

# Versuch OHR: Grundlagen der Akustik / Physik des Hörens

Physikpraktikum für Studierende der Biologie

*Hinweis: Für diesen Versuch ist eine Online-Version der Anleitung auf <http://ibe.physik.rwth-aachen.de> verfügbar.*

## 1 Motivation und Ziel des Versuchs

Grundkenntnisse zur Physik der akustischen Wellen oder Schallwellen sind zum Verständnis von Gehör und Stimme, aber auch von diagnostischen oder therapeutischen Anwendungen von Ultraschall für die Medizin von großer Bedeutung. Der Versuch dient der Vermittlung ausgewählter physikalischer Grundlagen des Hörens.

Das menschliche Ohr kann Schallwellen mit Frequenzen zwischen 16 Hz und 20000 Hz wahrnehmen, wobei Druckschwankungen von bis zu  $10^{-8}$ , also einem 100-Millionstel, des Atmosphärendrucks ausgewertet werden. Die mit solch kleinen Druckschwankungen verbundenen Maximalauslenkungen der Gasmoleküle liegen bei  $10^{-10}$  m und damit unterhalb eines Moleküldurchmessers. Im Versuch werden die Grundlagen von Wellen rekapituliert, bevor wichtige Kenngrößen der physikalischen und physiologischen Akustik kennen gelernt und der Umgang mit ihnen geübt wird. Nach einfachen Experimenten zur physiologischen Akustik werden physikalische Grundlagen der Funktion von Mittelohr und Innenohr gemeinsam erarbeitet.

## 2 Physikalischer Hintergrund

Das Verständnis der Funktion des Ohres setzt Grundkenntnisse zu Wellen und der Beschreibung des Schalls als Welle voraus.

## 2.1 Wellen und Schall

Wird ein Teilchen in einem elastischen Medium aus der Ruhelage ausgelenkt, so überträgt sich die Bewegung durch elastische Kopplung mit einer zeitlichen Verzögerung auch auf die benachbarten Teilchen: Der Bewegungszustand pflanzt sich als **Welle** mit einer charakteristischen Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  fort. Anschauliche Beispiele für die Ausbreitung von Wellen sind:

- Wasserwellen, erregt durch einen einmalig oder periodisch eintauchenden Körper,
- Wellen auf einem gespannten Seil, als Einzelwellenberg oder Sinuswelle,
- Wellen längs oder quer zu einer Kette aus gleichartigen Federn und Massenelementen.

Für Wellen ist charakteristisch, dass sie Energie und Impuls transportieren, ohne dass im Zeitmittel ein Materietransport vorliegt. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen

- Transversalwellen (Querwellen), bei denen die Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen und
- Longitudinalwellen (Längswellen), bei denen die Teilchen in Ausbreitungsrichtung schwingen. Dadurch entstehen Dichteschwankungen.

Durch die Schwingung von Teilchen in Ausbreitungsrichtung der Welle kommt es zu Zonen mit Verdichtungen und Verdünnungen der Teilchen, die aufeinander folgen und sich ebenfalls wellenartig im Raum ausbreiten. Die Verdichtung, d.h. die Verkleinerung der Molekülabstände verursacht einen Anstieg des Luftdrucks gegenüber dem schon vorhandenen atmosphärischen Luftdruck. Analog wird durch die Verdünnung, d.h. die Vergrößerung der Teilchenabstände ein niedrigerer Luftdruck erzeugt. Auf diese Weise entstehen Luftdruckschwankungen, die sich dem schon vorhandenen atmosphärischen Luftdruck überlagern und als Schalldruck  $p$  bezeichnet werden. Der Schalldruck nimmt dabei verglichen mit dem atmosphärischen Druck (Ruhedruck der Atmosphäre: 101325 Pascal = 1013,25 Hektopascal) sehr kleine Werte an. So tritt an der Schmerzschwelle des Menschen ein Effektivwert des Schalldrucks  $p$  von gerade einmal 63 Pascal auf.

In Gasen und Flüssigkeiten kann sich eine Schallwelle nur durch eine Schwingung der Teilchen entlang der Ausbreitungsrichtung fortpflanzen. Hier kann sich Schall deshalb nur als Longitudinalwelle ausbreiten. In Festkörpern, in denen die Gleichgewichtslagen der schwingenden Teilchen durch starke Bindungen fixiert sind, können darüber hinaus auch transversale Schallwellen mit einer Schwingungsrichtung der Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle auftreten.

Eine besondere Bedeutung haben sog. harmonische oder sinusförmige Schallwellen. Zu ihrer Beschreibung stellt man sich vor, dass jedes Teilchen des Mediums als Funktion der Zeit  $t$  eine sinusförmige Schwingung ausführt.

$$\text{Schwingung } a = A \sin \left( 2\pi \frac{t}{T} + \phi \right) ; \phi \text{ und } x \text{ konstant}$$

Hierbei sind  $a$  die Auslenkung des Teilchens aus der Ruhelage,  $A$  die maximale Auslenkung oder Amplitude,  $T$  die Zeit für eine Schwingung oder Periodendauer und  $\phi$  die Phasenkonstante. Da benachbarte Teilchen mit einer zeitlichen Verzögerung schwingen, ist die Phasenkonstante  $\phi$  von der Ortskoordinate  $x$  abhängig.

Eine Momentaufnahme der Auslenkungen  $a$  aller Teilchen zu einem festen Zeitpunkt  $t = \text{konstant}$  zeigt eine räumliche Verteilung, die ebenfalls sinusförmig ist:

$$\text{Momentbild einer Welle } a = A \sin \left( 2\pi \frac{x}{\lambda} + \phi' \right) ; \phi' \text{ und } t \text{ konstant}$$

Hier ist  $\lambda$  die Wellenlänge, d.h. die Länge der räumlichen Periode.

