v_{enddiast}			
HR			
$\text{SBI}_1 = \Delta f_{\text{sys,max}} / \Delta f_{\text{sys,mean}}$			
$\text{PI} = (\Delta f_{\text{sys,max}} - \Delta f_{\text{diast,min}}) / \Delta \bar{f}$			
$\text{RI} = (\Delta f_{\text{sys,max}} - \Delta f_{\text{enddiast}}) / \Delta f_{\text{sys,max}}$			

3.2.3. Veränderungen des Strompulses durch Vasokonstriktion nachgeschalteter Gefäße

Die diastolischen Strömungsgeschwindigkeiten hängen stark vom peripheren Gefäßwiderstand ab. Arterien mit nachgeschaltetem, hohem Gefäßwiderstand zeigen in der frühen Diastole eine starke Strömungsverlangsamung bzw. eine kurzfristige Strömungsumkehr („Dip“). Der frühdiastolische Dip lässt sich durch eine starke Vasokonstriktion der nachgeschalteten Gefäße auch in den distalen Extremitätenarterien (z. B. A. radialis) induzieren. Umgekehrt kann der frühdiastolische Dip auch in den proximalen Gefäßen bei maximaler peripherer Dilatation (z. B. infolge Erwärmung oder reaktiver Hyperämie) verschwinden.



Im gut beheizten Praktikumsraum soll sich der Proband zusätzlich warm anziehen und ggf. einige Kniebeugen machen, um die peripheren Widerstandgefäße zu dilatieren. Alternativ kann diese Dilatation auch mit warmem Wasser erreicht werden. Messen Sie nun die Strompulscurve des Radialispulses des Probanden. Die Hüllkurve sollte in diesem Zustand keine Deflektion in den negativen Bereich aufweisen. Ein Helfer gibt nun etwas Eis aus der bereitstehenden Styroporbox in die Hand des Probanden. Bereits nach wenigen Sekunden erscheinen negative Deflektionen („Dips“) in der Hüllkurve. Wie lassen sich diese erklären? Wie verändern sich die Indizes? Das Eis wird nun aus der Hand des Probanden entfernt. Beobachten Sie die Veränderungen beim Erwärmen der Hand.

3.2.4. Veränderungen des Strompulses durch eine Stenose

Die in der A. brachialis oder A. femoralis physiologischerweise zu beobachtende frühdiastolische Strömungsumkehr, kann auch durch eine proximal liegende Stenose vermindert oder vollkommen aufgehoben werden. Anhand dieser Veränderungen lassen sich insbesondere bei einer seitenvergleichenden Untersuchung der A. brachialis oder A. femoralis Stenosen im Schultergürtel- oder Beckenbereich nachweisen.

Den Einfluss einer Stenose auf die Strompulscurve können Sie untersuchen, indem Sie unmittelbar proximal des Messkopfes die A. brachialis mit der Blutdruckmanschette komprimieren. Wie äußern sich Strömungsturbulenzen unmittelbar distal einer Stenose im Strompuls?

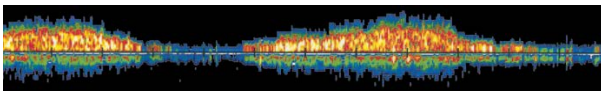
3.2.5. Blutdruckmessung mit der Ultraschallsonde

Mit der Ultraschallsonde lässt sich auch in kleinen, peripheren oder schlecht durchbluteten Gefäßen eine Blutströmung nachweisen. Im Rahmen dieses Praktikums sollen Sie versuchen, den systolischen Blutdruck mit Hilfe der Druckmanschette und der Ultraschallsonde zu bestimmen. Nehmen Sie die Stimpfschlauchkurve der A. radialis auf und pumpen Sie die am Unterarm angelegte Blutdruckmanschette bis ca. 180 mmHg auf. Lassen Sie dann den Druck langsam ab (nicht mehr als 5 mmHg/s), bis ein Fluss gerade wieder sichtbar wird. Der in diesem Moment abgelesene Druck entspricht dem systolischen Maximum. Lassen Sie nun den Druck langsam weiter ab und beobachten Sie die Veränderungen.

