

Neben dem Auge ist das Ohr das zweite zentrale Sinnesorgan des Menschen. Um die Funktionsweise zu verstehen, müssen wir zunächst einige Grundlagen des Schalls und der Akustik betrachten.

Bei Wasserwellen oder elektromagnetischen Wellen ist die Schwingungsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Diese Wellen nennt man Transversalwellen (= Querwellen).

In Luft beträgt die Schallgeschwindigkeit etwa $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Schallwellen lassen sich wie alle anderen Wellen auch mithilfe von Diagrammen beschreiben.

p_N ist der atmosphärische Normaldruck. Dieser beträgt 1013 hPa und variiert je nach Wetterlage. Im Vergleich dazu ist der Schalldruck p extrem klein. Für einen Fernseher in Zimmerlautstärke beträgt dieser nur etwa 0,03 Pa.

Diese Luftdruckschwankung lässt sich auch mit einer Sinusfunktion beschreiben. Es gilt:
 $p_{\text{ges}}(t) = p_N + p \cdot \sin(\omega t)$
 mit $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$.
 In der Biophysik müssen wir damit aber nicht rechnen.

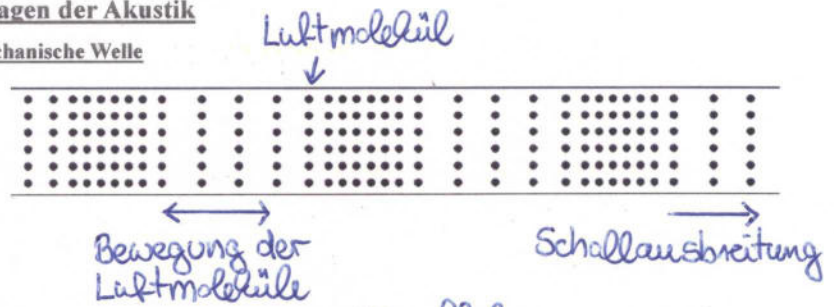
2. Das Ohr

2.1 Grundlagen der Akustik

Schall als mechanische Welle



[Stimmgabel aus leifiphysik.de]



- Die Schwingungsrichtung der Luftmoleküle ist parallel zur Ausbreitungsrichtung der Welle $\Rightarrow$ Schallwellen sind sogenannte Longitudinalwellen (= Längswellen).
- Schallwellen können sich nur in einem Medium (Gas, Flüssigkeit, Festkörper) ausbreiten, nicht aber im Vakuum.
- Da jedes Teilchen nur um seine Ruhelage schwingt, wird zwar Energie, aber keine Materie transportiert.
- Auch für Schallwellen gelten die aus der 11. Jgst. bekannten Formeln für Wellen:

$$c = \lambda \cdot f$$

c : Ausbreitungsgeschwindigkeit
 λ : Wellenlänge

$$f = \frac{1}{T}$$

f : Frequenz
 T : Schwingungsdauer

2.1 Grundlagen der Akustik

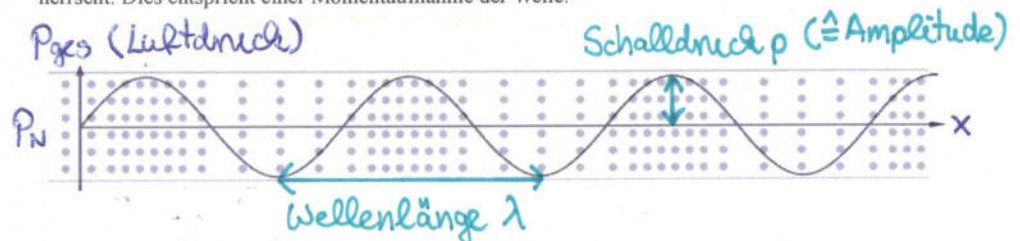
1

Schallwellen in Diagrammen

Die periodischen Luftdruckschwankungen von Schallwellen lassen sich in Diagrammen darstellen.