Die von Zeit und Ort abhängige Wellenbewegung kann damit zusammenfassend folgendermaßen mathematisch beschrieben werden:

$$\text{Wellenbewegung } a = A \sin \left( 2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{x}{\lambda} + \phi \right) .$$

Führt man die Größen Kreisfrequenz und Wellenvektor ein, dann kann die Wellengleichung einfacher geschrieben werden als:

$$\begin{aligned} \text{Wellengleichung } a &= A \sin (\omega t - kx + \phi) & (1) \\ \text{mit der Kreisfrequenz } \omega &= \frac{2\pi}{T} & (2) \\ \text{und dem Wellenvektorbetrag } k &= \frac{2\pi}{\lambda} \end{aligned}$$

Nach der Zeit  $t = T$  hat jedes Teilchen eine vollständige Schwingung durchlaufen und befindet sich dann in der gleichen Lage wie zur Zeit  $t = 0$ . Gleichzeitig verschiebt sich der ganze Wellenzug räumlich um die Strecke  $x = \lambda$ . Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle ist daher

$$v = \frac{\text{Weg der Welle}}{\text{Zeit}} = \frac{\lambda}{T}$$

Oft beschreibt man eine Welle auch durch die Frequenz  $f$ . Sie ist der Kehrwert der Periodendauer der Welle  $f = \frac{1}{T}$ , hat folglich die Einheit  $1 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ Hz}$  und beschreibt, wie oft pro Sekunde ein Teilchen eine vollständige Schwingung um seine Ruhelage ausführt. Das menschliche Ohr ist als Empfänger für Frequenzen zwischen 16 Hz (untere Hörgrenze) und 20000 Hz (obere Hörgrenze) empfindlich. Unter Verwendung der Größe „Frequenz“ kann man  $v = \frac{\lambda}{T}$  auch schreiben als

$$\text{Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle } v = \lambda f .$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen hängt vom Medium ab. Sie ist gewöhnlich unabhängig von der Amplitude  $A$  und auch in erster Näherung unabhängig von der Frequenz  $f$  bzw. der Wellenlänge  $\lambda$ . Für die Schallausbreitung in Luft kann deshalb die Schallgeschwindigkeit zu  $v = 343 \text{ m/s}$  angegeben werden. Die Schallgeschwindigkeit ist allerdings temperaturabhängig.

Der oben angegebene Wert gilt für 20°C. Für steigende Temperaturen wächst die Schallgeschwindigkeit, und zwar im Bereich von -20°C bis +40°C annähernd linear um 6 m/s pro 10 K Temperaturänderung.

*Aufgabe V1: Berechnen Sie die Wellenlängen des Schalls in Luft für  $T = 20^\circ\text{C}$  für die untere und die obere Hörgrenze.*

Wie groß die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen in einem elastischen Mediums ist, wird von der Dichte  $\rho$  und den elastischen Konstanten des Materials bestimmt. Oben wurde bereits bemerkt, dass in festen Körpern sowohl Longitudinal- als auch Transversalwellen auftreten können. Die entsprechenden Schallgeschwindigkeiten sind

$$v_{\text{long}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{und} \quad v_{\text{trans}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

mit dem Elastizitätsmodul  $E$  und dem Schubmodul oder Torsionsmodul  $G$ .

Da die Schubspannungen in Flüssigkeiten oder Gasen immer Null sind, können sich hier nur Longitudinalwellen ausbreiten. Die Schallgeschwindigkeit ergibt sich zu

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad \text{mit der Kompressibilität} \quad \frac{1}{K} = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p}$$

*Aufgabe V2: Berechnen Sie die Ausbreitungsgeschwindigkeit longitudinaler Schallwellen in Knochen und Wasser und vergleichen Sie sie mit der Schallgeschwindigkeit in Luft. Elastizitätsmodul von Knochen  $2,0 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ , Kompressionsmodul von Wasser  $2,08 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ , Dichten von kompaktem Knochen bzw. Wasser:  $\rho_K = 1,8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_W = 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$*

Eine wichtige Größe zur Beschreibung der Schallfortleitung in einem Medium ist die Schallkennimpedanz  $Z$ . Dies ist der Widerstand, der einer Schallausbreitung entgegen wirkt.  $Z$  berechnet sich als Quotient aus Schalldruck  $p$  und Schallschnelle  $\nu$ :

$$Z = \frac{p}{\nu}$$

Die Schallschnelle  $\nu$  gibt an, mit welcher Wechselgeschwindigkeit die Luftteilchen (bzw. Partikel des Schallübertragungsmediums) um ihre Ruhelage schwingen; also die Momentangeschwindigkeit eines schwingenden Teilchens, und ist somit zu unterscheiden von der Schallgeschwindigkeit im Medium. Für die Schallkennimpedanz gilt auch

$$Z = \rho \cdot v$$

mit  $\rho$  als Dichte des Mediums und  $v$  als Schallgeschwindigkeit im Medium. Aus  $Z = \rho \cdot v$  folgt, dass die Schallkennimpedanz in einem homogenen, invarianten Schallfeld räumlich und zeitlich konstant ist.

Bisher haben wir immer die Ausbreitung des Schalls in einem homogenen Medium angenommen. Wird das Medium durch ein anderes begrenzt, so kann sich die Welle nicht ungestört durch die Grenzfläche zwischen beiden ausbreiten und man beobachtet - unabhängig von der Art der Welle - im Prinzip stets folgende Erscheinungen:

1. Breitet sich die Welle im zweiten Medium mit einer anderen Geschwindigkeit aus, so muss sich nach  $v = \lambda f$  die Wellenlänge ändern. Die Frequenz bleibt beim Übergang der Welle in ein anderes Medium konstant, da sie durch die Quelle vorgegeben wird. Folglich gilt beim Übergang einer Welle zwischen zwei Medien:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} .$$

2. Trifft die Welle schräg auf eine ebene, glatte Grenzfläche, so ändert sie abrupt ihre Ausbreitungsrichtung. Dieses Phänomen der Brechung ist aus der Optik gut bekannt.
3. An der Grenzfläche zwischen zwei Medien tritt Reflexion auf, d.h. ein Teil der Strahlungsleistung wird in das erste Medium zurückreflektiert und nur der verbleibende Anteil pflanzt sich im zweiten Medium fort. Vom Schall ist dieses Phänomen als Echo bekannt. Da die Reflexion von Schall an einer Grenzfläche für das Verständnis der Funktion des Ohres von besonderer Bedeutung ist, wird sie im Folgenden näher erläutert.

Die Größe des reflektierten Anteils der Welle wird durch den Reflexionskoeffizienten  $r$  beschrieben, der das Amplitudenverhältnis von reflektierter und einfallender Welle beschreibt. Ebenso wird die Bezeichnung des Reflexionsgrades  $R$  verwendet, bei dem das Verhältnis der Intensitäten von reflektierter und einfallender Welle gebildet wird. Aus der quadratischen Beziehung zwischen Amplitude und Intensität folgt, dass  $R = r^2$  gelten muss.

