



# Medizinische Physik

Fabian Dornuf

Stand: 18.02.2011

## 1 Motivation

Physikalische Methoden spielen in der Medizin bei Diagnostik und Therapie eine zentrale Rolle. In diesem Versuch werden Grundlagen und Anwendungen an drei Beispielen nahegebracht: Mit Audio-Frequenzgenerator, Oszilloskop und Kopfhörer wird die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Ohres, die Hörkurve, bestimmt. Manche Praktikanten entdecken dabei bei ihrem Gehör die charakteristische Empfindlichkeitseinbuße im mittleren Frequenzbereich, die z.T. auf zu hohe Lautstärke beim Musikhören zurückgeführt werden kann. Mit Ultraschallsender und -empfänger wird die Ausbreitung, Reflexion und Dämpfung von Ultraschall in Wasser untersucht. Anschließend ist Gelegenheit, diese Ergebnisse mit einem medizinischen Ultraschallgerät umzusetzen und bei sich Organe wie Nieren, Milz, usw. zu orten. Des Weiteren werden Praktikanten an sich selbst ein Elektrokardiogramm (EKG) aufnehmen und auswerten.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Elektrokardiographie

Eine wichtige Rolle in der medizinischen Diagnostik spielt die Aufzeichnung des Elektrokardiogramms (EKG), mit dessen Hilfe eine genaue Analyse der Erregungsbildung und Erregungsleitung im menschlichen Herzen möglich ist. Dabei werden die durch die Tätigkeit der Herzmuskulatur erzeugten Aktionspotentiale mit Elektroden auf der Oberfläche des Körpers an verschiedenen Stellen, den Ableitungspunkten, gemessen. Zur Demonstration solcher Biospannungen in den jeweiligen Ableitungspunkten ist der elektrolytische Trog geeignet.

#### 2.1.1 Elektrische Felder im elektrolytischen Trog

Zwischen elektrischen Ladungen besteht ein elektrisches Feld. Dieses ist abhängig von der Größe der einzelnen elektrischen Ladungen und von ihrer geometrischen Anordnung. Werden Elektroden an eine elektrische Spannungsquelle angeschlossen, so laden sie sich elektrisch auf und nehmen damit unterschiedliche elektrische Potentiale an. Zwischen ihnen entsteht eine Potentialdifferenz, die als Spannung gemessen werden kann. Der Ursprung und das Ende aller Feldlinien liegen immer in elektrischen Ladungen. Entlang der elektrischen Feldlinien ändert sich das den jeweiligen Orten zuschreibbare elektri-

sche Potential, wobei die maximale Spannung zwischen den beiden Polen gemessen werden kann. Linien konstanter Potentiale werden als Äquipotentiallinien bezeichnet, die stets senkrecht auf den elektrischen Feldlinien stehen. Für die Messungen im Versuch wird eine elektrolytischer Trog verwendet. Dies bietet sich an, da der menschliche Körper mit seinem hohen Wasseranteil durch dieses einfache Modell erklärt werden kann. Bringt man ein elektrisches Feld, z.B. hervorgerufen durch zwei Elektroden, in den Trog ein, so bewegen sich die Elektrolyten als Ladungsträger entlang den elektrischen Feldlinien, was ein Stromfluss bedeutet. Taucht man zwei Messelektroden in diese Anordnung, so liegen diese auf unterschiedlichen Potentialen, hervorgerufen durch das vorhandene elektrische Feld. Durch den Elektrolytstrom kommt es aufgrund des elektrischen Widerstandes des Elektrolyten zu einem Spannungsabfall, welcher der Potentialdifferenz zwischen den beiden Elektroden entspricht.

### 2.1.2 Aktivität der Herzmuskelzellen

Im Herzen wird das elektrische Feld durch unterschiedlich erregte Regionen hervorgerufen. Im Ruhezustand hat eine Herzmuskelzelle ein Membranpotential von ca. -90 mV, welches sich mit Hilfe der Nernst-Gleichung aus den Konzentrationen der beteiligten Ionen (im wesentlichen  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) berechnet. Die Membran ist außen positiv und innen negativ geladen. Bei einer Erhöhung dieses Potentials auf ca. -65 mV, z. B. durch einen intrazellulären  $\text{Na}^+$ -Einstrom, kommt es zu einem sogenannten Aktionspotential. Die Membran ist jetzt außen negativ und innen positiv geladen. Zwischen unerregten Herzregionen und erregten Herzregionen bilden sich aufgrund der unterschiedlichen Ladungen an der Membranaussenseite Dipole aus, die jeweils ein elektrisches Feld erzeugen. Die einzelnen Dipole überlagern sich zu einem Gesamtdipol, welcher als Herzintegralvektor bezeichnet wird.

### 2.1.3 Erregungsleitung im Herzen

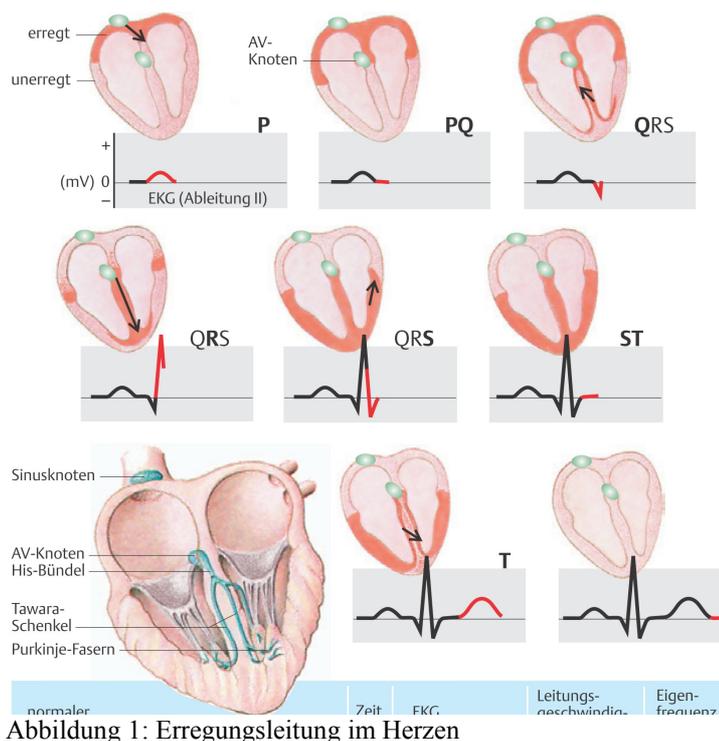


Abbildung 1: Erregungsleitung im Herzen

Es ist entscheidend, dass das Herz nicht gleichzeitig komplett erregt wird. Die Erregung breitet sich über das Herz aus. Dabei werden Kanäle (Gap-Junctions) in den Zellmembranen benutzt, um die Erregung von einer Zelle zur nächsten weiterzuleiten. Die Erregung beginnt im Sinusknoten, einer Ansammlung von speziellen, spontan depolarisierenden Herzmuskelzellen im rechten Vorhof. Zunächst wird die Muskulatur der beiden Vorhöfe erregt (P-Welle). Währenddessen läuft die Erregungswelle weiter zum Atrioventrikular-Knoten (AV-Knoten), wo sie deutlich verzögert wird. Über das His-Bündel mit seinen Schenkeln (zwei links, einer rechts der Herzscheidewand) gelangt die Erregung zu den Purkinje-Fasern in der Herzspitze, von wo sie sich über das ganze Myokard der Hauptkammern ausbreitet (QRS-Komplex). Die Rückbildung der Hauptkammererregung folgt der Erregung nach etwa 300 ms (T-Welle).