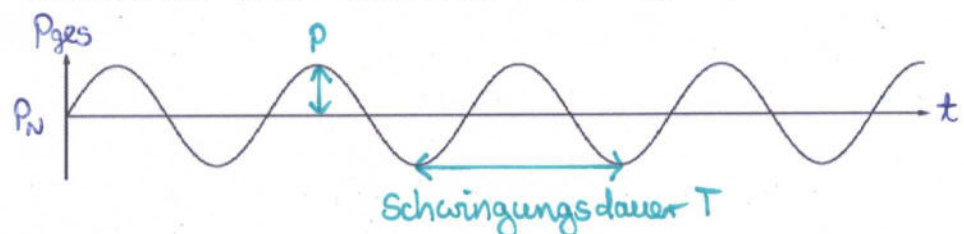
x- p_{ges} -Diagramm:

Für einen bestimmten Zeitpunkt wird dargestellt, an welcher Position x welcher Luftdruck p_{ges} herrscht. Dies entspricht einer Momentaufnahme der Welle.



t- p_{ges} -Diagramm:

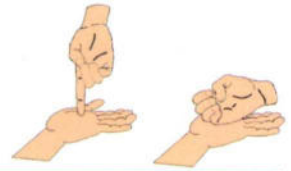
Für eine bestimmte Stelle x wird dargestellt, wie sich der Luftdruck p_{ges} im Lauf der Zeit t verändert.



Drücke mit der einen Hand auf die andere, mal mit einem Finger, mal mit der ganzen Hand. Variiere dabei die Kraft.
Beschreibe den Zusammenhang zwischen dem wahrgenommenen Druck und der Kraft bzw. der Fläche.

Druck als physikalische Größe

- größere Kraft $\rightarrow$ größerer Druck
- größere Fläche (Faust) $\rightarrow$ kleinerer Druck



$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} ; p = \frac{F}{A} ; [p] = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \text{ Pa} = 1 \text{ Pascal}$$

$$1000 \text{ hPa} = 100 \text{ kPa}$$

Hören von Mensch und Tier

- Der Schalldruck p (Amplitude) bestimmt die Lautstärke
- Die Frequenz f bestimmt die Tonhöhe
doppelte Frequenz $\leftrightarrow$ eine Oktave höher



Mit zunehmendem Alter sinkt die Obergrenze des Hörbereichs immer weiter ab.
(ca. 1 kHz in 10 Jahren)

Viele Tiere können im Gegensatz zu uns Menschen auch Ultraschall wahrnehmen.

- Hörbereich verschiedener Tiere:

- Hund: 15 Hz bis 50 kHz
- Katze: 60 Hz bis 65 kHz
- Delfin: 150 Hz bis 150 kHz
- Fledermaus: 1 kHz bis 200 kHz

Bestimme den Wellenlängenbereich von Schallwellen, die ein Mensch hören kann.
($c_{\text{Luft}} = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$)

Übungsaufgabe: Wellenlängen des menschlichen Hörbereichs •

$$c = \lambda \cdot f \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{c}{f_{\text{min}}} = \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{16 \frac{1}{\text{s}}} = \underline{\underline{21,25 \text{ m}}}$$

$$\lambda_{\text{min}} = \frac{c}{f_{\text{max}}} = \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{20000 \frac{1}{\text{s}}} = 0,017 \text{ m} = \underline{\underline{1,7 \text{ cm}}}$$

1,7 cm bis 21,25 m

Übungsaufgabe: Flügelschlag von Insekten •

$$a) f = 24000 \frac{1}{\text{min}} = 400 \frac{1}{\text{s}} = \underline{\underline{400 \text{ Hz}}}$$

b) eine Oktave tiefer $\Rightarrow$ halbe Frequenz 200 Hz
 $\Rightarrow$ Biene macht in einer Sekunde halb so viele Flügelschläge wie eine Mücke.

Insekten zeichnen sich durch ein charakteristisches „Summen“ aus, welches durch den Flügelschlag erzeugt wird. Eine Mücke führt etwa 24 000 Flügelschläge pro Minute aus.