Analoge Definitionen kann man für den Anteil der transmittierten, d.h. der durch die Grenzfläche durchtretenden Welle als Transmissionskoeffizient bzw. Transmissionsgrad treffen. Aufgrund der Erhaltung der Energie muss an der Grenze zwischen zwei Medien die Summe aus der reflektierten und der durchgelassenen Intensität gleich der einfallenden Intensität sein. Dies ist gleichbedeutend mit der Forderung  $R + T = 1$ . Allgemein werden  $R$  und  $T$  durch den Wellenwiderstand  $Z$  der an der Grenzfläche zusammentreffenden Medien bestimmt. Beispielsweise gilt für einen senkrechten Einfall der Welle von einem Medium 1 in ein Medium 2 für den Reflexionskoeffizienten

$$r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} ,$$

wobei  $Z_1$  und  $Z_2$  die Wellenwiderstände der aneinandergrenzenden Medien sind. Diese Gleichung gilt wiederum für beliebige Wellenarten, wenngleich  $Z$  für jede Wellenart anders definiert ist.

Für Lichtwellen z.B. ergibt sich der Wellenwiderstand als Kehrwert des Brechungsindex, nämlich  $Z = 1/n$ . Im Fall der Schallwellen ist  $Z = \rho \cdot v$  die oben eingeführte Schallkennimpedanz.

Für Schallwellen gibt der Reflexionskoeffizient  $r$  den Quotienten aus dem reflektierten Schalldruck und dem einfallenden Schalldruck an. Interessiert man sich für den Anteil der durch eine Grenzfläche transmittierten Intensität, dann ergibt sich diese für den Sonderfall eines senkrechten Einfalls der ankommenden Schallwelle zu

$$T = 1 - R = 1 - r^2 = 1 - \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2},$$

*Aufgabe V3: a) Bestimmen Sie den Reflexionsgrad einer Schallwelle beim senkrechten Übergang von Luft in Wasser (Dichte der Luft:  $\rho_L = 1,204 \text{ kg/m}^3$ ).*  
*b) Geben Sie den Transmissionsgrad für den Übergang von Schallwellen von Luft in Wasser in % an.*  
*c) Diskutieren Sie mögliche Auswirkungen Ihrer Ergebnisse für das menschliche Ohr.*

## 2.2 Grundbegriffe der Akustik

### Frequenzbereiche des Schalls

Der eigentliche Frequenzbereich der Akustik ist der Bereich, für den das menschliche Ohr als Empfänger empfindlich ist. Dieser **Hörbereich** liegt zwischen 16 Hz als unterer Hörgrenze und 20000 Hz als oberer Hörgrenze. Unterhalb von 16 Hz schließt sich der Bereich des Infraschalls an, oberhalb von 20000 Hz liegt der Bereich des Ultraschalls. Oberhalb von etwa  $10^9$  Hz beginnt der Hyperschall.

### Töne, Klänge und Geräusche

Ein reiner Ton wird hervorgerufen durch eine Sinusschwingung im Hörbereich, gekennzeichnet durch eine bestimmte Frequenz  $f$  und eine Amplitude  $A$ .

Ist ein Grundton mit der Frequenz  $f_1$  vorgegeben, dann bezeichnet man Töne mit den Frequenzen  $f_n = n f_1$  als Obertöne zu dem Grundton. Ihnen seien die Amplituden  $A_n (n = 1, 2, 3, \dots)$  zugeordnet. Überlagern sich Grund- und Obertöne mit den Frequenzen  $f_n$ , dann entsteht ein Klang. Die Klangfarbe, z.B. eines Musikinstrumentes, wird durch das Amplitudenverhältnis der Teiltöne bestimmt ( $A_1 : A_2 : A_3 \dots$ ). Die Tonhöhe richtet sich nach der Frequenz des Grundtons. Der Klangeindruck ist dabei unabhängig von der Phasenlage der Teiltöne. Zur Kennzeichnung eines Klangs genügt daher die Angabe des Spektrums, d.h. die Auftragung der Amplituden der Teiltöne als Funktion der Frequenz.

Man kann zeigen, dass man jedes akustische Signal in eine Summe von Tönen und Obertönen zerlegen kann. Den zugehörigen mathematischen Formalismus nennt man Fouriertransformation. Somit genügt zur Kennzeichnung eines akustischen Signals die Angabe des Spektrums, d.h. der Amplituden der Teiltöne als Funktion der Frequenz.

Tabelle 1: Tonumfang verschiedener Schallquellen

	Frequenzbereich der Grundtöne / Hz
Sprache Mann	100 - 300
Sprache Frau	200 - 600
Klavier	30 - 3400
Violine	200 - 3800
Orgel	16 - 4100

Das Spektrum eines reinen Tons zeigt nur einen einzigen Peak bei einer Frequenz. Für einen Klang weist das Spektrum wenige Peaks bei Frequenzen auf, die Vielfache der Frequenz des Grundtons sind. Überlagern sich sehr viele Teiltöne mit dicht beieinander liegenden, statistisch verteilten Frequenzen (d.h. das Spektrum zeigt sehr viele, in der Regel nahe beieinander liegende Peaks), dann entsteht ein Geräusch oder Rauschen.

Physikalisch betrachtet handelt es sich bei dem „Ton“ eines Musikinstrumentes in der Regel um einen Klang, während die „Herztöne“, die Ärzte bei Patienten mit einem Stethoskop abhören, korrekt Herzgeräusche heißen müssten.

Auf den Spektren basiert die besondere Bezeichnung verschiedener Schallsignale. So spricht man von einem Klang- oder Tongemisch, wenn sich mehrere Töne oder Klänge überlagern. Ein wohlklingender Zusammenhang von zwei Tönen, eine sog. Konsonanz, entsteht dabei bei kleinen Frequenzverhältnissen  $f_1 : f_2 = m : n$  mit  $m$  und  $n$  kleiner als 8. (z.B. Oktave für  $m : n = 2 : 1$ , Quint für 3:2). Anderenfalls entsteht eine Dissonanz.

Der Tonumfang verschiedener Schallquellen unterscheidet sich, was durch Tabelle 1 illustriert wird.