Je nach Erregungsfortschritt verändert sich die Lage und Größe des Herzintegralvektors und resultierend daraus das elektrische Feld.

### 2.1.4 Elektrokardiographie nach Einthoven

In der Elektrokardiographie wird diese Veränderung des Herzintegralvektors bzw. des entsprechenden elektrischen Feldes ausgenutzt, um die Erregungsleitung im Herzen zu überprüfen. In dem Versuch wird die bipolare Extremitätenableitung nach Einthoven benutzt. Dabei werden die Spannungen zwischen

- dem linken Arm und dem rechten Arm (Ableitung I)
- dem linken Fuß und dem rechten Arm (Ableitung II)
- und dem linken Fuß und dem linken Arm (Ableitung III)

gemessen.

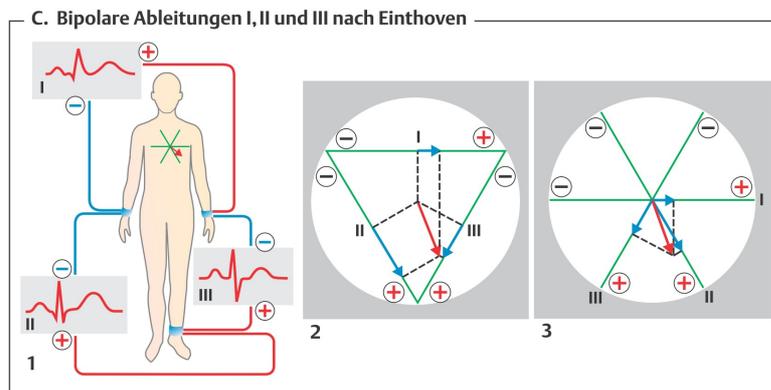


Abbildung 2: Bipolare Ableitungen nach Einthoven

Dadurch dass sich die elektrischen Felder im zeitlichen Verlauf der Erregungsleitung verändern, werden in den drei Ableitungen zu den unterschiedlichen Zeiten unterschiedliche Spannungen gemessen.

Die Ableitungspunkte sind so angeordnet, dass sich ein gleichseitiges Dreieck ergibt, in dessen Mitte sich das Herz befindet. Es lässt sich zeigen, dass sich der Zeitverlauf der Spannungen zwischen je zwei Ableitungspunkten dadurch in guter Näherung konstruieren lässt, dass man zu jedem Zeitpunkt den Herzintegralvektor auf die Verbindungslinie zwischen diesem beiden Punkten projiziert. Umgekehrt lässt sich über Messung des zeitlichen Spannungsverlauf aller drei Ableitungen die Lage des Herzintegralvektors zu jeder Zeit rekonstruieren. Im Versuch soll die Herzlage des Probanden bestimmt werden. Dazu betrachtet man die R-Zacke des EKG. Dabei zeigt der Herzintegralvektor in Richtung Herzspitze. Durch Konstruktion des Herzintegralvektors aus den verschiedenen Ableitungen (siehe Abb. 3 lässt sich mit Hilfe des Diagramms 4 die Lageposition des Herzens bestimmen.

Die Anwendung der Einthovschen Ableitungen erschöpft sich in den darzustellenden Dimensionen. Das entstehende Ableitungsdreieck deckt nur zwei Dimensionen des Herzintegralvektors ab. Für die Darstellung einer dritten Dimension des Herzintegralvektors werden zusätzliche Brustwandableitungen benötigt, wie sie z.B. Wilson eingeführt hat.

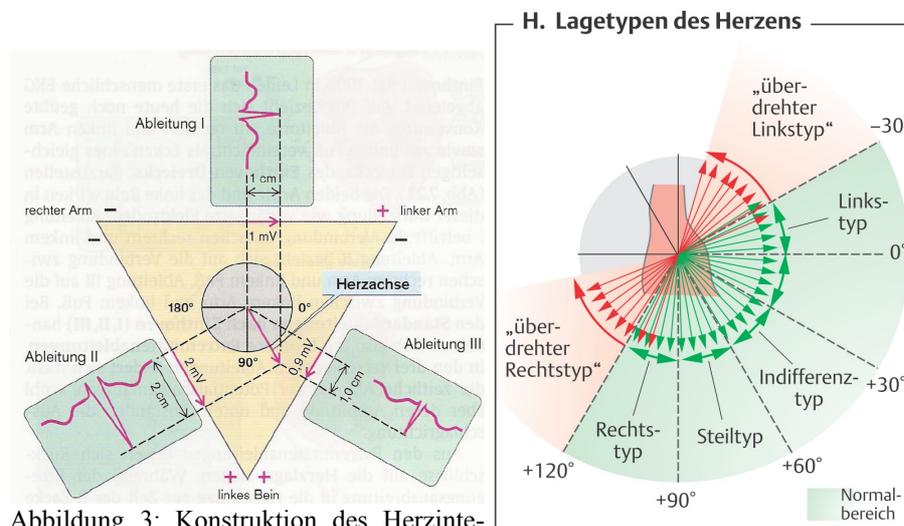


Abbildung 3: Konstruktion des Herzintegralvektors aus den drei Ableitungen nach Einthoven

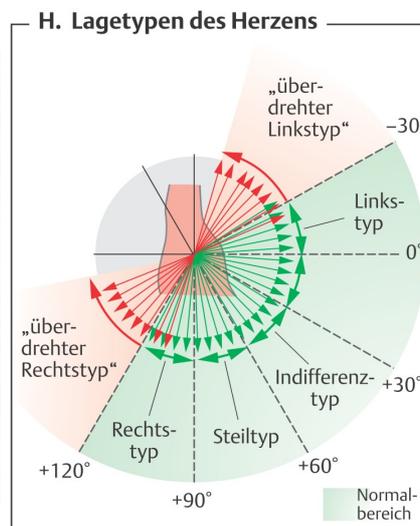


Abbildung 4: Bestimmung des Lagetyps aus dem Winkel des Herzintegralvektors

## 2.2 Hörkurve

In der medizinischen Diagnostik wird mit einem Oszilloskop (Elektronenstrahl-Oszilloskop) zeitlich veränderliche elektrische Signale (Spannungsänderungen) aufgezeichnet. Als universelles Beobachtungs-, Registrier- und Messgerät erlaubt es die Aufzeichnung von einmaligen oder sich wiederholenden Ergebnissen mit einer einstellbaren zeitlichen Auflösung zwischen Sekunden und weniger als  $10^{-10}$  Sekunden.

### 2.2.1 Ausbreitung von Schall

Schall ist eine longitudinale Materiewelle, in der z. B. Luftmoleküle in Richtung der Schallausbreitung hin- und herschwingen. In einem Bereich zwischen ca. 16 Hz und 16 kHz ist der Schall in Abhängigkeit vom Alter für den Menschen hörbar. Nur sehr wenige und sehr junge Menschen können einen Ton von 20 kHz tatsächlich noch hören. Bei älteren Menschen sinkt die Hörgrenze weit unter 10 kHz ab. Über der Frequenz von 16 kHz befindet sich der Ultraschall, der in der medizinischen Diagnostik zum häufigen Einsatz kommt, und unter 16 Hz befindet sich der Infraschall, wie in der folgenden Tabelle zusammengestellt ist.

