

# Ultraschall (Sonographie)

## Versuchsziele:

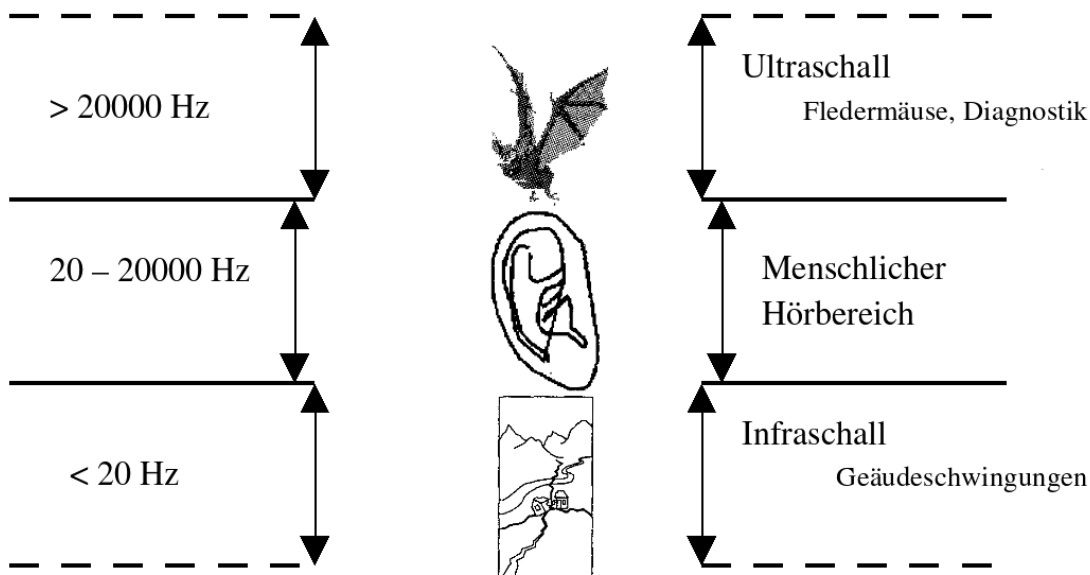
Verständnis der Erzeugung und Detektion von Ultraschallwellen; Ausbreitung, Absorption, Reflexion von Ultraschallwellen; Kenntnis des Dopplereffekts; medizinisch relevante Diagnosemöglichkeiten

## Vorbereitung:

Schallwellen, Schallfrequenzeinteilung, Eigenschaften und Erzeugung von Ultraschall, Dämpfung und Reflexion von Ultraschallwellen, Prinzip der Ultraschallmessung, Doppler-Effekt

## 1 Einleitung

Schall ist eine longitudinale Materiewelle. Die Atome oder Moleküle des Mediums, in dem sich der Schall ausbreitet, schwingen demnach in Richtung der Schallausbreitung. Schall in einem Frequenzbereich von 20 Hz bis ca. 20 000 Hz ist für das menschliche Ohr hörbar. Die Obergrenze der noch wahrnehmbaren Frequenz nimmt aber mit dem Alter ab. Wenn die Frequenz des Schalls unterhalb von 20 Hz liegt bezeichnet man ihn als Infraschall. Bei Frequenzen über 20 000 Hz bezeichnet man ihn als Ultraschall. Tiere (Fledermäuse, Wale, Mäuse) können Ultraschall in einem Frequenzbereich von 20 kHz bis zu einigen 100 kHz. erzeugen (und natürlich auch hören).



Tiere nutzen Ultraschall vor allem zur Orientierung (Echolot, Impuls-Echo Verfahren). Fledermäuse erzeugen beispielsweise Ultraschall mit einer Frequenz von 40 bis 90 kHz, um Beutetiere zu orten aber auch um diese zu betäuben oder Feinde abzuwehren.

## 2 Anwendungsgebiete für Ultraschall

Ultraschall kann in den unterschiedlichsten Bereichen eingesetzt werden. Man kann Materialien auf Fehlstrukturen untersuchen, sensible Objekte können von Verschmutzungen der Oberfläche gereinigt werden und es ist mit dem SONAR (sound navigation and ranging) eine Tiefenbestimmung und Navigation in der Schifffahrt möglich.