## Schallfeldgrößen

Für die Wahrnehmung eines akustischen Signals ist nicht nur die Tonhöhe, sondern auch die Lautstärke entscheidend. Die Lautstärke eines Schallsignals ist mit dessen Amplitude verbunden. Ein weiteres Maß für die Lautstärke ist die Schallintensität  $I$ . Das ist die Schallenergie, die pro Zeit- und Flächeneinheit durch eine senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehende Fläche hindurchtritt. Die Intensität ist proportional zum Quadrat der Amplitude, also  $I \propto A^2$ .

Da das menschliche Hörorgan sehr große Lautstärkeunterschiede wahrnehmen kann (die wahrnehmbaren Intensitäten überstreichen 13 Zehnerpotenzen), ist es zweckmäßig, eine logarithmische Skala zu verwenden, ein sog. Pegelmaß. Das Pegelmaß  $L_I$  ist eigentlich eine dimensionslose Größe, man hat ihm aber die Einheit 1 Bel zugewiesen. Gebräuchlicher ist jedoch das Dezibel = 1 dB, das sich analog z.B. zum Verhältnis von Dezimeter und Meter als ein Zehntel eines Bels ergibt (1 m = 10 dm, 1 Bel = 10 Dezibel = 10 dB).

$$\text{Schallpegel } L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ dB.}$$

Hierbei sind  $I$  die zu messende Intensität und  $I_0$  eine Bezugsintensität. Beim Hörschall ist die Bezugsschallintensität  $I_0$  festgelegt auf den Wert  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Das entspricht etwa der Schallintensität an der Hörschwelle für die Frequenz  $f = 1000 \text{ Hz}$ . Auf diese Weise können beliebige Schallintensitäten als Schallpegel in der Einheit dB angegeben werden.

Der Schallpegel kann auch aus dem Verhältnis der Amplituden des zu messenden Schalls und des Bezugsschallsignals bestimmt werden. Da die Intensitäten proportional zum Amplitudenquadrat  $A^2$  sind, ergibt sich der Schallpegel dann als

$$L_I = 10 \log \frac{A^2}{A_0^2} \text{ dB} = 10 \log \left( \frac{A}{A_0} \right)^2 \text{ dB} = 10 \cdot 2 \cdot \log \frac{A}{A_0} \text{ dB} = 20 \log \frac{A}{A_0} \text{ dB.}$$

Am Versuchsnachmittag werden Sie sich in Rechenübungen mit dem Pegelmaß vertraut machen.

### **Subjektive Bewertung von Schallintensitäten**

Die Schallintensität bezieht sich nur auf die physikalischen Eigenschaften von Schallwellen und macht keinerlei Aussage über die Lautstärke (subjektive Größe: Wie laut bzw. leise empfindet man das Geräusch?) eines Schallereignisses. Die Lautstärke ist eine physiologische Größe und als solche von der Anatomie und Funktion des Ohres abhängig. Zwei verschiedene Töne gleicher Intensität, also gleicher Schallenergiestromdichte, aber verschiedener Frequenz, empfindet das Ohr nicht als gleich laut. Sehr hohe und sehr tiefe Töne erscheinen vielmehr beim gleichen Schallpegel dem Ohr viel leiser als Töne aus dem mittleren Bereich von 500 Hz bis 5000 Hz. Auch die Hörschwelle des menschlichen Ohres hängt folglich von der Frequenz des Tones ab. Dies werden Sie im Versuch an Ihrem eigenen Gehör untersuchen. Die frequenzabhängige Hörschwelle grenzt die sogenannte Hörfläche in Abbildung 1 zu kleinen Schallpegeln hin ab. Zu hohen Schallpegeln wird die Hörfläche durch die Schmerzgrenze begrenzt.

Zur Beschreibung der subjektiv empfundenen Lautstärke von Tönen oder Geräuschen hat man ebenfalls ein logarithmisches Pegelmaß eingeführt. Diese Lautstärkeskala hat die Einheit 1 Phon und wurde so definiert, dass bei einer Frequenz  $f = 1000 \text{ Hz}$  der Lautstärkepegel in Phon gleich dem Schallpegel in dB ist. Der gleiche Lautstärkepegel (in Phon) bei anderen Frequenzen ist dadurch festgelegt, dass der entsprechende Ton die gleiche subjektive Lautstärkeempfindung hervorruft wie ein Ton bei 1000 Hz. Somit besitzt ein Ton beliebiger Frequenz von  $x$  Phon dieselbe Lautstärke wie ein Ton von 1000 Hz von  $x$  Dezibel. Die Phonskala liefert also ein Maß für die Lautstärke von Tönen beliebiger Frequenzen oder auch von Geräuschen.

Die Schallintensität muss einen Mindestwert überschreiten, bevor man einen Ton gerade hört. Die Lautstärke beträgt dann definitionsgemäß gerade 0 Phon. Für verschiedene Frequenzen ist der Schallpegel an der Hörschwelle jedoch unterschiedlich. Erreicht die Lautstärke etwa 130 Phon, so tritt eine Schmerzempfindung ein.



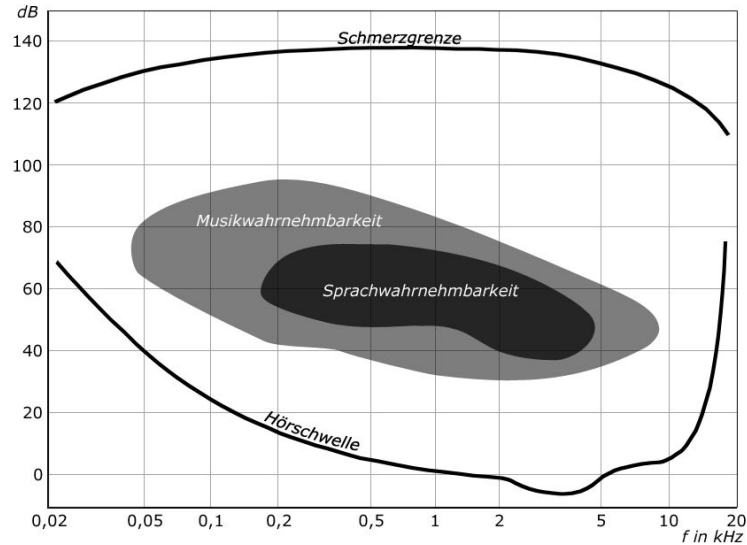


Abbildung 1: Hörfläche des Menschen

### 3 Versuchsdurchführung

#### 3.1 Wellen und Schall

Zunächst sollen Sie sich mit den grundlegenden Eigenschaften von Wellen vertraut machen. Dazu wird das Programm *Wellenmaschine* verwendet. Dieses Programm ist eine virtuelle Wellenmaschine und kann zur Visualisierung von verschiedenen Effekten der Wellenausbreitung dienen. Ändern Sie daher zunächst keine Einstellungen im unteren Teil des Programmfensters, da Sie sonst die geplanten Effekte möglicherweise nicht beobachten können und zu falschen Schlussfolgerungen gelangen. Die drei für diesen Versuch wichtigsten Funktionen sind:

- Anregung einer Welle: Wenn Sie im Feld „Anregung am linken Ende“ einmal auf den Knopf „Harmonisch On/Off“ klicken, startet die gleichmäßige Anregung einer Welle. Nochmaliges Klicken auf den Knopf beendet die Anregung.
- „Einfrieren“ der Welle: der Halt-Knopf friert die Simulation zum Zeitpunkt des Klickens ein, ein weiteres Betätigen lässt sie weiterlaufen.
- Löschen der Anregung: Der Löschen-Knopf setzt alle aktuellen Auslenkungen und Anregungen auf Null zurück, bringt also die virtuelle Kette in die Ausgangsposition zurück.

Um zu verfolgen, wie sich eine Welle ausbreitet, starten Sie die Anregung und beenden Sie sie nach kurzer Zeit (ca. eine Sekunde) wieder.

Was wird von einer Welle transportiert, bewegt sich also in Ausbreitungsrichtung? Möglicherweise müssen Sie zur Beantwortung dieser Frage die Geschwindigkeit der Simulation verringern. Dies ist mit dem Schieberegler „Zeitablauf“ möglich.

Um die charakteristischen Eigenschaften einer gleichmäßig angeregten Welle zu veranschaulichen, starten Sie nun die Anregung ohne sie zu stoppen. Wenn, wie hier, keine weiteren Effekte (wie Reflexion oder Brechung) auftreten, bildet sich eine kontinuierlich angeregte Welle aus. Welche drei charakteristischen Größen besitzt eine Welle und was sagen diese aus? Suchen Sie dazu nach konstanten Größen, die sich während der Ausbreitung nicht ändern.

Betrachten Sie die Welle jetzt zu einem festen Zeitpunkt. Mit welcher mathematischen Funktion kann man eine Welle beschreiben?

Im Versuch beschäftigen Sie sich mit Schallwellen. Bei Schallwellen handelt es sich im Gegensatz zu den bisher betrachteten Wellen nicht um transversale, sondern um longitudinale Wellen. Der Unterschied zwischen diesen beiden Wellentypen kann mit dem Programm *L-T-Wellen* veranschaulicht werden. Mit dem On/Off-Button im Feld „Automatische Anregung“ kann die Anregung der Welle gestartet werden. Aktivieren Sie im Feld „Einzelschaltungen“ die Längswelle und starten Sie die Anregung. Vermutlich werden Sie die Geschwindigkeit mittels des entsprechenden Schiebereglers verlangsamen müssen. Jetzt sehen Sie oben die Ausbreitung einer Longitudinalwelle (wie Schall in Luft) im Vergleich zur Ausbreitung einer Transversalwelle gleicher Amplitude, Frequenz und Wellenlänge. Was ist der Unterschied zwischen Transversal- und Longitudinalwellen?

Schallwellen können sichtbar gemacht werden, indem die mechanischen Schwingungen in elektrische Signale umgewandelt werden. Hierzu kann z.B. das Ausgangssignal eines Mikrofons mit Hilfe eines Oszilloskops dargestellt werden. Alternativ kann die Soundkarte eines Rechners verwendet werden, mit der Tonsignale aufgezeichnet und wiedergegeben werden können. Darüber hinaus erlauben Soundkarten auch die Synthese sowie Mischung und Bearbeitung von Tonsignalen.

Ihnen stehen verschiedene Stimmgabeln sowie ein Rechner mit Soundkarte und dem Programm Audacity zur Verfügung. Ihr Versuchsleiter wird Sie in die Bedienung des Programmes einweisen.

Erzeugen Sie mit Hilfe einer Stimmgabel einen Ton und stellen Sie die zugehörige Schwingung auf dem Rechner dar. Wählen Sie hierfür eine Skalierung der x- und y-Achse, die eine Ermittlung der Frequenz der Schwingung erlaubt. Beschreiben Sie Ihre Beobachtung nachfolgend und skizzieren Sie den beobachteten Kurvenverlauf im untenstehenden Raster.

Bestimmen Sie die Frequenz der Schallwelle. Notieren Sie Ihr Ergebnis für  $f_{\text{gemessen}}$ :

	$f_{\text{gemessen}}/$	$f_{\text{nominell}}/$
Ton 1		

Diskutieren Sie, wie Sie die Frequenz und die Amplitude der mit der Stimmgabel erzeugten Schallwelle variieren können und beschreiben Sie Ihre Vermutungen:


Erzeugen Sie nunmehr zwei Töne einer anderen Frequenz und bestimmen Sie wiederum die jeweiligen Frequenzen. Tragen Sie die Ergebnisse in die nachfolgende Tabelle ein:

	$f_{\text{gemessen}}/$	$f_{\text{nominell}}/$
Ton 2		
Ton 3		

Auf den Stimmgabeln sind die nominellen Frequenzen der Grundtöne eingraviert. Tragen Sie sie in die dritten Spalten der beiden obigen Tabellen ein. Vergleichen Sie die Nominalfrequenzen mit den von Ihnen ermittelten Messwerten.

Welchen Zusammenhang können Sie zwischen der Frequenz eines Schallsignals und der Tonhöhe erkennen?