Infraschall	$\nu < 16 \text{ Hz}$
hörbarer Schall	$16 \text{ Hz} < \nu < 16 \text{ kHz}$
Ultraschall	$\nu > 16 \text{ kHz}$
Hyperschall	$\nu > 10 \text{ MHz}$

### 2.2.2 Empfindlichkeit des menschlichen Ohres

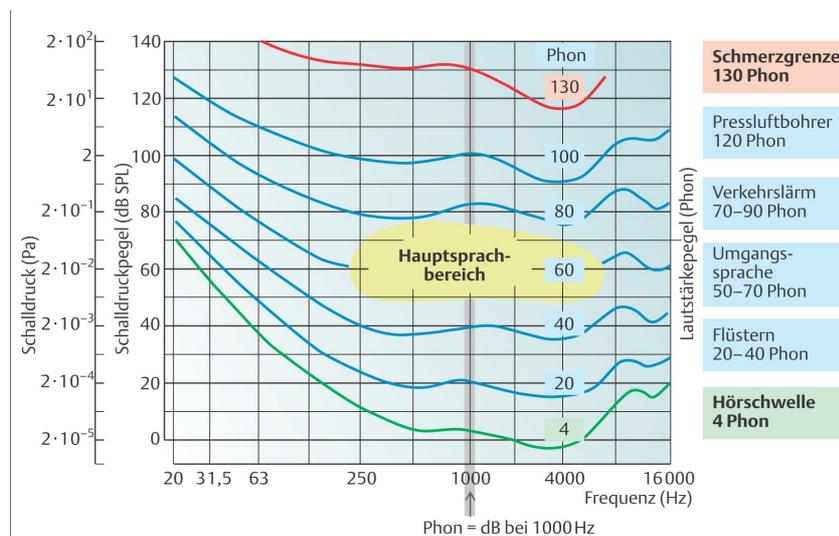


Abbildung 5: Hörkurve des Menschen

Die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres ist frequenzabhängig. Sie hat bei etwa 1 kHz ihr Maximum. Die vom Gehirn empfundene Lautstärke ist proportional zum Logarithmus der Schallintensität. Die geringste Schallintensität, die bei  $\nu = 1 \text{ kHz}$  von einem gesunden Ohr noch gerade wahrgenommen werden kann (Hörschwelle) beträgt

$$I_{\min}(\nu = 1 \text{ kHz}) = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Dies ist die Schallintensität, bei dem der Schalldruck  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$  beträgt. Als subjektiv empfundene Lautstärke  $Lst$  einer Schallwelle mit der Intensität wird die Zahl

$$Lst = 10 \cdot \lg \frac{I(\nu)}{I_{\min}(\nu)}$$

definiert, die in der Einheit „Phon“ angegeben wird (obwohl dies eine dimensionslose Zahl ist.) Die Schmerzgrenze des Ohres liegt bei 130 Phon, also bei einer  $10^{13}$  fachen Intensität der Hörschwelle. Wenn die Phonzahl sich um zehn erhöht, dann steigt die Schallintensität um das zehnfache an.

Schall erzeugt auf das Trommelfell einen bestimmten Druck  $p$ . Da der Schalldruck des hörbaren Schalls sich von „gerade noch hörbar“ bis zur Schmerzgrenze über 13 Zehnerpotenzen erstreckt, hat man für den Schalldruck eine logarithmische Größe, den Schalldruckpegel  $L_p$ , eingeführt. Der Schalldruckpegel ist wie die Lautstärke eine dimensionslose Zahl und wird in Dezibel (dB) angegeben. Zur Bestimmung des Schalldruckpegels einer bestimmten Schallquelle gilt die Gleichung:

$$L_p = 10 \cdot \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \cdot \lg \frac{p}{p_0}$$

## 2.3 Ultraschall

### 2.3.1 Ausbreitung von Schallwellen in Medien

Schall pflanzt sich in stofflichen Medien mit einer für jeden Stoff charakteristischen Geschwindigkeit  $c$  fort. In der Medizin ist die Kenntnis der Schallgeschwindigkeit wichtig für die Erklärung des Richtungshörens oder auch für die Interpretation von Schallechos in der Ultraschalldiagnostik. Für das Durchlaufen einer bestimmten Wegstrecke  $\Delta s$  braucht der Schall eine bestimmte, vom Ausbreitungsmedium abhängige Zeit  $\Delta t$ . Die Schallgeschwindigkeit  $c$  ist dann durch den Quotienten aus der Wegstrecke  $\Delta s$  und der Laufzeit  $\Delta t$  gegeben:

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Entspricht die Wegstrecke gerade eine Wellenlänge  $\lambda$  des Schalls, so ist die Laufzeit gleich der Zeitdauer  $T$  einer Periode. Die Frequenz  $\nu$  des Schalls ist durch die Anzahl der Perioden pro Zeiteinheit gegeben:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot \nu$$

In den meisten Stoffen ist die Schallgeschwindigkeit  $c$  über den gesamten Frequenzbereich vom Hörschall bis zu dem in der Medizin verwendeten Ultraschall unabhängig von der Frequenz.

### 2.3.2 Sonographie – Anwendung in der Medizin

Die Sonographie ist in der Medizin ein diagnostisches Verfahren und dient zur Erzeugung von Schnittbildern des Körperinneren mittels Ultraschall. Der Ultraschalldiagnostik liegt das Prinzip des Echolots zugrunde (erfunden 1913 von A. Behm). Der Schallkopf (Transducer) sendet kurze Ultraschallimpulse im zeitlichen Abstand von ca.  $1 \mu s$  aus. Diese pflanzen sich im durchschalteten Gewebe mit der Schallgeschwindigkeit  $c$  ( $c \approx 1500 \text{ ms}^{-1}$  für weiche Gewebe) fort. An Grenzflächen, an denen sich das Produkt aus Dichte und Schallgeschwindigkeit im Gewebe die akustische Impedanz  $z = \rho \cdot c$  ändert, werden einige Promille der einfallenden Intensität von ca.  $50 \text{ mW/cm}^2$  teilweise reflektiert. Man erhält längs der Strahlachse eine Vielzahl von Echos, die in einer zeitlichen Reihenfolge, abhängig vom Abstand des Reflexionsortes zum Schallwandler ankommen. Dieser nimmt in den Sendepausen die Intensität der reflektierten Echos auf, wandelt sie mit Hilfe eines Piezoquarzes in ein elektrisches Signal um und führt es dem Bildschirm zu. Da die Absorption im Gewebe exponentiell von der durchlaufenen Weglänge abhängt, erreicht man eine Verbesserung der Darstellung durch eine tiefenabhängige Verstärkung der Echoamplituden. Zusätzlich nimmt die Absorption mit der Frequenz des Signals zu, so dass die Wahl der Ultraschallfrequenz (2-10 MHz) ein Kompromiss zwischen Eindringtiefe und Auflösung ist. Die minimal erreichbare Auflösung liegt bei wenigen Millimetern. Das einfachste Diagnostikverfahren mit Ultraschall in der Medizin ist das A-Bild-Verfahren oder der A-Scan. Es ist ein eindimensionales Darstellungsverfahren, weil nur Grenzschichten auf der eindimensionalen Strahlachse sichtbar gemacht werden. Der A-Scan wird in der Medizin nur zur Bestimmung der Entfernung einer reflektierenden Grenzfläche in einer wählbaren Richtung verwendet, z. B. bei der genauen Lokalisation eines Hirntumors. In vielen Bereichen der medizinischen Diagnostik findet vor allem das zweidimensionale B-Bild-Verfahren Anwendung. Im B-Scan wird der Schallkopf während der Aufnahme um eine zur Schallausbreitungsrichtung senkrechte Achse geschwenkt (Wobblerprinzip) oder der Schallstrahl durch elektronische Steuerung periodisch in einer Ebene geschwenkt (Phased-Array-Prinzip).