## 2.1 Anwendung in der Medizin

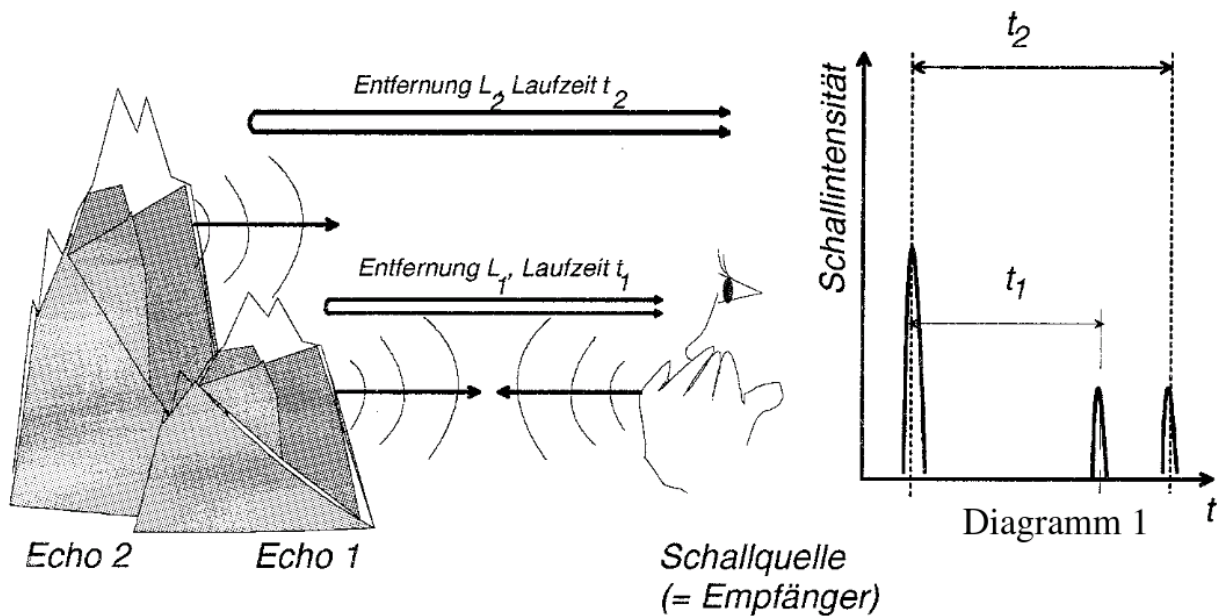
Beim Übergang zwischen Medien verschiedener Dichte ändert sich die Schallgeschwindigkeit und es kommt an der Übergangsfläche zu Reflexionen. Die Erzeugung eines Ultraschallbildes in der Medizin beruht darauf, dass in den Körper eingestrahelter Ultraschall an verschiedenem Gewebe unterschiedlich stark reflektiert wird. Dadurch können schnell Informationen über die Gewebestruktur gewonnen werden ohne dieses dabei zu schädigen (im Gegensatz zur Röntgendiagnostik). Untersuchungen mit Ultraschall nennt man Sonographie.

Luftgefüllte Organe wie die Lunge und der Magen- und Darmbereich sind mit Ultraschallmessungen jedoch nur schwer zugänglich. Ebenfalls sind verschiedene Gewebeschichten mit ähnlichen akustischen Eigenschaften nicht auflösbar.

## 2.2 Arbeitsprinzip

Jeder, der schon einmal ein Echo gehört hat (z.B. in den Bergen), kennt das Arbeitsprinzip eigentlich schon. Ein Echo ist eine von einem Hindernis reflektierte Schallwelle, die man selber erzeugt hat. Aufgrund der physikalischen Eigenschaft mancher Materialien den Schall zu reflektieren, kann eine Methode zur Entfernungsbestimmung abgeleitet werden. Ein Schallimpuls (Rufen) wird losgeschickt und die Zeit  $t_E$  bis zu seiner Rückkehr (Echo) gemessen. Aus der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_S$  des Schalls in Luft ergibt sich dann die Entfernung  $d$ .

$$d = \frac{1}{2} c_S \cdot t_E \quad (1)$$



Entfernungsmessung nach dem Echoprinzip.

Entsprechend der Echobildung bei Hörschall wird auch Ultraschall an der Grenzschicht zwischen Materialien verschiedener „akustischer Impedanz“  $W$  reflektiert. Der reflektierte Anteil der Schallwelle nimmt mit dem Impedanzunterschied zu.

Akustische Impedanz:  $W = c\rho$

$W$  : akustische Impedanz

$c$  : Schallgeschwindigkeit

in Luft 340 m/s, in Wasser 1480 m/s (jeweils Temperaturabhängig!);

in menschlichem Gewebe ca. 1540 m/s

$\rho$ : Dichte des Stoffes

## Akustische Impedanzen

Medium	Impedanz ( $10^6 \cdot \text{Ns/m}^3$ )
Lebergewebe	1,59
Wasser	1,49
Luft	0,00041
Knochen	3,75–7,8

Das Impuls-Echo-Verfahren bildet die Basis zahlreicher bildgebender Methoden der nichtinvasiven medizinischen Diagnostik (und auch in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung). Dabei werden die von der Ultraschallsonde erzeugten Impulse in den zu untersuchenden Körper eingekoppelt und durchlaufen ihn als Schallwellen. An Störungen reflektierte Wellen laufen zurück zur Sonde und werden in ein elektrisches Signal zurückgewandelt. Die zeitliche Aufzeichnung der Amplitude dieses Signals (Amplituden-Scan) wird grafisch als ein so genanntes Ultraschall-A-Bild abgebildet. Anhand der Reflexionsechos im A-Bild können Schalllaufzeiten bestimmt, die Schallgeschwindigkeit im Material berechnet und Störungen im Körper detektiert werden.