Außer durch die Frequenzen waren Ihre Schallsignale auch durch eine Amplitude gekennzeichnet. Die Amplitude eines Schallsignals sollen Sie im Folgenden an einem einfachen Beispiel verändern: Nehmen Sie das Schallsignal eines gesprochenen Wortes (z.B. Ihres Namens) auf, wobei Sie das Wort einmal in normaler Lautstärke sprechen, einmal rufen und einmal flüstern. Achten Sie darauf, dass der Abstand zum Mikrofon immer annähernd gleich ist. Vermerken Sie jeweils die maximale Amplitude des Schallsignals in der untenstehenden Tabelle:

sprechen	rufen	flüstern

Welchen Zusammenhang zwischen der Amplitude eines Schallsignals und der Lautstärke können Sie aus Ihren Messungen ableiten?

### 3.2 Schallpegel

In der Versuchsvorbereitung sind die Schallintensität sowie die Beschreibung durch Schallpegelmaße eingeführt worden. Um mit dem Pegelmaß vertraut zu werden, beantworten Sie bitte die folgenden Fragen. Hierzu ist das Rechnen mit Logarithmen erforderlich. Bitte wenden Sie sich an Ihren Betreuern, wenn Ihnen die entsprechenden Rechenregeln nicht präsent sind.

1. Eine Schallschutzwand vermindert den Schallpegel um 10 dB. Um welchen Prozentsatz ist die Schallintensität hinter der Wand verglichen mit dem Ausgangswert abgesunken?

---

2. Zwei identische Schallquellen erzeugen einen Schallpegel von 95 dB. Wie ändert sich der Schallpegel, wenn eine Schallquelle entfernt wird?

---

Um welche Pegel unterscheiden sich die Schallsignale, die Sie vorher durch Sprechen, Rufen und Flüstern eines Wortes erzeugt haben?

Sprechen/Rufen: \_\_\_\_\_ Sprechen/Flüstern: \_\_\_\_\_ Rufen/Flüstern: \_\_\_\_\_

Die Verwendung des Pegelmaßes stellt nicht nur handlichere Größen bei der Beschreibung der Schallintensität zur Verfügung, sondern vereinfacht auch die Bestimmung des Gesamteffektes von Verstärkern oder Abschwächern der Schallintensität. Bei der Hintereinanderschaltung von Verstärkern oder Abschwächern multiplizieren sich gewöhnlich die Verstärkungs- bzw. Schwächungsfaktoren  $I/I_0$ . Da wiederum  $\log(a \cdot b) = \log a + \log b$  gilt, addieren sich einfach die Pegelmaße der hintereinandergeschalteten Komponenten.

Zur Bestimmung des Schallpegels eines Schallsignals verwendet man Schallpegelmessgeräte. Im Versuchsraum gibt es ein solches Gerät, mit dem Sie exemplarisch die Pegel verschiedener Schallsignale Ihrer Wahl messen können. Achten Sie dabei darauf, dass der Abstand zwischen Schallquelle und Messgerät immer annähernd gleich ist. (Warum?) Nachfolgend finden Sie einige Vorschläge für Ihre Messungen:

- Knall eines Lineals auf dem Tisch, Händeklatschen, Rascheln von Papier, Schreien, Flüstern, Hupe, Ratsche ...

Tragen Sie die Schallpegel von sechs von Ihnen erzeugten bzw. ausgewählten Schallsignalen in die Tabelle und in die vorbereitete Skala auf der nächsten Seite ein. Vermerken und markieren Sie auch den Schallpegel der Hintergrundgeräusche im Versuchsraum.

Schallpegelmessung	
Geräusch	Schallpegel/dB(A)
Hintergrund	

Im Versuch hatten Sie die Schallpegel ausgewählter Geräusche bestimmt und in Abbildung 2 grafisch aufgetragen. In Abbildung 3 finden Sie eine ähnliche Abbildung mit den Schallpegeln von Geräuschen, die Ihnen während des Versuches nicht zugänglich waren. Zusätzlich eingetragen sind einige für das menschliche Gehör wichtige Marken auf der Schallpegelskala.

### 3.3 Physiologische Akustik

Der Schallpegel, der auf der Grundlage der Schallintensität bestimmt wird, bezieht sich nur auf die physikalischen Eigenschaften der Schallwellen und macht keinerlei Aussage über die Lautstärke eines Schallereignisses. Die Lautstärke ist eine physiologische Größe und als solche von der Anatomie und Funktion des Ohres abhängig. Zwei verschiedene Töne gleicher Intensität, also gleicher Schallenergiestromdichte, aber verschiedener Frequenz, empfindet das Ohr nicht als gleich laut. Sehr hohe und sehr tiefe Töne erscheinen vielmehr beim gleichen Schallpegel dem Ohr viel leiser als Töne aus dem mittleren Bereich von 500 Hz bis 5000 Hz. Auch die Hörschwelle des menschlichen Ohres hängt folglich von der Frequenz des Tones ab. Diese Abhängigkeit können Sie für Ihr eigenes Gehör anhand des Programmes „Hörschwelle“ aus dem Programmpaket *ars auditus* der Bergischen Universität GH Wuppertal bestimmen.

Rufen Sie hierzu das Programm „Hörschwelle“ auf. Verwenden Sie die bereitliegenden Kopfhörer, um akustische Einflüsse aus der Umgebung zu minimieren. Lassen Sie sich von Ihrem Betreuer erklären, wie die Lautstärke zu Beginn justiert werden muss. Notieren Sie sich in der folgenden Tabelle die Frequenzen und den zugehörigen minimalen Schallpegel, den Sie gerade noch hören können.