Position des Unterarms	systolischer Blutdruck [mmHg]
Stuhlhöhe	
Herzhöhe	
Kopfhöhe	

3.2.6. Fluss in Armvenen

Messen Sie die Strömung der V. mediana cubiti oder V. basilica und führen Sie für 3 s eine Bauchpresse durch (Valsalva-Manöver). Bestimmen Sie die maximale Strömungsgeschwindigkeit. Vergleichen Sie außerdem den Einfluss von tiefen Atemzügen im Vergleich zu normaler Atmung.



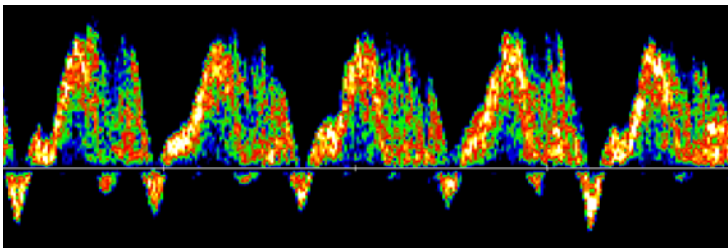
tiefe Einatmung: ca. 5-10 cm/s; tiefe Ausatmung: ca. 0 cm/s; konstanter Fluss bei Normalatmung

3.2.7. Fluss in der V. jugularis interna dextra

Führen Sie die Messung im Liegen durch, weil das Gefäß im Stehen kollabiert.

Hinweis: Wenn die Messung länger als 5 min dauert, kann direkt im Anschluss mit der pAVK-Messung begonnen werden.

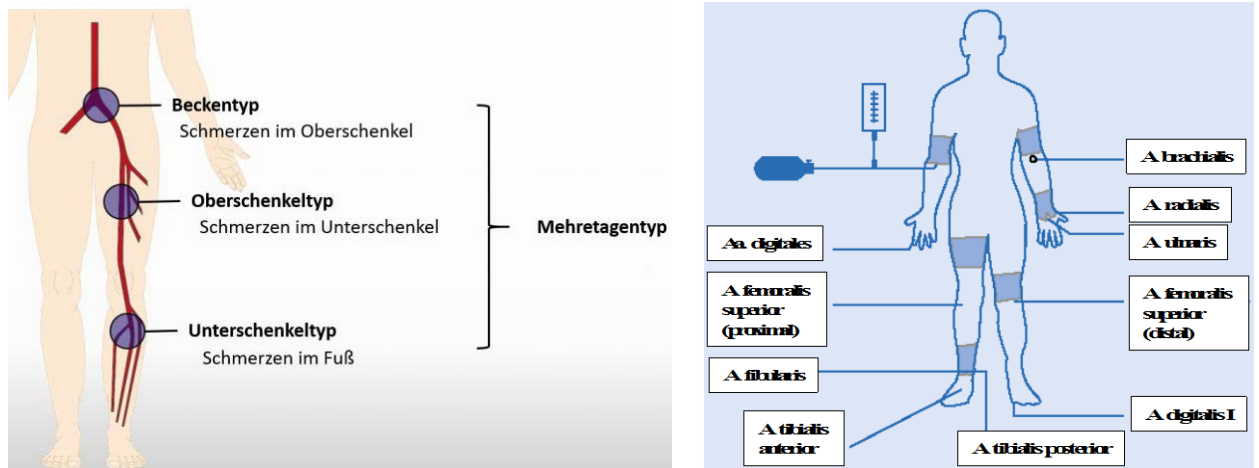
Setzen Sie den Filter auf 100 Hz. Positionieren Sie den 8-MHz-Messkopf auf die V. jugularis zwischen dem klavikulären und sternalen Ansatz des M. sternocleidomastoideus. Der Schallkopf sollte so positioniert sein, dass das venöse Blut auf ihn zu fließt. Der Fluss der V. jugularis generiert so ein positives Signal. Der sich oft überlagernde Carotispuls wird dann ein negatives Signal erzeugen. Versuchen Sie, den venösen Fluss isoliert und stabil abzuleiten. Bestimmen Sie die maximale Strömungsgeschwindigkeit. Führen Sie für 3 s ein Valsalva-Manöver durch. Was beobachten Sie?