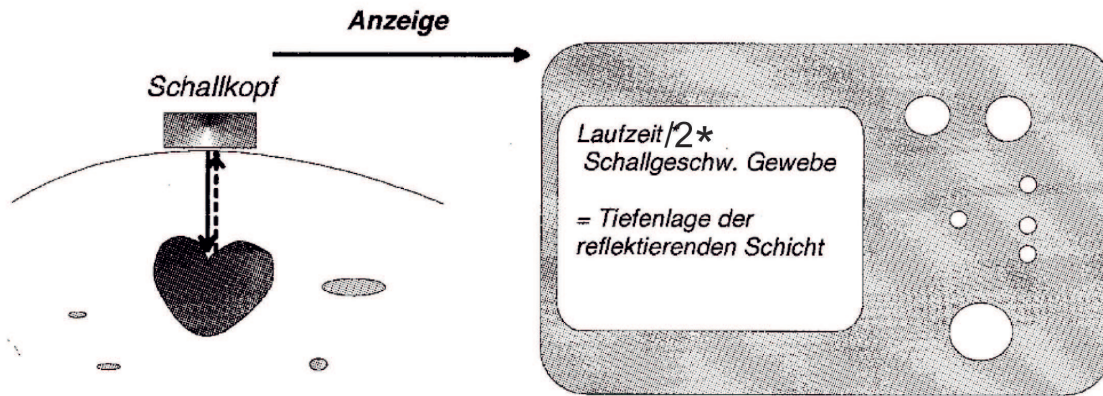
In der medizinischen Diagnostik werden Ultraschallwellen impulsartig eingesetzt, d.h. als Wellenpakete. Der Zeitunterschied zwischen der Signalerzeugung und dem von verschiedenen Gewebearten reflektierten Signal wird gemessen (vgl. Diagramm 1). Aus diesem Wert für die Laufzeit wird unter Verwendung der Schallgeschwindigkeit in Gewebe die Entfernung zwischen dem Sensor am Körper und der reflektierenden Schicht im inneren des Körpers berechnet. Mit einem Rechner werden diese Abstandsinformationen dann zu einem Bild verarbeitet.

Strukturen, die kleiner sind als die Wellenlänge des verwendeten Schalls, können nicht mehr aufgelöst werden (vgl. Auflösungsvermögen des Mikroskops). Deshalb sollte Ultraschall mit einer Wellenlänge kleiner als 1 mm verwendet werden. Schall im für Menschen hörbaren Bereich hat eine Wellenlänge der Größenordnung 1 m, ist also für die Medizin ungeeignet. Vielmehr verwendet man dafür Frequenzen im niederen MHz-Bereich.

### 2.3 Verschiedene Methoden der Diagnostik der Schnittbildsonographie

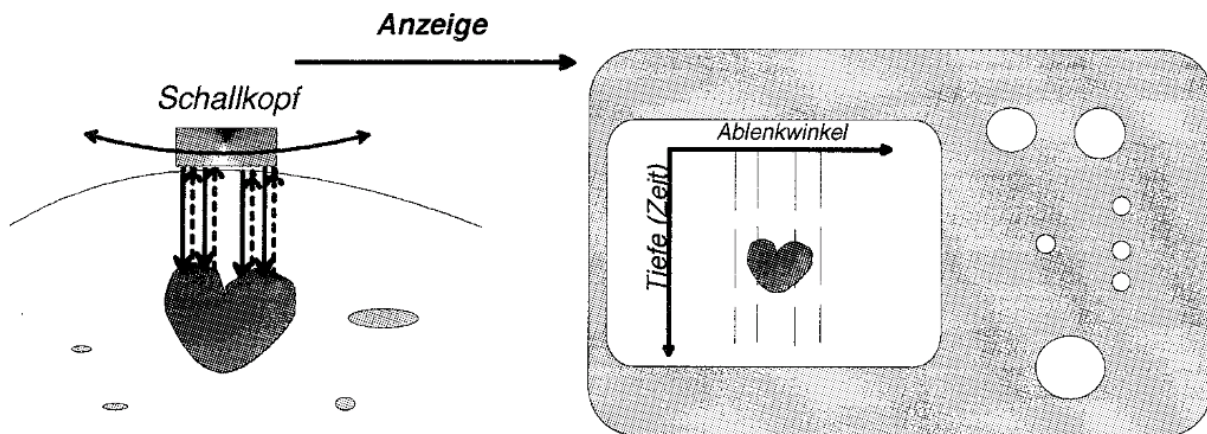
**Der A-Scan („Amplitude“)** Ein eindimensionales Verfahren, das zur Diagnostik eingesetzt wird ist der A-Scan. Es handelt sich hier um ein eindimensionales Verfahren. Der Ultraschallimpuls wird nur entlang einer Achse eingestrahlt, weshalb auch nur Reflexionen zurück in diese Richtung registriert werden. Strukturen müssen durch Verschieben des Sensorkopfes vermessen werden. Deshalb wird der A-Scan zur schnellen Tiefenlokalisierung eingesetzt. Ultraschallwellen breiten sich in einem Medium mit einer vom Material abhängigen Geschwindigkeit aus, die frequenzabhängig sein kann. In Gasen und Flüssigkeiten erfolgt die Schallausbreitung nur in Form von Longitudinalwellen. Dagegen können in Festkörpern auf Grund ihrer elastischen Eigenschaften auch Transversalwellen auftreten. Transversal- und Longitudinalwellen breiten sich im Allgemeinen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aus. Die Schallgeschwindigkeit der in einem Festkörper bei senkrechter Schalleinkopplung erzeugten Longitudinalwellen kann