- Berechne die Frequenz, mit der eine Mücke „summt“.
- Eine Biene erzeugt ein Summen, das etwa eine Oktave tiefer ist als das Summen einer Mücke. Erkläre, was sich daraus über den Flügelschlag einer Biene aussagen lässt.

Bei Schallwellen treten dieselben Wellenphänomene auf, die bereits von Wasser- oder Lichtwellen bekannt sind.

Schallgeschwindigkeiten verschiedener Medien:

$$c_{\text{Luft}} = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$c_{\text{Helium}} = 1030 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$c_{\text{Wasser}} = 1480 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$c_{\text{Diamant}} = 18\,000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ein Sänger singt einen Ton der Frequenz $f = 440 \text{ Hz}$ und atmet dann Helium ein. Er singt den „gleichen Ton“ erneut. (Bei der Tonerzeugung durch die Stimmbänder erzeugt er aber lediglich einen Ton mit derselben Wellenlänge.)
Berechne die Frequenz des Tons in Helium.

Auch Schallwellen können interferieren. Bei zwei Lautsprechern ergibt sich exakt die gleiche Situation wie beim Doppelspaltversuch.

Zwei Lautsprecher L_1 und L_2 haben einen Abstand von $4,0 \text{ m}$ und erzeugen jeweils einen gleichphasigen sinusförmigen Ton mit der Frequenz f .

a) Erkläre, welche Art der Überlagerung in allen Punkten vorherrscht, die gleich weit von L_1 und L_2 entfernt sind.

b) Berechne die Wellenlänge für $f = 425 \text{ Hz}$.

c) Bestimme, welche Art der Überlagerung am Punkt Q bei der Frequenz $f = 425 \text{ Hz}$ vorliegt.

d) Berechne, bei welchen Frequenzen f am Punkt Q ein Interferenzmaximum vorherrscht.

2.2 Welleneigenschaften des Schalls

Reflexion und Brechung

Treffen Schallwellen auf die Grenzfläche zweier Medien, in denen sich der Schall unterschiedlich schnell ausbreitet, wird ein Teil der Welle reflektiert und der andere Teil der Welle gebrochen.

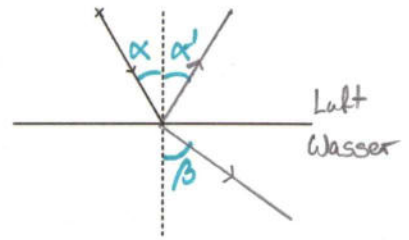
Hierbei gelten das Reflexions- und Brechungsgesetz:

Reflexionsgesetz: $\alpha = \alpha'$

Brechungsgesetz: $c_2 \cdot \sin \alpha = c_1 \cdot \sin \beta$ (Snellius)

⇒ Beim Übergang in ein Medium mit höherer Schallgeschwindigkeit wird die Schallwelle vom Lot weg gebrochen.

Beim Übergang in ein anderes Medium ändert sich nur die Wellenlänge.
Die Frequenz (und damit die Tonhöhe) bleibt gleich.



Übungsaufgabe: Sprechen mit Helium ••

$$\text{erzeugte Wellenlänge: } \lambda = \frac{c}{f} = \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{440 \frac{1}{\text{s}}} = 0,78 \text{ m}$$

$$f_{\text{Helium}} = \frac{c_{\text{Helium}}}{\lambda} = \frac{1030 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,78 \text{ m}} = 1321 \text{ Hz}$$

⇒ Ton ca. 1,5 Oktaven höher

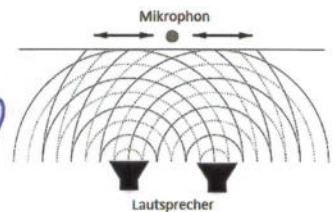
2.2 Welleneigenschaften des Schalls

1

Interferenz

Zwei Lautsprecher senden denselben Sinuston aus. Mit einem Mikrophon wird die Lautstärke gemessen.