Das Gerät nimmt dabei in verschiedenen Richtungen Echogramme auf. Nach elektronischer Verarbeitung der Echosignale zeigt der Bildschirm dann ein zweidimensionales Schnittbild des Körperinnern. In der Kardiologie wird das zweidimensionale B-Bild-Verfahren als Standardmethode in Kombination mit dem Doppler-Verfahren herangezogen.

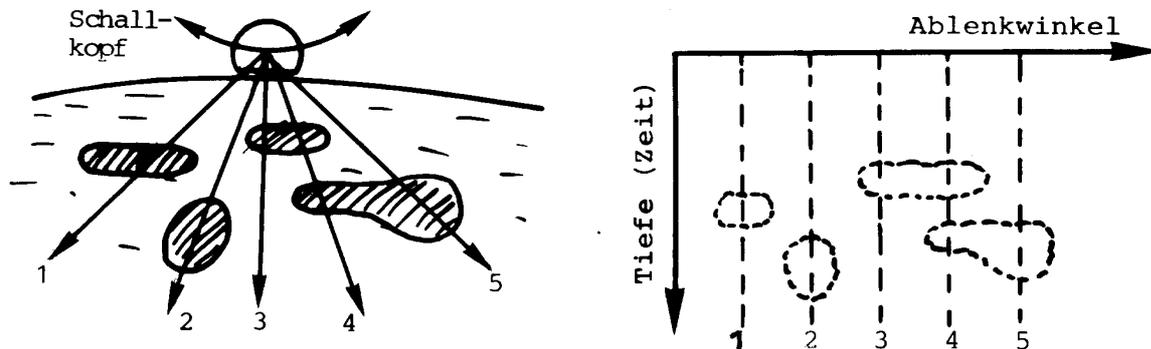


Abbildung 6: Funktionsweise der Sonografie

Neuere Geräte sind in der Lage, dreidimensionale Ultraschallbilder zu erzeugen. Hierfür wird gleich ein ganzes Volumen schichtweise mit Ultraschall abgetastet, wobei das Gerät neben der Schallkopfposition innerhalb der Schicht zusätzlich die Position entlang der dritten Raumachse registriert. Die 2D-Einzelbilder werden dann in einen 3D-Bilderstapel einsortiert und im Computer abgespeichert, die anschließend mit Visualisierungsprogrammen bearbeitet werden können.

### 2.3.3 Doppler-Verfahren

Das Doppler-Verfahren findet vornehmlich zur Gefäßdiagnostik oder zur Bestimmung des Herzschlags bei Feten Anwendung. Dabei wird ein gepulstes oder ungepulstes Ultraschallfeld auf das zu untersuchende Gebiet gerichtet. Das Schallfeld wird von der Herzwand oder den sich bewegenden Blutkörperchen zurück gestreut, wobei sich seine Frequenz gemäß dem Doppler-Effekt verschiebt. Das Doppler-Verfahren wird am häufigsten beim B-Bild-Verfahren angewendet. Beim Rastern einer zu untersuchenden Fläche lassen sich die empfangenen Doppler-Signale räumlich aufgelöst auf einem Bildschirm darstellen. Mit einer kontinuierlichen Schallquelle erhält man dann dreidimensionale Schnitte durch den Körper, während sich mit einer gepulsten Quelle der Scan auf eine Ebene beschränken lässt. Von Farbdoppler-Verfahren spricht man, wenn man zusätzlich zum B-Scan ein meist farbiges Bild etwa der Geschwindigkeitsverteilung überlagert. Das Doppler-Verfahren erreicht dieselbe räumliche Auflösung wie gewöhnliche Ultraschallverfahren.

## 3 Literatur

Gängige Lehrbücher der Physik

Im Anhang sind einige Internet-Links zusammengestellt.

## 4 Vorbereitung

Vor Durchführung des Versuch sollten sie sich mit folgenden Themen vertraut machen:

### Ultraschall

- Was ist Schall? Was ist Ultraschall?
- Wie funktioniert ein Ultraschall-Geber und Empfänger.
- Was verursacht den Kontrast in einem Ultraschallbild?
- Warum sieht ein Ultraschallbild anders aus als ein Röntgenbild?
- Was ist der Dopplereffekt, und warum ist er für die medizinische Anwendung des Ultraschalls wichtig?

## Hörkurve

- Wie ist das menschliche Ohr aufgebaut und wie funktioniert die Reizweiterleitung?
- Wie funktioniert ein Oszilloskop?
- Über welche Frequenzen erstreckt sich der menschliche Hörbereich?
- Wie misst man Schall?
- Was ist der Schalldruck und was bedeuten die einzelnen Einheiten Phon, dB, N/m<sup>2</sup>
- Wieso benötigt man eine logarithmische Darstellung des Schallpegels

## Elektrokardiogramm

- Was sind elektrische Dipole, Äquipotentialflächen, Feldlinien und Aktionspotentiale
- Wie ist das menschliche Herz aufgebaut und wie funktioniert die Reizweiterleitung?
- Was ist ein EKG, und warum funktioniert das am Menschen?
- Was für Ableitungen gibt es?
- Was sind die Vor- und Nachteile der EKG-Ableitung nach Einthoven?

# 5 Versuchsdurchführung

## 5.1 EKG

### 5.1.1 Messung des EKG in einem elektrolytischen Trog (Körpermodell)

#### Versuchsaufbau

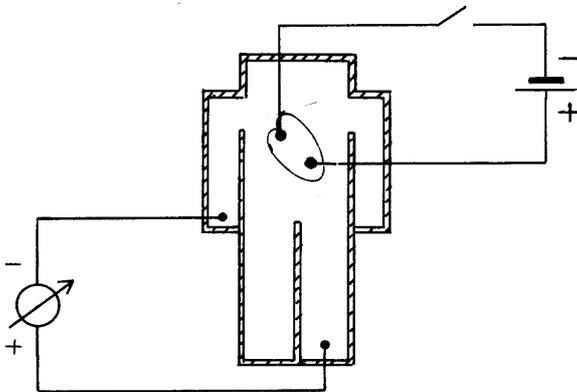


Abbildung 7: Schaltbild zum Versuchsaufbau EKG

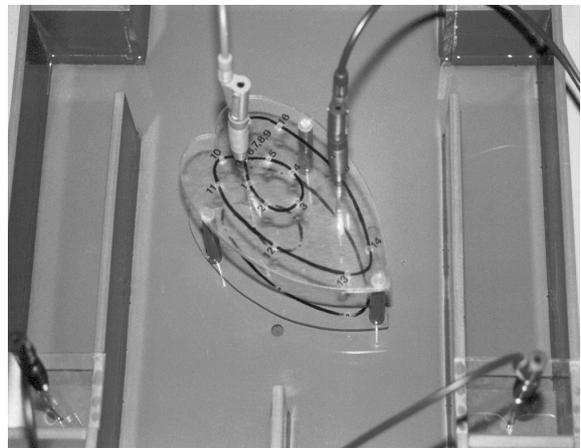


Abbildung 8: Künstliches Herz mit den 18 diskreten Positionen

Füllen Sie für die Durchführung des Experiments den Trog mit etwa 3 Liter Leitungswasser. Legen Sie entsprechend Abbildung 7 die Gleichspannung von 10 V über eine Morsetaste als Unterbrecher an den Herzdipol so an, dass der negative Pol während der Messungen ständig im Mittelpunkt 0 der Herzkurve bleibt und der positive die Positionen 1 bis 18 durchläuft (Abb. 7). Dabei sind die Positionen 6, 7, 8 und 9 per Definitionem auf das gleiche Potential wie der Mittelpunkt 0 zu legen, d.h. für diese Messpunkte ist keine Spannung anzulegen.