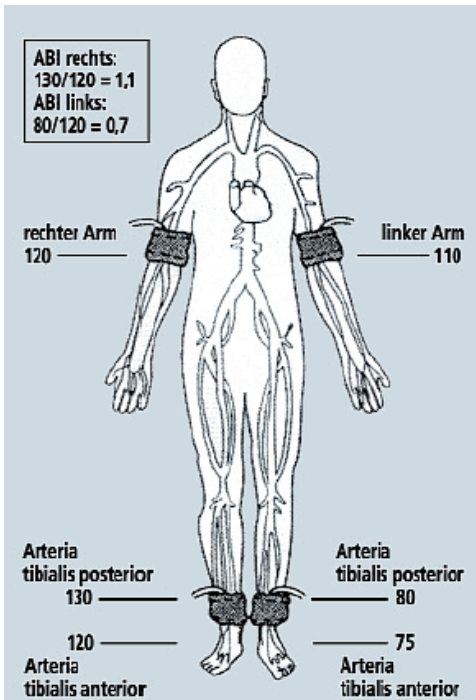
systolisch: ca. 30-60 cm/s; enddiastolisch: ca. -5-10 cm/s (durch die Vorhofkontraktion)

3.2.8. Ermittlung des Knöchel-Arm-Index (Ankle-brachial-Index, ABI)

Die **periphere arterielle Verschlusskrankheit (pAVK)** kann heute unkompliziert und zuverlässig mit dem Ultraschall-Doppler-Verfahren diagnostiziert werden. Die Erkrankung entsteht in erster Linie auf Basis atherosklerotischer Gefäßveränderungen. Neben den Koronararterien und den zerebralen Arterien sind die Extremitätenarterien die dritte Hauptmanifestation der generalisierten Atherothrombose. Bei der pAVK kommt es zu stenosierenden bzw. okkludierenden Veränderungen der Extremitätenarterien vorwiegend im Bereich der Beine. Die Folge sind kalte, blass verfärbte Extremitäten und Schmerzen beim Gehen. Das klassische Symptom der pAVK ist die sogenannte Claudicatio intermittens: Hier treten reproduzierbare Schmerzen bei Belastung auf. Linderung wird nur durch eine Unterbrechung der Belastung erzielt. Bei Personen ab 65 Jahren *ohne weitere Risikofaktoren* ist etwa jeder 6. betroffen. Wenn Risikofaktoren wie Rauchen, Diabetes mellitus, Hypertonie oder Hypercholesterinämie hinzukommen, so muss bereits bei 50-Jährigen mit einer ähnlich hohen Rate gerechnet werden. Da die pAVK lange Zeit asymptomatisch verläuft, wird eine Diagnose oft erst spät in einem fortgeschrittenen Stadium gestellt. Das diagnostische Vorgehen zur Identifizierung einer bislang unerkannten pAVK umfasst in der Praxis neben Anamneseerhebung und klinischer Untersuchung die dopplersonographische Messung des systolischen Knöchelarteriendruckes mit Bestimmung des Knöchel-Arm-Index (Ankle-brachial-Index; ABI). Eine pAVK kann somit bereits vor auftretenden Beschwerden diagnostiziert werden.



Quelle: <http://gefaessmanual.de>



Deutsches Ärzteblatt Studieren.de, SS 2006: 28, Diehm et al.

Vorgehensweise

Der ABI wird unter standardisierten Bedingungen mit einem Doppler-Ultraschallgerät ermittelt. Verglichen wird der **systolische Blutdruck der A. tibialis anterior (bzw. A. dorsalis pedis) und A. tibialis posterior (am Knöchel) mit dem der A. brachialis** (Anmerkung: Der systolische Druck nimmt nach peripher zu, wohingegen der arterielle Mitteldruck abnimmt. Der systolische Druck im Bereich der gut beschallbaren Knöchelarterien ist somit im Normalfall mindestens so hoch wie im Bereich der A. brachialis oder A. radialis). Die Ruhemessung erfolgt nach mind. fünfminütiger Ruhepause **im Liegen**. Gemessen wird der systolische Blutdruck zum Zeitpunkt der Registrierbarkeit von Flusssignalen beim langsamen Ablassen der zuvor über den systemischen Druck hinaus inflatierten Blutdruckmanschette. Gemessen wird zunächst an beiden Armen, dann an beiden Unterschenkeln im Bereich der Knöchelarterien. Gewertet wird für jede Seite der höchste der beiden Druckwerte des jeweiligen Knöchels und der Mittelwert des systolischen Blutdruckes beider Aa. brachialis (Ausnahme: Bei Druckunterschied zwischen rechtem und linkem Arm von ≥ 10 mmHg ist der höhere Druckwert zu verwenden).