Es gibt laute Stellen (Verstärkung) und leise Stellen (Auslöschung).



Übungsaufgabe: Interferenz zweier Lautsprecher •• [nach leifphysik.de]

$$a) \Delta s = 0 \Rightarrow \text{Verstärkung}$$

$$b) \lambda = \frac{c}{f} = \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{425 \frac{1}{\text{s}}} = 0,80 \text{ m}$$

$$c) s_2 = \sqrt{(3\text{ m})^2 + (4\text{ m})^2} = 5 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \Delta s = s_2 - s_1 = 2 \text{ m} = 2,5 \cdot \lambda$$

⇒ Auslöschung

$$d) \Delta s = 2 \text{ m} = n \cdot \lambda \Rightarrow \lambda = \frac{2 \text{ m}}{n}$$

$$\Rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\frac{2 \text{ m}}{n}} = 170 \frac{1}{\text{s}} \cdot n$$

$$\Rightarrow 170 \text{ Hz}, 340 \text{ Hz}, 510 \text{ Hz}, \dots$$

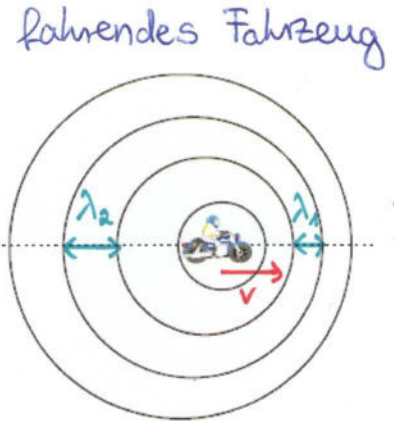
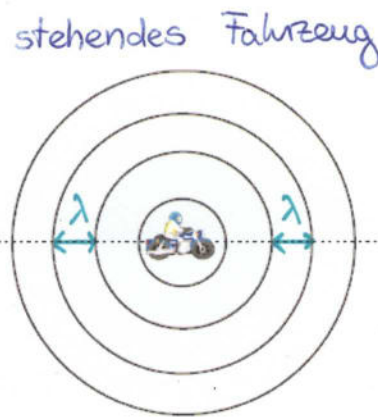
2.2 Welleneigenschaften des Schalls

2

Du kennst es aus dem Straßenverkehr: Ein Einsatzfahrzeug mit Sirene fährt an dir vorbei. Die Tonhöhe des Martinshorns klingt höher, wenn sich das Fahrzeug nähert und tiefer, wenn es sich entfernt.

Anmerkung zur Zeichnung: Die gezeichneten Kreise stellen Wellenfronten eines gleichen Schwingungszustands (z.B. „Berg“) dar.

Akustischer Dopplereffekt



Die Schallwellen breiten sich in alle Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit (Schallgeschwindigkeit) aus, starten bei einem fahrenden Sender aber ständig von einer anderen Stelle aus.

Vor dem Fahrzeug (A) werden die Wellen „zusammengeschoben“, die Wellenlänge λ_1 wird dort kleiner, die Frequenz f_1 wird größer, der Ton höher.

Hinter dem Fahrzeug (B) werden die Wellen „auseinandergezogen“, die Wellenlänge λ_2 wird dort größer, die Frequenz f_2 wird kleiner, der Ton tiefer.

2.2 Welleneigenschaften des Schalls

3

Eine spannende Geschichte war die Entdeckung des Doppler-Effekts:

Der österreichische Physiker CHRISTIAN DOPPLER (1803 – 1853) hat im Jahre 1842 den Doppler-Effekt vorhergesagt. Nur drei Jahre später wurde er vom Niederländer CHRISTOPH BUYS BALLOT (1817 – 1890) experimentell nachgewiesen. Dazu stellte er Trompeter, die ein G spielten, auf einen mit $70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ fahrenden Eisenbahnwagen. Neben der Bahnstrecke standen weitere Musiker, die die gehörte Tonhöhe bestimmen mussten. Diese war beim herannahenden Zug einen Halbton höher, beim sich entfernenden Zug tiefer.