# Schallpegel in dB(A)

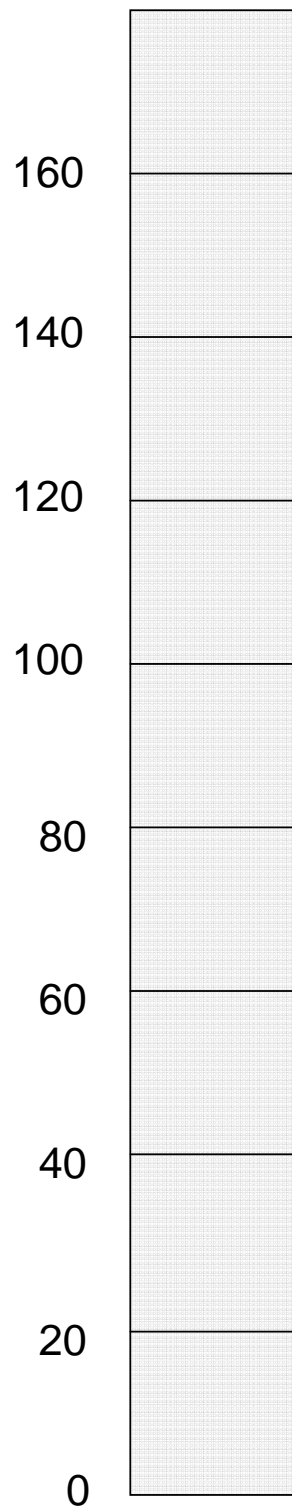


Abbildung 2: Schallpegelmessungen

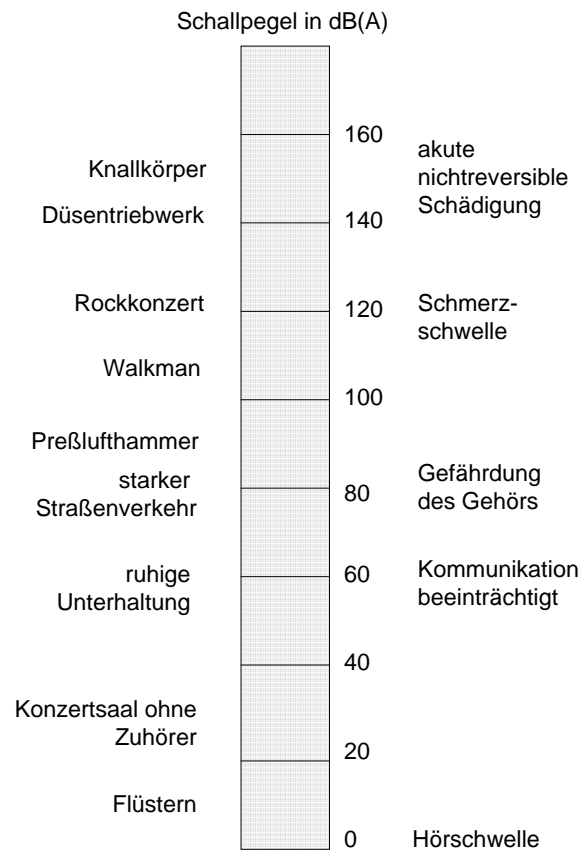


Abbildung 3: Schallpegel verschiedener Geräusche. Eingetragen sind auch wichtige Marken für die Signalverarbeitung durch das menschliche Gehör.

Bestimmung der Hörschwelle						
Frequenz/ Hz	125	250	500	750	1000	1500
Schallpegel/dB						
Frequenz/ Hz	2000	3000	4000	6000	8000	
Schallpegel/dB						

### 3.4 Töne, Klänge, Geräusche

Sie haben bisher im Versuch sowohl reine Töne als auch Geräusche untersucht. Im Folgenden sollen Sie den wesentlichen Unterschied zwischen Tönen, Klängen und Geräuschen sichtbar machen, indem Sie die spektrale Zerlegung eines akustischen Signals für einige Beispiele selbst praktizieren. Hierzu verwenden Sie wieder das Programm Audacity. Der Betreuer wird Sie in die zusätzlich notwendigen Programmpunkte einführen.

Erzeugen Sie mit Hilfe des Programmes je einen Ton, einen Klang und weißes Rauschen am Computer und führen Sie eine Frequenzanalyse<sup>1</sup> dieser verschiedenen akustischen Signale durch. Skizzieren Sie in der untenstehenden Tabelle die Schwingungsbilder und Frequenzspektren. Ergänzen Sie Ihre Messungen und die Skizzen in der Tabelle mit den Ergebnissen für ein gesprochenes Wort. Bei Interesse und Restzeit der Versuchsdurchführung können Sie auch gern weitere akustische Signale Ihrer Wahl analysieren.

### 3.5 Physik des Ohres

Sie werden im abschließenden Teil des Versuchsnachmittages ausgewählte physikalische Grundlagen der Funktion des Ohres gemeinsam mit Ihrem Versuchsbetreuer erarbeiten. Hier ist Platz für Ihre Notizen:

---



---



---



---



---



---



---



---



---



---

<sup>1</sup>Beim Menüpunkt Frequenzanalyse wird die Auswahl der Blackman-Harris-Funktion (Auswahlmenu Funktion) empfohlen.



Frequenzanalyse		
Signal	Schwingungsbild	Frequenzspektrum
Ton		
Klang		
Rauschen		
Wort		

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Im Folgenden werden ausgewählte physikalische Grundlagen des Ohres vorgestellt.

**Außenohr** Die Funktion des Außenohrs besteht u.a. in einer Bündelung des Schalls. Die Trichterwirkung kommt allerdings nur bei hohen Frequenzen zur Geltung, bei denen die Wellenlänge der Schallwelle in der Größenordnung der räumlichen Abmessungen der Ohrmuschel liegt (Vergleichen Sie Ihre Lösung der Aufgabe V1.). Zusätzlich sorgt das Außenohr bei hohen Frequenzen für eine richtungsabhängige Verformung (Filterung) des auf das Ohr einfallenden akustischen Signals. Dies führt zu einer von der Einfallsrichtung abhängigen Klangfärbung, die zur Ortung des akustischen Signals benutzt wird. Eine richtungsabhängige Klangverfärbung tritt auch bei tiefen Frequenzen auf. Allerdings ist hierbei (passend zu den Wellenlängen bei tiefen Frequenzen des Schalls, siehe Aufgabe V1) die Form des Oberkörpers und des Kopfes entscheidend für die Klangverfärbung.

Zusätzlich zur richtungsabhängigen Klangverfärbung werden zur Ortung eines akustischen Signals die Unterschiede ausgewertet, mit denen das akustische Signal in beiden Ohren registriert wird. Dies sind einerseits Unterschiede im Schallpegel und andererseits in der Laufzeit des Signals von der Schallquelle zu beiden Ohren. Diese Effekte bieten eine höhere Genauigkeit bei der Ortung eines Signals, lassen allerdings keine Entscheidung zu, ob ein Signal von vorne oder hinten kommt.