einfach durch Laufzeitmessungen nach dem Impuls-Echo-Verfahren bestimmt werden. Durch die Verwendung von Probekörpern unterschiedlicher Länge und Schallsonden unterschiedlicher Frequenz sollen im Versuch Aussagen zur Frequenzabhängigkeit der Schallausbreitung und zu Fehlerquellen, die durch den Aufbau der verwendeten Ultraschallsonden bedingt sind, getroffen werden.



*Prinzip des A-Scan- Verfahrens.*

**Der B-Scan („brightness“)** Durch eine gleichförmige Bewegung des Schallkopfes kann nun ein zweidimensionales Schnittbild des Körperinneren gewonnen werden. Dies erfolgt entweder durch Schwenken des Sendekopfes in einer Ebene, oder durch Drehen des Senders um eine Achse senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Schalls.



*Prinzipielle Arbeitsweise des B-Scans.*

Beide Verfahren ermöglichen ein zweidimensionales Schnittbild. Der sektor scan ermöglicht die Aufnahme von Bildern in Bereichen in denen nur sehr kleine Eintrittsfenster für den Ultraschall im Körper vorhanden sind (z.b. Echokardiographie).

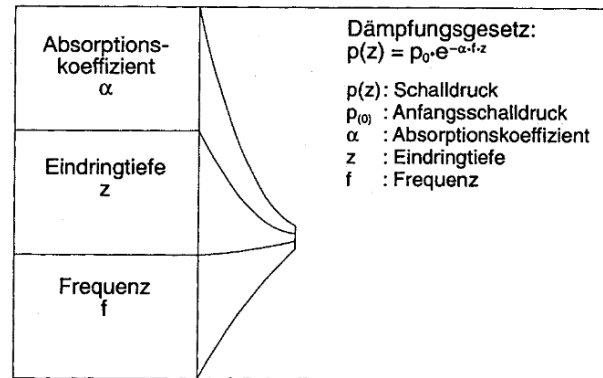
#### Allgemeines zum Verfahren

Typischerweise werden Ultraschallverfahren bei einer Frequenz von 2 MHz bis 20 MHz angewendet. Für die medizinische Diagnostik werden Frequenzen von 2 MHz bis 8 MHz angewandt. Dabei ist festzustellen, dass der Schall um so weiter ins Gewebe eindringt, je geringer seine Frequenz  $f$  ist. Die Dämpfung

einer Schallwelle in einem Medium folgt einem exponentiellen Dämpfungsgesetz:

$$p(z) = P_0 e^{-\alpha f z}$$

### Dämpfung im Gewebe

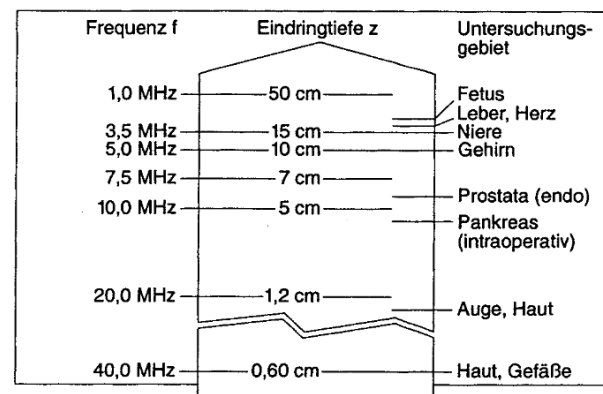


Wie man erkennt, ist die Dämpfung der Welle nicht nur vom Material abhängig ( $\alpha$ ), sondern es gibt auch eine explizite Frequenzabhängigkeit. Die Dämpfung ist um so größer

- je größer der vom Schall zurückgelegte Weg  $z$  ist
- je größer die Materialkonstante  $\alpha$  ist
- je höher die Frequenz  $f$  ist

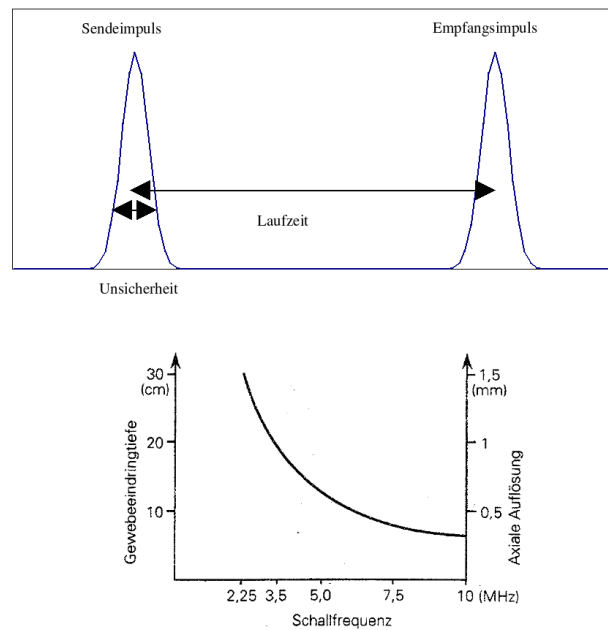
Deshalb sind für verschiedene Untersuchungsgebiete bestimmte Frequenzen vorteilhaft. Hohe Frequenzen eignen sich gut für die Darstellung oberflächennaher Strukturen, tiefe Frequenzen für große Abbildungstiefen.