**Achtung:** Wegen der nicht vollständig identischen metallischen Zusammensetzung der Messelektroden und dessen oberflächenchemischen Veränderung (z.B. Chlorid-, Sulfat- und Sulfid-Bildung) werden sich zwi-

schen diesen galvanische Spannungen aufbauen, die vom gemessenen Rohwert abgezogen werden müssen.

### Messvorgang

Führen Sie für jede Messung folgende Schritte durch:

- Platzieren Sie die Messelektroden entsprechend den jeweiligen Ableitungen in den „Extremitäten“ des Körpermodells
  - I. Ableitung: linker Arm = Plus, rechter Arm = Minus
  - II. Ableitung: rechter Arm = Minus, linkes Bein = Plus
  - III. Ableitung: linkes Bein = Plus, linker Arm = Minus.

*Achtung:* Die Angaben sind aus Sicht des Probanden (Körpermodells)

- Stecken Sie den positiven Pol in die jeweilige Position (1-18) im Herzen
- Lesen Sie die galvanische Spannung am Voltmeter ab
- Betätigen Sie den Morseschalter und lesen den Spannungs-Rohwert am Voltmeter ab

*Achtung:* Steht das Komma am Voltmeter vor der Zahl, so muss eine 0 vor dem Komma ergänzt werden: .XXX→0.XXX

- Berechnen Sie aus der Rohspannung und der galvanischen Spannung die korrigierte Spannung über  $U_{\text{korr}} = U_{\text{Roh}} - U_{\text{galv}}$ .

### Messaufgaben

Messen Sie für die Normlage des Herzens und für alle drei Ableitungen in den 18 Positionen die galvanische Spannung und die Rohspannung.

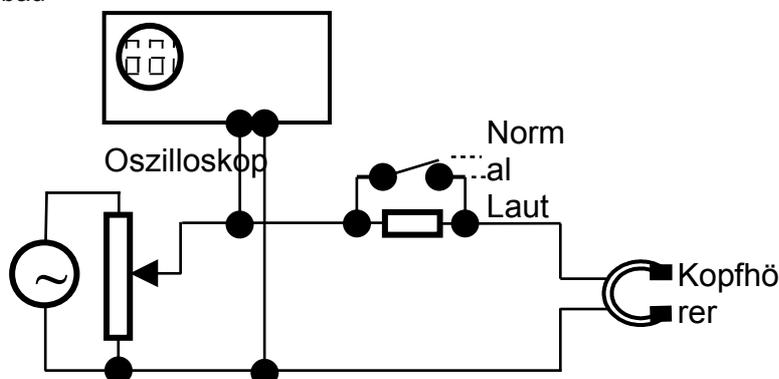
#### 5.1.2 Aufnahme eines EKG mit einem Elektrokardiographen

Dieses Experiment wird zusammen mit dem Betreuer durchgeführt und von diesem angeleitet.

### 5.2 Messung der spektralen Empfindlichkeitsgrenze des Gehörs (Hörkurve)

In diesem Experiment sollen Sie die spektrale Empfindlichkeitsgrenze Ihres Gehörs (Hörkurve) bestimmen, indem Sie für Töne verschiedener Frequenzen die bei der Hörschwelle eingestellte Amplitude des Tonsignals mit dem Oszilloskop messen. Sie betreiben den Signalgenerator in Modus Signalgen. Hierdurch wird die von dem Signalgenerator erzeugte sinusförmige Wechselspannung zum einen auf den Kopfhörer und zum anderen auf Kanal I des Oszilloskops gegeben.

Versuchsaufbau



Zeichnung 1: Schaltplan für den Versuchsaufbau Hörkurve

An Ihrem Arbeitsplatz befindet sich ein Signalgenerator mit zusätzlich eingebautem Mikrophon-Vorverstärker. Der Signalausgang (OUTPUT) des Signalgenerators sollte über ein Koaxialkabel mit BNC-Stecker an den Signaleingang CH. I VERT. INP des Oszilloskops angeschlossen sein.

Die Einstellungen am Oszilloskop sollten immer so gewählt werden, dass der gesamte Bildschirm ausgenutzt wird. Mit der Einstellung LAUT, lässt sich die Lautstärke des Tons weiter erhöhen.

### **Messvorgang für die Hörkurve**

- Stellen Sie die jeweilige Periodendauer am Signalgenerator ein
- Benutzen Sie zur Einstellung der Periodendauer die Anzeige des Oszilloskops
- Optimieren Sie die Oszilloskopeinstellungen, um den vollen Bildschirm auszunutzen
- Vermindern Sie die Lautstärke des jeweiligen Tons bis Sie diesen nicht mehr wahrnehmen
- Analog können Sie auch die Lautstärke eines leisen Tons erhöhen, bis Sie gerade einen Ton wahrnehmen
- Dies ist die Hörschwelle für die jeweilige Frequenz
- Sofern Sie bei selbstvoller Lautstärke keinen Ton hören, schalten Sie den Wählschalter am Signalgenerator auf LAUT
- Lesen Sie am Oszilloskop die entsprechende Spannung ab
- Achtung: In der Stellung NORMAL müssen alle gemessenen Spannungen noch durch 100 dividiert werden.
- Messvorgang für die obere Hörgrenze
- Stellen Sie die Lautstärke auf den höchsten Wert
- Verringern Sie die Frequenz (Erhöhen der Periodendauer) bis Sie gerade wieder einen Ton wahrnehmen
- Dies ist ihre obere Hörgrenze
- Lesen Sie sowohl Spannung, als auch Periodendauer am Oszilloskop ab
- Verringern Sie die Spannungsverstärkung VOLT/DIV am Oszilloskop auf 1/10 der vorherigen Verstärkung
- Stellen Sie mit dem Lautstärkereglern einen Kurvenzug ein, der die gleiche Amplitude besitzt, wie der vorherige Kurvenzug
- Die Spannung ist nun um 1/10 kleiner
- Verringern Sie wieder die Frequenz, bis Sie wieder einen Ton wahrnehmen und notieren Sie Spannung und Periodendauer
- Wiederholen Sie die Punkte 4-6 bis Sie mit den Spannungen in die gleiche Größenordnung kommen, wie mit der vorherigen Methode

### **Messaufgabe**

Führen Sie den obigen Messablauf für die folgenden Periodendauern durch:

- Frequenzbereich 0,2kHz-2kHz: 4 ms, 2 ms, 1 ms, 0,5 ms
- Frequenzbereich 20Hz-0,2kHz: 5 ms, 10 ms, 20 ms, 40 ms
- Frequenzbereich 2kHz-20kHz: 0,4 ms, 0,2 ms, 0,1 ms, 50  $\mu$ s