	sys. Druck links [mmHg]	sys. Druck rechts [mmHg]
A. brachialis		
A. tibialis anterior		
A. tibialis posterior		

ABI links:

ABI rechts:

Interpretation	ABI
normal (Normotoniker)	>1
leichte periphere Minderperfusion	0,75-0,9
mäßige periphere Minderperfusion	0,5-0,75
schwere periphere Minderperfusion mit Gefährdung der Extremität	< 0,5

Skizzieren Sie auf den folgenden Seiten die Strompulscurven (Hüllkurve der max. Geschwindigkeit):

A. radialis



A. brachialis



A. carotis communis



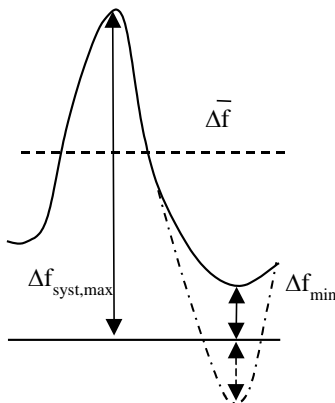
4. Anhang

Die vorstehenden Versuche haben gezeigt, wie aus der Gestalt der Ultraschall Frequenz-Zeit-Spektren viele klinisch relevante Informationen gewonnen werden können. Die Aussagekraft der absoluten Werte der Amplituden und Frequenzen (bzw. der daraus errechneten Geschwindigkeiten) ist hingegen begrenzt. Die Werte sind nicht nur von der Sorgfalt des Untersuchenden (insb. genaue Einstellung des Winkels) abhängig; sie werden auch durch die Untersuchungsbedingungen (z. B. Raumtemperatur) und die Konstitution des Probanden beeinflusst. Diese Parameter können daher nur bedingt zur Verlaufsbeobachtung, auf keinen Fall aber für Patienten-vergleichende Studien herangezogen werden. Hinzu kommt, dass sie keine klare klinische Diagnose zulassen: Beispielsweise sollte bei einer Stenose, wie es aus den Strömungsgesetzen zu erwarten ist, die maximale Strömungsgeschwindigkeit zunehmen. Wenn die Stenose jedoch so groß ist, dass sie den Gesamtfluss durch die Arterie beeinträchtigt, kann die maximale Strömungsgeschwindigkeit hingegen auch verringert werden.

Die im Folgenden beschriebenen Parameter wurden im Bemühen nach einer Standardisierung geschaffen. Dadurch, dass sie aus dem Verhältnis der Höhen verschiedener Wellenformabschnitte gebildet werden, sind sie von den oben beschriebenen Untersucher- und Probanden- abhängigen Fehlerquellen weitgehend frei.

Pulsatilitäts-Index PI (= engl. pulsatility index)

Der Pulsatilitäts-Index vergleicht die Differenz zwischen der maximalen ($\Delta f_{syst,max}$) und der minimalen Strömungsgeschwindigkeit (Δf_{min}) mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit (Δf). Der Pulsatilitäts-Index ist ein relatives Maß für die Schwankung der Strömungsgeschwindigkeit während eines Pulses.



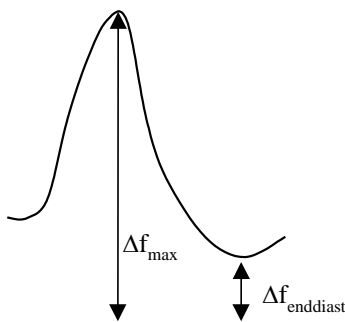
$$PI = \frac{\Delta f_{syst,max} - \Delta f_{min}}{\bar{\Delta f}}$$

Δf_{min} kann negativ sein

Der PI kann durch eine Reihe von Faktoren (proximale und distale Widerstandserhöhung, Schlagvolumen und Herzfrequenz) beeinflusst werden. Bei einer Zunahme des peripheren Strömungswiderstandes nimmt der PI zu, weil die Differenz aus maximaler und minimaler Strömungsgeschwindigkeit weniger abnimmt als die mittlere Strömungsgeschwindigkeit.