### Eindringtiefe – Untersuchungsgebiet

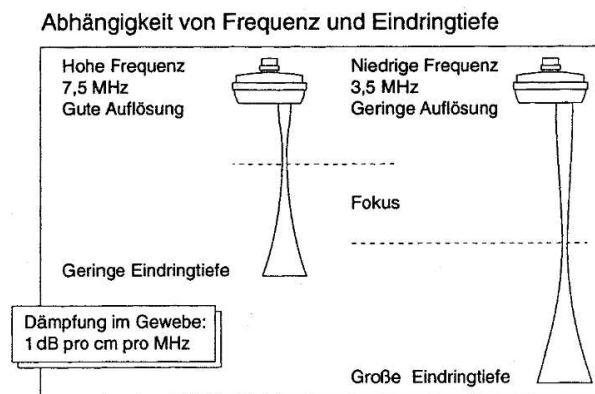


Die Auflösung bezeichnet den kleinstmöglichen Abstand zweier Objekte die grade noch voneinander unterschieden werden können. Man unterscheidet hier die axiale Auflösung (in Richtung der Schallausbreitung) und die laterale Auflösung (quer zur Ausbreitungsrichtung).

Die axiale Auflösung wird vor allem durch die verwendete Impulslänge bestimmt. Denn da eine Laufzeitmessung vorgenommen wird, kann die Laufzeit des Impulses um so genauer bestimmt werden je schmaler die verwendeten Impulse sind.



Die laterale Auflösung hängt stark von der Form des Schallfeldes ab und damit von dem erreichbaren Fokus des Schallfeldes. Die beste laterale Auflösung liegt im Bereich des Fokuspunktes. Mit zunehmender Frequenz verbessern sich die Auflösungseigenschaften einer Ultraschallsonde, da dann die Breite des Fokuspunktes verbessert wird.



Die von außen auf die Haut aufgetragenen Sonden werden deshalb mit Frequenzen von 5 MHz bis 13 MHz betrieben. Dabei geht man einen Kompromiss zwischen Eindringtiefe und Auflösung ein. Typische Frequenzbereiche für die folgenden Untersuchungen sind:

- Brust, Halsweichteile, Extremitäten, Bauchdecke: 5 – 13 MHz
- Bauchraum, Nieren, Leber, Schwangerschaftsvorsorge: 2 – 5 MHz

## 2.4 Die Doppler-Sonographie

Mit der Schnittbildsonographie kann man Aufschluss über die Anatomie der Körperorgane und des Gewebes gewinnen, die Doppler-Sonographie dient der Untersuchung des Herz- und Gefäßsystems. Sie erlaubt mit Hilfe der festgestellten Blutgeschwindigkeiten Aussagen über Verengungen und Verschlüsse der Gefäße.



Man registriert im Blut nicht nur ein Objekt (Blutkörperchen), sondern sehr viele Blutkörperchen mit verschiedenen Geschwindigkeiten. Es werden zwei Verfahren unterschieden :

Beim spektralen Dopplerverfahren wird das Gefäß nur von einem Schallstrahl geschnitten, es wird also zu einer festen Zeit gemessen, und so die spektrale Geschwindigkeitsverteilung des Blutes ermittelt.

Beim Farbdopplerverfahren wird an verschiedenen Orten gleichzeitig gemessen, und die Laufzeit selektiv ausgewählt. So kann eine räumliche Verteilung der Blutgeschwindigkeit gewonnen werden.

Anwendungsgebiete der Doppler-Sonographie sind folgende Gefäße:

- Halsgefäß : 5 – 7,5 MHz
- Intracranielle Gefäße : 2 MHz
- Bauch- Beckengefäße : 3,5 MHz
- Beingefäße : 5 – 7,5 MHz

Nebenwirkungen sind mit den in der Medizin verwendeten Energien nicht zu erwarten. Kritisch wird derzeit allenfalls die Untersuchung am Auge und von Embryonen gesehen.