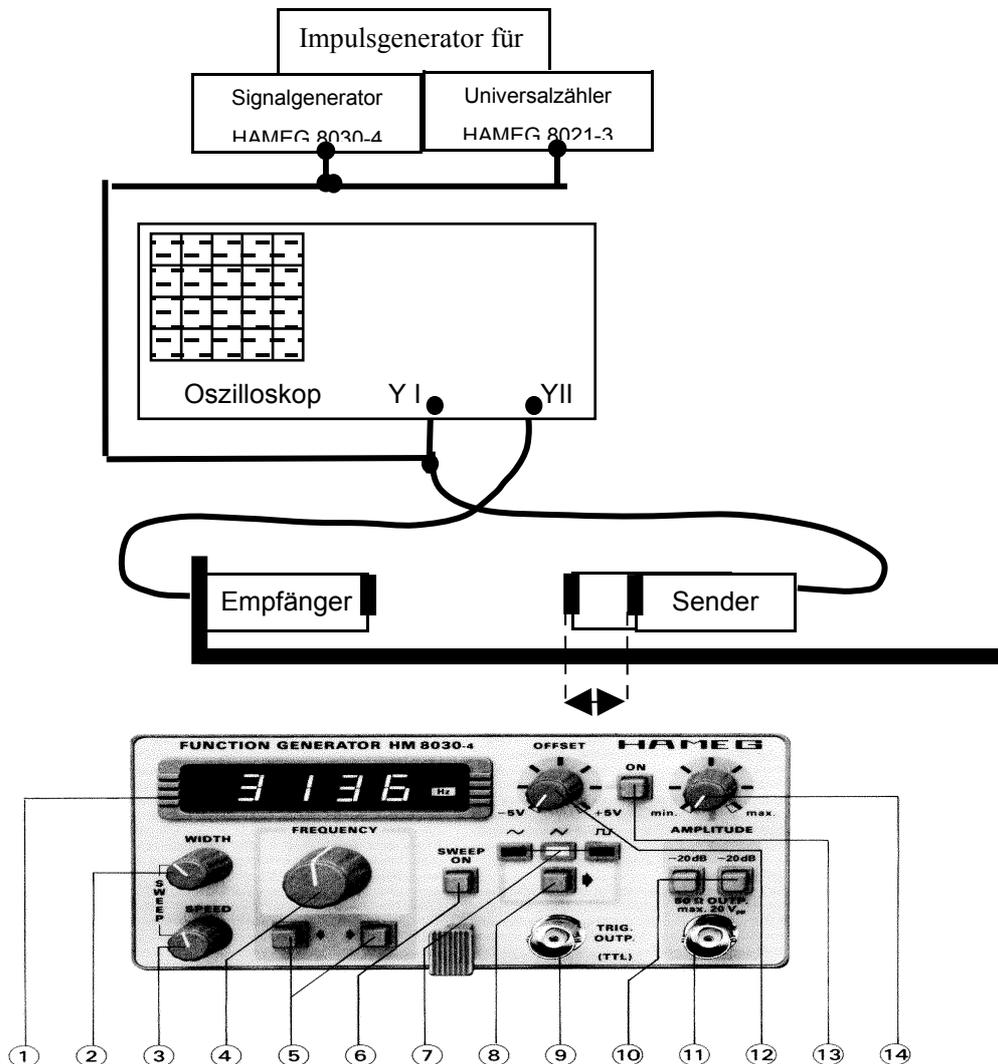
Die vollständige Hörkurve sollte von einem der Praktikanten aufgenommen werden.

Der Messablauf für die obere Hörgrenze sollte für beide Praktikanten durchgeführt werden.

## 5.3 Ultraschall

### 5.3.1 Messung der Schallgeschwindigkeit in Luft

#### Versuchsaufbau



An Ihrem Arbeitsplatz befindet sich eine Schiene mit einer fest montierten und einer lose aufgesetzten Ultraschallkapsel entsprechend der untenstehenden Abbildung angeschlossen. Die bewegliche Kapsel wird als Sender betrieben und kommt an das T-Stück am Eingang Y I des Oszilloskops. Die feststehende Kapsel dient als Empfänger und wird am Eingang Y II angeschlossen. Ein Maßstab erlaubt es, den Abstand  $s$  der Kapseln zu bestimmen.

#### Messvorgang

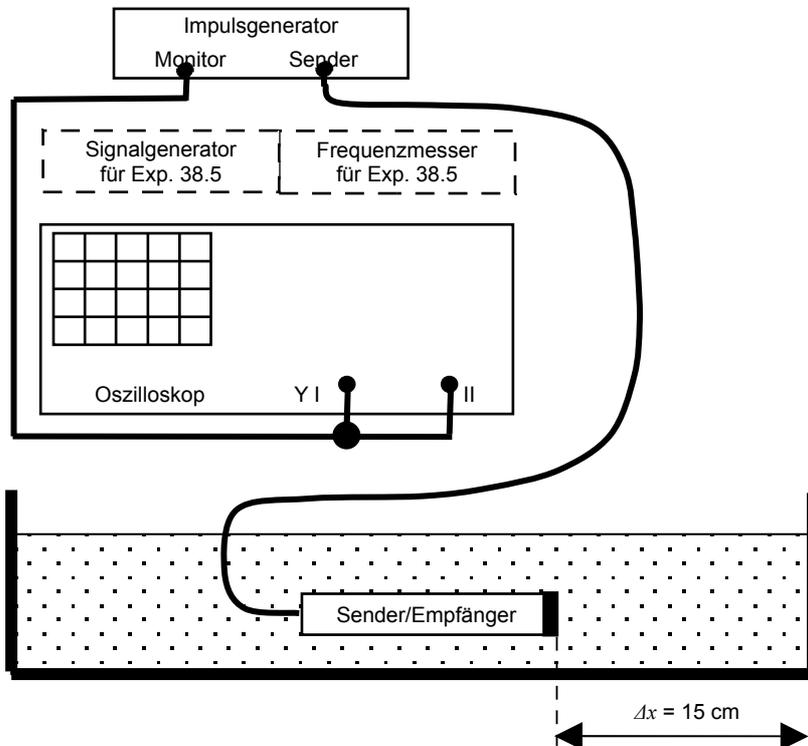
- Stellen Sie am Funktionsgenerator eine Sinus-Frequenz (Taste 8) von 30 kHz (Drehesalter 4) ein.
- Schalten Sie das Oszilloskop auf Zwei-Kanal-Betrieb ein (Taste DUAL gedrückt). Sie sollten jetzt zwei Sinus-Signale sehen können;
- Verschieben Sie die bewegliche Kapsel auf der Schiene möglichst um einen großen Abstand
- Notieren Sie Länge der verschobenen Strecke  $\Delta s$
- Notieren Sie, um wie viel sich der Wellenzug auf dem Oszilloskopbildschirm mit der Verschiebung der Kapsel bewegt. Geben Sie mit Hilfe der Oszillatoreinstellung diesen Wert als zeitliche Verschiebung  $\Delta t$  an

## Messaufgabe

Führen Sie insgesamt drei Einzelmessungen nach dem obigen Ablauf durch, wobei Sie unterschiedliche Längenverschiebungen vornehmen

### 5.3.2 Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Ultraschallimpulsen in Wasser und in Plexiglas

#### Versuchsaufbau



In diesem Experiment benutzen Sie zur Messung der Schallgeschwindigkeit eine Anordnung, wie sie in der Ultraschall Diagnostik üblich ist: Der gleiche Schallkopf dient zunächst als Schallsender für die Erzeugung eines Ultraschallimpulses und dann als Empfänger für das an einer Grenzfläche reflektierte Ultraschallecho.