**Mittelohr** Die entscheidende Funktion des Mittelohres ist die so genannte Impedanzanpassung für die Schallausbreitung im Außenmedium Luft einerseits und dem flüssigkeitsgefüllten Innenohr andererseits. In Luft bewirken kleine Auslenkungskräfte eine hohe Auslenkung der Luftteilchen durch eine eintreffende Schallwelle. In einer Flüssigkeit sind die Schallkennimpedanzen sehr viel größer (Sie haben vermutlich die Schallkennimpedanzen für Luft und Wasser bei der Lösung der Aufgabe V3 als Zwischenschritt berechnet. Vergleichen Sie beide Werte!). Folglich muss zur Erreichung derselben Auslenkung eines Teilchens in einer Flüssigkeit eine sehr viel höhere Kraft aufgebracht werden. Ohne einen geeigneten Mechanismus zur Verstärkung der Kraft, resp. des Drucks beim Übergang von Luft zur Flüssigkeit des Innenohrs würde das Gros der eintreffenden Schallwellen am Übergang Luft/Wasser reflektiert (siehe Ihre Lösung der Aufgabe V3).

Der notwendige Verstärkungseffekt setzt sich zusammen aus:

- dem Effekt eines großen Flächenverhältnisses zwischen Trommelfell und ovalem Fenster, die wie beim hydraulischen Prinzip für eine ca. 20fache Verstärkung des Drucks sorgt,
- dem Effekt einer Hebelwirkung zwischen dem langen Hammergriff und dem kurzen Amboßfortsatz, der zu einer ca. 1,2fachen Verstärkung des Drucks sorgt, und
- dem Effekt einer geeigneten Geometrie der Trommelfellmembran (Krümmung).

Insgesamt wird dadurch eine ca. 50fache Verstärkung des am Trommelfell ankommenden Schalldruckes beim Übergang ins Innenohr erreicht (Verstärkungsfaktoren der einzelnen Elemente multiplizieren sich). Die physikalisch vorhergesagte Reflexion eines Großteils der einkommenden Schallwelle am Übergang Luft/Flüssigkeit wird dadurch drastisch abgeschwächt. Die resultierende Übertragungsfunktion des Mittelohrs entspricht dem Verhalten, dass für einen Übergang zwischen zwei Medien mit sehr viel geringeren Unterschieden der Schallkennimpedanzen zu erwarten gewesen wäre, weshalb man von einer Impedanzanpassung durch das Mittelohr spricht.

Die Mittelohrmechanik kann in ihrer Funktionalität entscheidend durch den Musculus stapedius verändert werden. Dieser Muskel tritt bei hohen Schalldrucken zum Schutz des Innenohres in Aktion und wirkt dann als zusätzliches Dämpfungsglied in der Übertragungskette.

**Innenohr** Für das Verständnis der Funktion des Innenohrs ist die Zerlegbarkeit eines akustischen Signals in einzelne Frequenzen unabdingbar.

Das Innenohr besteht aus einem schneckenförmig aufgerollten Schlauch, der sich aus drei Hohlräumen zusammensetzt. Das ovale Fenster grenzt an die Scala vestibuli. Sie ist am oberen Ende der Schnecke, dem Helicotrema, mit der Scala tympani verbunden. Dazwischen befindet sich die Scala media. Zwischen ihr und der Scala vestibuli befindet sich die Basilarmembran. Die Basilarmembran wird vom ovalen Fenster bis zum Helicotrema stetig breiter und damit pro Membranabschnitt auch schwerer. Gleichzeitig ändern sich ihre elastischen Eigenschaften: ihre Steifigkeit nimmt zum Helicotrema hin ab. Daraus resultiert eine ortsabhängige Eigenfrequenz der Basilarmembran.

Ein Schallsignal am ovalen Fenster führt zu einer Druckdifferenz zwischen der Scala vestibuli und der Scala tympani. Diese Druckdifferenz tritt quer zur Basilarmembran auf und führt deshalb zu einer Auslenkung der Basilarmembran, die sich als Wanderwelle auf der Basilarmembran ausbreitet. Die Wanderwelle führt zu einer ortsabhängigen Auslenkung der Basilarmembran. An einer Stelle der Membran bildet sich dabei ein deutliches Maximum der Auslenkung aus. An welcher Stelle das Maximum der Auslenkung auftritt, ist aufgrund der ortsabhängigen Eigenfrequenz der Basilarmembran durch die Frequenz des einkommenden Schallsignals bestimmt. An dem Punkt der maximalen Auslenkung beendet die Welle ihre Wanderung und wird dann stark gedämpft. Man spricht von einer Orts-Frequenz-Transformation, die das Schallsignal grob in seine Frequenzen zerlegt. Dadurch wird der cochleäre Verstärker (Cochlear-Amplifier) in den äußeren Haarzellen aktiviert, der den Zerlegungsprozess der Frequenzen soweit verstärkt, dass einzelne Frequenzen vom Ohr unterschieden werden können. Dieser Mechanismus ist eine wichtige Grundlage, menschliche Sprache verstehen zu können.

## 4 Auswertung

**Bitte geben Sie am nächsten Termin einen Bericht ab, der auch die folgenden Unterlagen enthält:** Bitte üben Sie in der Nachbereitung des Versuches nochmals das Rechnen

mit dem Schallpegelmaß an zwei Beispielen:

1. Eine Schallquelle erzeuge einen Schallpegel von 27 dB. Wie ändert sich der Schallpegel, wenn zwei identische Schallquellen hinzugefügt werden?
2. In der Versuchsvorbereitung hatten Sie den Reflexionsgrad einer Schallwelle beim Übergang von Luft zu Wasser berechnet (Aufgabe V3). Geben Sie die Abschwächung der Schallintensität an diesem Übergang in dB an.

Zudem sollen Sie in der Versuchsauswertung Ihre im Versuch bestimmte frequenzabhängige Hörschwelle in die Darstellung der Hörfläche im Anhang der Anleitung eintragen.

- Lösungen der Aufgaben der Versuchsvorbereitung V1 bis V3
- Lösungen der Aufgaben 1 und 2 aus dem Abschnitt Auswertung
- grafische Darstellung der Hörfläche mit Ihren Messdaten der Hörschwelle

Die bestimmten Größen sind immer in der Form *Bestwert*  $\pm$  *Messunsicherheit* anzugeben, siehe auch den Abschnitt *Korrekte Angabe des Resultats* zum Versuch MEDA.

**Bitte vermerken Sie auf Ihrem Bericht den Namen Ihres Betreuers, Ihre Gruppe, Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer. Heften Sie bitte alle Blätter zusammen.**