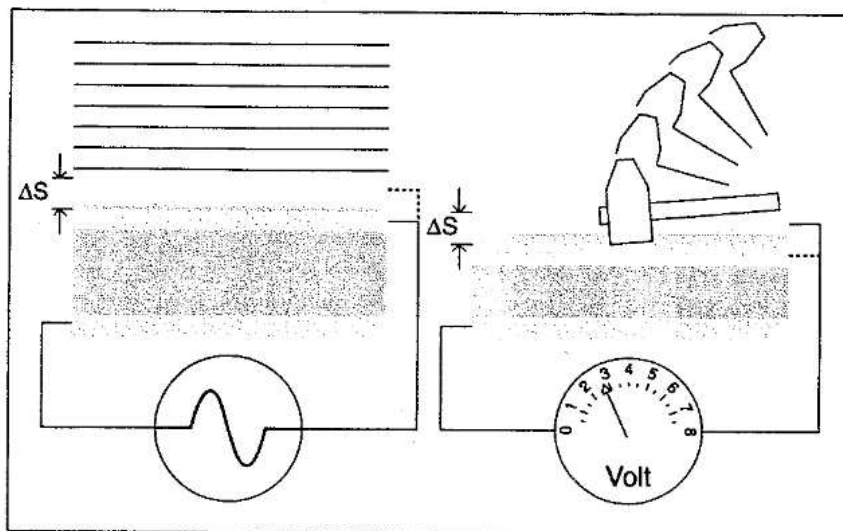
Anders stellt sich allerdings die Situation bei der Anwendung von Ultraschall als Therapie zur Zerstörung von Nierensteinen dar. Hier sind Verletzungen nicht auszuschließen.

### 3 Erzeugung von Ultraschall

Die Erzeugung von Ultraschall sowie der Empfang der Echosignale basiert auf dem umgekehrten piezoelektrischen Effekt. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung an einen solchen piezoelektrischen Kristall verformt sich dieser. Legt man nun eine Wechsellspannung an, so wird der Kristall zu Schwingungen angeregt und sendet eine Schallwelle aus.

Im Empfangsfall bewirken die auftreffenden Schallsignale eine Verformung des Kristalls. Diese Verformungen bewirken eine Ladungsverschiebung im Kristall. Diese kann dann als Spannung abgegriffen werden.

#### Piezo-Effekt



Als Schallquellen und –empfänger werden vorwiegend aus Bleizirkonat-Titanat (PZT) gefertigte Kristalle eingesetzt. Der Schallkopf eines Diagnosegerätes enthält ein oder mehrere Piezoelemente die unterschiedlich angeordnet sein können.

## 4 Physikalische Grundlagen

### 4.1 Schallwellen

Anders als beim Licht handelt es sich bei Schallwellen um longitudinale Materiewellen. Sie können sich also nur in gasförmiger, flüssiger oder fester Medien ausbreiten, nicht aber im Vakuum. Der Ausgangspunkt einer Schallwelle heißt Schallquelle. Die von einer Schallquelle ausgehenden Schallwellen bezeichnet man als Wellenfronten. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Wellenfronten ist die Schallgeschwindigkeit. Allgemein gilt für Longitudinalwellen :

$$\text{In Festkörpern: } c_{Fk} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$c$  : Schallgeschwindigkeit  
 $\rho$  : Dichte des Mediums  
 $E$  : Elastizitätsmodul

$$\text{In Gasen: } c_G = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}} = \sqrt{\kappa RT}$$

$\kappa$  : Adiabatenexponent  
 $p$  : Gasdruck  
 $R$  : allgemeine Gaskonstante  
 $T$  : Temperatur

$$\text{In Flüssigkeiten: } c_F = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

$K$  : Kompressionsmodul

Die Schockwellen einer Schallwelle können formal genauso wie die Wellenfronten einer elektromagnetischen Welle behandelt werden. An die Stelle des Brechungsindex  $n$  tritt die akustische Impedanz, und die Ausbreitungsgeschwindigkeit verkleinert sich.

### 4.2 Eigenschaften von Ultraschall

Der Zusammenhang zwischen der Frequenz  $\nu$  und der Wellenlänge  $\lambda$  der Schallwelle ist formal der gleiche wie beim Licht, nur mit einer anderen Ausbreitungsgeschwindigkeit. Es tritt keine Dispersion auf.

$$c = \lambda f$$

Die Schallstärke ist proportional zum Quadrat der Frequenz und zum Quadrat der Elongation der schwingenden Materieteilchen.

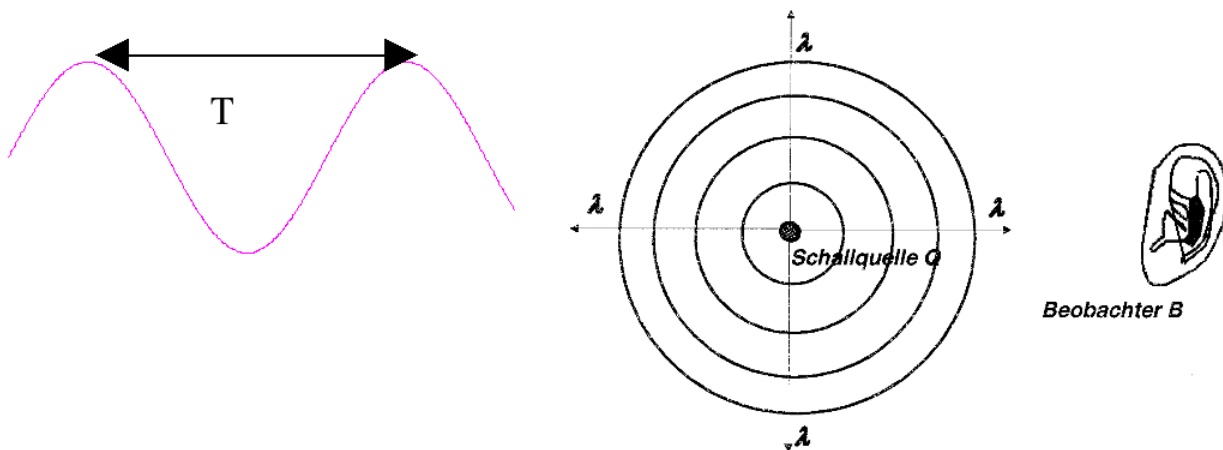
$$J = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 y^2$$