Stellen Sie anschließend das Stativ mit dem kleinen Schallkopf so neben das Becken, dass der Schallkopf in das Wasser taucht und der Abstand zwischen seiner Stirnfläche und der rechten Stirnwand des Wasserbeckens etwa  $\Delta x = 15 \text{ cm}$  beträgt (siehe Abbildung unten).

Den Schallkopf verbinden Sie mit der Buchse SENDER des an Ihrem Arbeitsplatz stehenden Impulsgenerators. Verbinden Sie das vom Oszilloskop (CH.I VERT.INP ) kommende BNC-Kabel mit der Buchse MONITOR. Schalten Sie das Oszilloskop auf Einkanal-Betrieb (Taste DUAL entriegelt), die Taste TRIG.I/II ist entriegelt. Schalten Sie den Triggereingang durch Drücken der Taste CH I/II auf CH II

Stellen Sie am Impulsgenerator den Regler BURSTFREQUENZ für die Impulsfolge-Wiederholfrequenz auf die rote Markierung.

#### Messvorgang für Ausbreitung in Wasser

- Wählen Sie für die Spannungsverstärkung den höchsten möglichen Wert
- Stellen Sie mit Hilfe der Zeitablenkung TIME/DIV und minimaler Variation der Burstfrequenz die Darstellung am Oszilloskop so ein, dass ein Impuls an der linken Kante des Bildschirms dargestellt wird und der nächste Impuls des Signalgenerators an der rechten Kante des Bildschirms
- Sie stellen so sicher, dass Sie nur die Reflexionen betrachten, die sich zwischen zwei ausgesandten Impulsen befinden.
- Versuchen Sie durch leichtes Bewegen des Schallkopfes herauszufinden, welche Impulse die reflektierten Impulse sind

- Bestimmen Sie die Laufzeit  $\Delta t$  der reflektierten Impulse am Oszilloskop  
*Achtung:* Achten Sie darauf, welche Laufstrecke ein Schallimpuls in Wirklichkeit zurücklegt

### Messvorgang für Ausbreitung in Plexiglas

- Stellen Sie zwischen den Schallkopf und der Wand einen  $d = 3$  cm starken Plexiglas-Block
- Beobachten Sie, wie sich die Reflexionsimpulse verändern.
- Versuchen Sie die Reflexionen im Plexiglas zu identifizieren
- Achtung: Es gibt einen Impuls beim Übergang Wasser  $\rightarrow$  Plexiglas und einen beim Übergang Plexiglas  $\rightarrow$  Wasser
- Bestimmen Sie die Laufzeit  $\Delta t$  zwischen den beiden Impulsen des Plexiglasses und achten Sie wieder auf die Laufstrecken der Impulse

### Messaufgabe

Führen Sie sowohl für die Ausbreitung in Wasser, als auch für die Ausbreitung in Plexiglas 3 Messungen durch.

#### 5.3.5 Beobachtung mit einem medizinischen Diagnostikgerät

Im Praktikum steht für dieses Experiment ein „Real-Time“-Ultraschalldiagnostikgerät zur Verfügung, welches mit der Phase-Array-Technik arbeitet. Die Bezeichnung „Real-Time“ besagt: Das Gerät liefert Bilder mit so großer Folgefrequenz, dass auch Bewegungsvorgänge innerer Organe sichtbar gemacht werden können. Darüber hinaus ist das Gerät auch dafür ausgerüstet, Bewegungsvorgänge im Körper, z.B. die Bewegung des Herzmuskels, graphisch darzustellen („Time-Motion-Verfahren“).

Bitte Sie Ihren Betreuer, die Geräte in Betrieb zu setzen und Ihnen zu erklären. Sie können verschiedene Gegenstände, die in einer Wasserwanne liegen, sowohl visuell als auch mit dem Ultraschallgerät beobachtet.

Die nächste Beobachtung wird am lebenden Objekt vorgenommen. Hier kommt das oben erwähnte Kontaktgel zum Einsatz. Versuchen Sie, wenn Sie möchten, Ihre Organe auf dem Bildschirm zu identifizieren.

Beachten Sie bitte: Der Schallkopf des Geräts „SONOLINE LX“ ist sehr empfindlich. Handhaben Sie ihn sehr vorsichtig, er darf keinesfalls stark erschüttert werden, z.B. zu Boden fallen, oder für Experimente innerhalb des Wasserbeckens benutzt werden !

## 6 Auswertung und Protokollinhalt

**Folgende Dinge sollten in Ihrem Protokoll vorhanden sein:**

- Das einheitliche [Deckblatt](#) mit Name, Matrikelnummer, Studiengang, Semester, möglichst einer E-Mail-Adresse, Name des Versuchsbetreuers, Datum der Versuchsdurchführung, Datum der Protokollabgabe
- Eine kurze Erläuterung der theoretischen Grundlagen und eine Zusammenfassung der Aufgabenstellung, d.h. eine Antwort auf die Frage "Was habe ich im Prinzip gemacht?" (beides zusammen max. zwei Seiten)
- Achten Sie darauf, dass die Theorie auch zu den durchgeführten Versuchen passt.
- alle erhaltenen Rohdaten im Anhang
- Die Auswertung der Daten mit Diskussion der Ergebnisse und der Fehler
- verwendete Quellen und Literatur

**Die Auswertung der Messdaten sollte folgende Punkte enthalten:**

## EKG:

- Eine graphische Darstellung der unterschiedlichen Ableitungen ihrer gemessenen Herzlage (Normallagen) und der im Anhang befindlichen zwei anderen Herzlagen. Diese Darstellung kann auf Millimeterpapier erfolgen, das während der Versuchsdurchführung ausgeteilt wird. Alternativ kann auch ein Plotprogramm, wie Origin benutzt werden.
- Bitte vergleichen Sie die Ableitungen der unterschiedlichen Herzlagen miteinander und beschreiben die Unterschiede kurz in Ihrem Protokoll
- Für die Auswertung des EKGs am echten Probanden erhalten Sie während der Versuchsdurchführung spezielles Auswertungspapier, auf das Sie Ihre erhaltenen Ableitungen kleben können, wie es in Abbildung 3 erkennbar ist. Bestimmen Sie mit Hilfe des Diagramms 4 den Lagetyp des Herzens.

## Hörkurve

- Für die Auftragung der Ergebnisse im doppelt-logarithmischen Maßstab kann Ihnen im Praktikum spezielles Papier zur Verfügung gestellt werden. Eine einfachere Auswertung kann über ein Plotprogramm wie Origin erfolgen, bei dem die doppelt-logarithmische Auftragung durch die Achsoptionen eingestellt werden kann.
- Interpretieren Sie in Ihrem Protokoll die erhaltene Hörkurve in Bezug auf das individuelle Hörvermögen in den unterschiedlichen Frequenzbereichen. Denken Sie daran, den Bereich der oberen Hörgrenze für beide Probanden darzustellen und in das Protokoll zu integrieren. Vergleichen Sie die unterschiedlichen Hörgrenzen der beiden Probanden.
- Führen Sie eine Fehlerdiskussion durch und zeigen Sie kurz auf, wo Fehlerquellen in diesem Versuch liegen könnten.