Resistance Index RI

Der Resistance-Index vergleicht die Differenz zwischen der maximalen systolischen Strömungsgeschwindigkeit ($\Delta f_{syst,max}$) und der Strömungsgeschwindigkeit am Ende der Diastole ($\Delta f_{enddiast}$) mit der maximalen systolischen Strömungsgeschwindigkeit.



$$RI = \frac{\Delta f_{syst,max} - \Delta f_{enddiast}}{\Delta f_{syst,max}}$$

$\Delta f_{enddiast}$ kann minimal null sein

Der Resistance-Index wurde geschaffen, um den Eingangswiderstand des nachgeschalteten Strombetts abschätzen zu können. Bei einer Zunahme des peripheren Strömungswiderstandes nimmt der RI zu, weil die enddiastolische Strömungsgeschwindigkeit stärker abnimmt als die maximale Strömungsgeschwindigkeit.

Spectral Broadening Index nach Sheldon (SBI₁)

Der SBI₁ ist ein Maß für die Breite der Verteilung der Dopplerfrequenzen zum Zeitpunkt des maximalen Flusses. Es wird die maximale Dopplerfrequenz ($\Delta f_{\text{sys},\text{max}}$) mit der mittleren Dopplerfrequenz ($\Delta f_{\text{sys},\text{mean}}$) zum Zeitpunkt des maximalen Flusses verglichen:

$$\text{SBI}_1 = \Delta f_{\text{sys},\text{max}} / \Delta f_{\text{sys},\text{mean}}$$

Der SBI₁ ist damit immer größer als 1. Bei einer Stenose ist er vergrößert.

5. Schwerpunkte zur Vorbereitung auf das Praktikum

Bau des Kreislaufsystems

- Hochdrucksystem, Niederdrucksystem, Körper- und Lungenkreislauf
- Druckänderungen bei Lagewechsel, hydrostatische Indifferenzebene

Strömungsmechanik

- Kontinuitätsgesetz und Strömungsgeschwindigkeit
- Ohmsches Gesetz, Hagen-Poiseuille-Gesetz
- totaler peripherer Widerstand (TPR)
- Wie bestimmt man den TPR?
- Wovon hängt der TPR in den einzelnen Kreislaufabschnitten ab? Warum ist es sinnvoll, dass dieser im Körperkreislauf relativ groß, im Lungenkreislauf hingegen relativ klein ist?

Eigenschaften der Gefäßwände/arterielle Hämodynamik

- Compliance von Arterien und Venen, Altersabhängigkeit
- Pulswellen (Druckpuls, Strompuls; Pulswellengeschwindigkeit)
- Windkesselfunktion arterieller Gefäße

Arterieller Blutdruck

- Welche Parameter haben einen Einfluss auf die Höhe des mittleren arteriellen Blutdruckes?
- Von welchen Parametern hängen systolischer und diastolischer Blutdruck ab?

Venöses System

- venöser Rückstrom: Muskelpumpe/Venenklappen, Atmungspumpe, Ventilebenenmechanismus
- Venenklappeninsuffizienz
- zentraler Venendruck (ZVD)
- Von welchen Parametern hängt der ZVD ab?
- Wie beeinflusst der ZVD das HMV und wie beeinflusst das HMV den ZVD?
- Venenpuls

Messung von Kreislaufgrößen

- Blutdruckmessung: Worauf muss man achten, um korrekte Werte zu erhalten?
- Was sind Korotkow-Geräusche? Wie entstehen diese?
- Was sind Blutdruckschwankungen 1.-3. Ordnung?
- Doppler-Effekt: Messung der Blutströmung
- Was versteht man unter dem Knöchel-Arm-Index?
- Ursachen und Stadien einer pAVK