$\omega$  : Kreisfrequenz des Schalls  
 $y$  : Elongation des Kristalls

### 4.3 Der Doppler-Effekt

Als Doppler-Effekt bezeichnet man die Änderung von Frequenz bzw. Wellenlänge, sobald sich Schallquelle und Beobachter relativ zueinander bewegen. Im statischen Fall empfängt ein Beobachter, in der Entfernung  $s$  von der Quelle, Schallwellen mit der Frequenz  $f$ . Der zeitliche Abstand zwischen zwei Zuständen mit gleicher Phase (Auslenkung) wird Periode  $T$  genannt.  $T = 1/f$





Bewegt sich nun die Schallquelle auf den Beobachter zu, so wird ihr Abstand während einer Periodendauer  $T$  um  $\Delta s$  kleiner:

$$\Delta s = v_{\text{Quelle}} T$$

Der räumliche Abstand zweier Punkte gleicher Phase der Welle ist also im Vergleich zum statischen Fall um  $\Delta \lambda$  verkürzt.

$$\Delta \lambda = v_{\text{Quelle}} T$$

Der Beobachter sieht also eine um  $\Delta \lambda$  verkürzte Wellenlänge  $\lambda'$ :

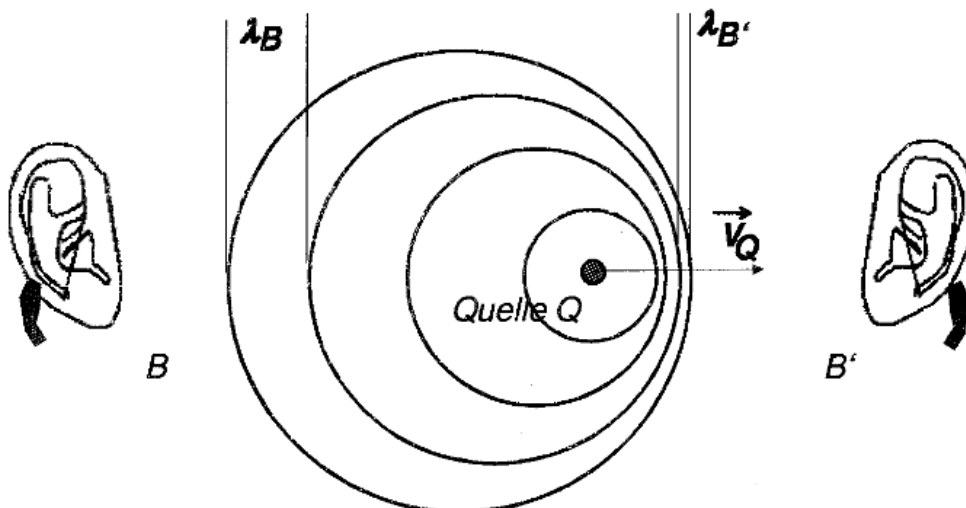
$$\lambda' = \lambda - \Delta \lambda$$

bzw.

$$\begin{aligned} \frac{c}{f'} &= \frac{c}{f} - v_{\text{Quelle}} T = \frac{c}{f} - v_{\text{Quelle}} \frac{1}{f} \\ \Rightarrow \frac{f}{f'} &= 1 - \frac{v_{\text{Quelle}}}{c} \Rightarrow f' = f \frac{1}{1 - \frac{v_{\text{Quelle}}}{c}} \end{aligned}$$

Für  $c \gg v_{\text{Quelle}}$  kann die Frequenz wie folgt genähert werden:

$$\Delta f = f' - f = f \frac{v_{\text{Quelle}}}{c}$$



Bewegt sich der Beobachter auf die Schallquelle zu, so erreichen ihn die Zustände gleicher Phase in kürzerem Abstand:

$$T = \frac{\lambda}{c}$$
$$T' = T - \Delta T = \frac{\lambda}{c + v_{Beo}}$$
$$\Rightarrow f' = f \left( 1 + \frac{v_{Beo}}{c} \right)$$

Bei bewegter Quelle und Beobachter gilt also allgemein für die empfangene Frequenz:

$$f' = f \left( \frac{1 \pm \frac{v_{Beo}}{c}}{1 \mp \frac{v_{Quelle}}{c}} \right) \quad (2)$$