## Ultraschall

- Bestimmen Sie bei den jeweiligen Versuchsteilen die unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten aus den angegebenen Formeln und vergleichen Sie diese mit den Literaturwerten. Denken Sie an die Bildung des Mittelwerts.
- Führen Sie eine Fehlerrechnung durch, in der Sie die Fehler der Laufzeit und der Strecken abschätzen und damit den Fehler der jeweiligen Schallgeschwindigkeit berechnen. Bitte nicht nur die Standardabweichung angeben, sondern wirklich aus den abgeschätzten Fehlern ausrechnen. Stichwort: Fehlerfortpflanzung. Berücksichtigen Sie diesen Fehler bei dem Vergleich der Werte mit den Literaturwerten. Liegt der gemessene Wert noch in den Fehlergrenzen?
- Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen bei der Ultraschallmessung an Ihrem eigenen Körper

# 7 Anhang

## 7.1 Internet-Links

- <http://www.bmtp.akh-wien.ac.at/people/kollch1/scw2001/usidmed.htm>  
Was ist Ultraschall und wo findet Ultraschall Anwendung in der Medizin
- [http://www.iaim.ira.uka.de/Teaching/ProseminarMedizin/Ausarbeitungen/SS2002/02\\_Ultraschall.pdf](http://www.iaim.ira.uka.de/Teaching/ProseminarMedizin/Ausarbeitungen/SS2002/02_Ultraschall.pdf)  
Proseminar zur Ultraschalldiagnostik, Grundlagen und Anwendung
- <http://studvet.de/downloads/sonovorlesung.pdf>  
Vorlesung zur Ultraschalldiagnostik
- <http://www.dasgesundeohr.de/>  
Wissenswertes über das menschliche Ohr, Aufbau und Funktion, sowie einige Krankheiten, wie Schwerhörigkeit

- <http://www.tlt.de/dateien/71.pdf>  
Grundlagen zur Schalltechnik
- <http://www.medinfo.de/index.asp?r=265&thema=EKG-Elektrokardiographie>  
weiterführende Links zum Elektrokardiogramm
- <http://www.sbg.ac.at/bio/people/musso/physikalische-messtechnik-ge.htm>  
Skript: Physikalische Grundlagen der Meßtechnik Teil 5, Wissenwertes zum Oszilloskop, Aufbau und Funktion, nützliche weiterführende Links
- <http://www.virtuelles-oszilloskop.de>  
Virtuelles Oszilloskop zum Ausprobieren
- <http://www.gesundheit.de/roche/>  
Medizin-Lexika: Wissenswertes aus Anatomie, Krankheit und vieles mehr

## 7.2 Muster-Ergebnisse zu EKG (Herzmodell) zum Auswerten

Linkslage:

Position	I. Ableitung		II. Ableitung		III. Ableitung	
	$U_{galv}/V$	$U_{roh}/V$	$U_{galv}/V$	$U_{roh}/V$	$U_{galv}/V$	$U_{roh}/V$
0	-0,0333	-0,0333	-0,0357	-0,0357	-0,0346	-0,0346
1	-0,0333	0,2780	-0,0550	0,6620	-0,0345	0,3330
2	-0,0334	0,5040	-0,0355	0,9940	-0,0345	0,4480
3	-0,0336	0,7500	-0,0356	0,8220	-0,0345	0,0440
4	0,0339	0,6240	-0,0357	0,2890	-0,0345	-0,3840
5	-0,0340	0,2930	-0,0355	0,0447	-0,0344	-0,3350
0	0,0339	-0,0339	-0,0355	-0,0355	-0,0345	-0,0345
10	-0,0339	-0,3040	-0,0353	-0,0477	-0,0344	0,2190
11	-0,0341	-0,0194	-0,0353	0,6310	-0,0346	0,5810
12	-0,0343	0,6150	-0,0354	1,6350	-0,0346	0,9570
13	-0,0345	0,9210	-0,0358	1,6660	-0,0348	0,6670
14	-0,0348	1,1510	-0,0360	1,1170	-0,0349	-0,0970
15	-0,0348	1,1020	-0,0360	0,2480	-0,0349	-0,9140
16	-0,0350	0,0263	-0,0359	-0,7500	-0,0347	-0,8160
17	-0,0348	-0,5230	-0,0357	-1,0640	-0,0347	-0,5820
18	-0,0347	-0,4000	-0,0356	-0,6880	-0,0349	-0,3140

**Rechtslage:**

<b>Position</b>	<b>I. Ableitung</b>		<b>II. Ableitung</b>		<b>III. Ableitung</b>	
	<b>U<sub>galv</sub>/V</b>	<b>U<sub>roh</sub>/V</b>	<b>U<sub>galv</sub>/V</b>	<b>U<sub>roh</sub>/V</b>	<b>U<sub>galv</sub>/V</b>	<b>U<sub>roh</sub>/V</b>
<b>0</b>	<b>-0,0326</b>	<b>-0,0326</b>	<b>-0,0302</b>	<b>-0,0020</b>	<b>-0,0305</b>	<b>-0,0305</b>
<b>1</b>	<b>-0,0324</b>	<b>0,0244</b>	<b>-0,0307</b>	<b>0,4970</b>	<b>-0,0310</b>	<b>0,4230</b>
<b>2</b>	<b>-0,0322</b>	<b>0,1790</b>	<b>-0,0310</b>	<b>0,9580</b>	<b>-0,0310</b>	<b>0,7350</b>
<b>3</b>	<b>-0,0323</b>	<b>0,3770</b>	<b>-0,0314</b>	<b>1,3210</b>	<b>-0,0315</b>	<b>0,9090</b>
<b>4</b>	<b>-0,0325</b>	<b>0,4400</b>	<b>-0,0316</b>	<b>0,9940</b>	<b>-0,0320</b>	<b>0,5180</b>
<b>5</b>	<b>-0,0326</b>	<b>0,2980</b>	<b>-0,0317</b>	<b>0,5140</b>	<b>-0,0321</b>	<b>0,1732</b>
<b>0</b>	<b>-0,0325</b>	<b>-0,0325</b>	<b>-0,0319</b>	<b>-0,0319</b>	<b>-0,0324</b>	<b>-0,0324</b>
<b>10</b>	<b>-0,0326</b>	<b>-0,4140</b>	<b>-0,0318</b>	<b>-0,5910</b>	<b>-0,0325</b>	<b>-0,2050</b>
<b>11</b>	<b>-0,0325</b>	<b>-0,3250</b>	<b>-0,0317</b>	<b>-0,1302</b>	<b>-0,0326</b>	<b>0,1649</b>
<b>12</b>	<b>-0,0326</b>	<b>0,2080</b>	<b>-0,0319</b>	<b>1,3190</b>	<b>-0,0330</b>	<b>1,0670</b>
<b>13</b>	<b>-0,0328</b>	<b>0,4000</b>	<b>-0,0323</b>	<b>2,1900</b>	<b>-0,0334</b>	<b>1,7580</b>
<b>14</b>	<b>-0,0330</b>	<b>0,5190</b>	<b>-0,0325</b>	<b>2,4800</b>	<b>-0,0338</b>	<b>1,9200</b>
<b>15</b>	<b>-0,0331</b>	<b>0,6540</b>	<b>-0,0327</b>	<b>1,5700</b>	<b>-0,0342</b>	<b>0,8770</b>
<b>16</b>	<b>-0,0333</b>	<b>0,4690</b>	<b>-0,0328</b>	<b>0,1227</b>	<b>-0,0342</b>	<b>-0,3800</b>
<b>17</b>	<b>-0,0330</b>	<b>0,0744</b>	<b>-0,0328</b>	<b>-0,5530</b>	<b>-0,0341</b>	<b>-0,6550</b>
<b>18</b>	<b>-0,0334</b>	<b>-0,0957</b>	<b>-0,0327</b>	<b>-0,5140</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,4480</b>