## 5 Versuchsdurchführung

### 5.1 Impuls-Echoverfahren

Für die Messungen stehen verschiedene Ultraschallköpfe zur Verfügung (1 MHz, 2 MHz, 4 MHz). Das Sende/Empfangsgerät verfügt über 2 Sondenanschlüsse, die entsprechend geschaltet werden können:

- 1/1: nur Ausgang 1; Sender ist gleichzeitig Empfänger (Impuls-Echo)
- 1/2: 1 ist Sender; 2 ist Empfänger (Transmissionsmessung)
- 2/1; 2/2: analog für Ausgang 2

An dem Gerät können Sie sowohl die Sendeleistung („Output“) des Ultraschallkopfes als auch die Verstärkung („Gain“) des US-Empfängers einstellen. Achten Sie unbedingt darauf, dass die Stellung jeweils auf „0“ steht, bevor Sie Sonden einstecken oder abziehen! Die Einstellung „10 db“ ist jeweils ein guter Startwert.

#### Aufgaben:

1. Starten Sie den A-Scan der Messsoftware und ermitteln Sie daraus die Frequenz des verwendeten US-Kopfes. Stimmt sie mit der angezeigten Frequenz (rechter Bildschirmrand) überein?
2. Bestimmen Sie die Schallgeschwindigkeit in Polyacryl (PA) mit dem Impuls-Echo Verfahren. Dazu verwenden sie die 4 verschieden langen PA-Zylinder. Messen Sie jeweils deren Länge und bestimmen die Pulslaufzeit im Echo-Verfahren. Tragen Sie Ihre Ergebnisse in ein Weg-Zeit Diagramm auf und bestimmen Sie aus der Steigung die Schallgeschwindigkeit von PA. Warum ist diese Methode besser geeignet als die Schallgeschwindigkeit aus einer Einzelmessung zu bestimmen?
3. Bestimmen Sie nun auch die Schallgeschwindigkeit in Polyethylen (PE) und Messing. Wodurch kommen die unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten zustande?
4. Messen Sie mit der 1 MHz-Sonde und der 4 MHz-Sonde die Signale der verschiedenen Bohrungen in dem Acryl-Testblock. Was fällt Ihnen bei der Verwendung der beiden Sonden auf? Mit welcher Sonde können Sie die beiden kleinen, nahe zusammen liegenden Bohrungen auflösen?
5. Erzeugen Sie nun durch langsames Führen der Sonde über den Testblock ein B-Bild desselben (B-Scan in der Messsoftware)
6. Untersuchung am Brustphantom  
In dem vorliegenden Brustphantom sind 2 Bereiche mit verhärtetem (Tumor-)Gewebe zu ertasten. Versuchen Sie mit der 1 MHz-Sonde (und Unterstützung des/der Tutor/in) ein B-Bild des Tumorbereiches zu erzeugen.
7. Echokardiografie  
Veranschaulichen Sie im B-Scan das Schlagen eines Herzens. Füllen Sie hierzu Wasser in das Herzmodell und befestigen Sie die 1 MHz US-Sonde am Stativ, sodass sie in die Wasseroberfläche eintaucht. Simulieren Sie den Herzschlag durch (sanftes) Betätigen der Gummipumpe.
8. Doppler-Effekt  
Nutzen Sie das Doppler-Ultraschallgerät (nur einfach vorhanden), um Ihren Puls hörbar zu machen. Freiwillige Extra-Aufgabe: Berechnen Sie die Fließgeschwindigkeit des Blutes (Frequenzverschiebung wird angezeigt, Sondenfrequenz an Rückseite des Ultraschallgerätes). Verwenden Sie hierzu die folgende Beschreibung.

### 5.2 Der Doppler-Effekt – Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten

Die Sonde (in Ruhe,  $v_S = 0$ ) sendet ein Signal aus, welches am bewegten Objekt ( $v_E = v$ ) reflektiert wird. Das reflektierte Signal geht also vom bewegten Objekt (= Sender,  $v_S = v$ ) aus und wird vom ruhenden Empfänger empfangen. Die Sonde muss dazu unter einem endlichen Winkel ( $\theta < 90^\circ$ ) zur strömenden Flüssigkeit gehalten werden. Aus Gl. (1) ergibt sich damit:

$$f' = f_0 \left[ \left( 1 + \frac{v \cos \Theta}{c} \right) \frac{1}{\left( 1 - \frac{v \cos \Theta}{c} \right)} \right]$$

Da  $v \ll c$  kann der zweite Term  $\left( \frac{1}{1 - \frac{v}{c}} \right)$  durch  $\left( 1 + \frac{v}{c} \right)$  genähert werden. Damit gilt

$$f' = f_0 \left( 1 + \frac{v \cos \Theta}{c} \right)^2$$

und aus der Frequenzverschiebung  $\Delta f = f' - f_0$  kann (unter Vernachlässigung des quadratischen Terms  $((v/c)^2 \ll (v/c))$ ) die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  bestimmt werden:

$$\Delta f \approx 2f_0 \frac{v}{c} \cos \Theta$$

$$v = \frac{\Delta f}{f_0} \frac{c}{2 \cos \Theta}$$