Übungsaufgabe: Experimenteller Nachweis des Doppler-Effekts ••

Für eine bewegte Schallquelle und einen ruhenden Beobachter gilt: $f' = f \cdot \frac{c}{c \pm v}$

Dabei ist f die ausgesandte Frequenz, f' die gehörte Frequenz, c die Schallgeschwindigkeit und v die Geschwindigkeit der Schallquelle (– wenn sich die Schallquelle auf den Beobachter zubewegt, + wenn sie sich wegbewegt.)

Rechne nach, dass die Angaben zum experimentellen Nachweis des Doppler-Effekts (linke Spalte) stimmig sind.

(Da eine Oktave aus zwölf Halbtönen besteht, erhöht sich die Frequenz mit jedem Halbton um den Faktor $\sqrt[12]{2}$.)

$$v = 70 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 19 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$(A) \quad f' = f \cdot \frac{c}{c-v} = f \cdot \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{321 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = f \cdot 1,059$$

$= \sqrt[12]{2}$
↓

⇒ ein Halbton höher ✓

$$(B) \quad f' = f \cdot \frac{c}{c+v} = f \cdot \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{359 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = f \cdot 0,947 = f \cdot \sqrt[12]{\frac{1}{2}}$$

⇒ ein Halbton tiefer ✓

2.2 Welleneigenschaften des Schalls

4

In der Physik wird zwischen Tönen und Klängen unterschieden.

Ein Ton ist dabei die einfachste Schwingungsform, eine Sinuskurve. Man spricht daher auch von einem Sinuston.

Ermittle die Schwingungsdauer aus dem Diagramm und berechne damit die Frequenz des Tons. Beschreibe auch die zugehörige Frequenzanalyse.

Wird ein und derselbe „Ton“ mit verschiedenen Musikinstrumenten gespielt, dann hört sich das ganz unterschiedlich an. Woran das liegt, können wir anhand der Tonaufnahmen einer Flöte und einer Geige herausfinden.

Ermittle auch hier die Schwingungsdauer aus dem Diagramm und berechne damit die Frequenz des Tons.

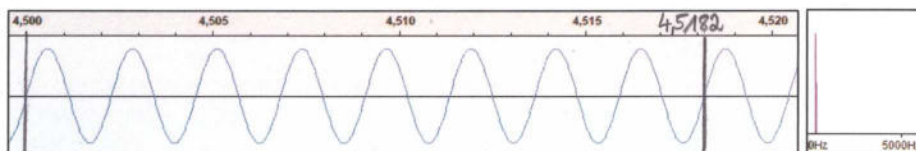
Beschreibe die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Frequenzanalysen der verschiedenen Musikinstrumente.

Beschreibe die Diagramme bei dem Geräusch, das beim Zerknüllen eines Blatt Papiers entsteht.

2.3 Töne und Klänge

Ton

Aufnahme des Tons a1 eines Sinusgenerators (Zeit in s) mit Frequenzanalyse (rechts).



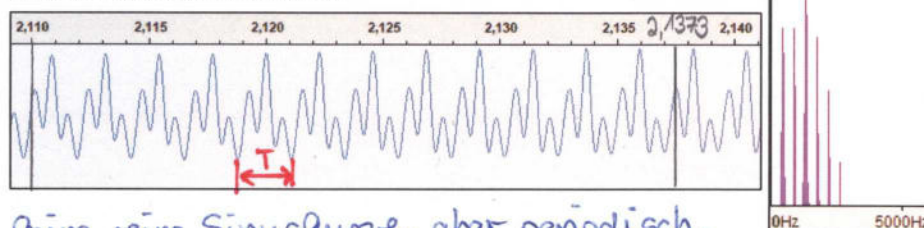
8 Schwingungen in $4,5182\text{s} - 4,5000\text{s} = 0,0182\text{s}$

$$\Rightarrow T = 0,0182\text{s} : 8 = \underline{0,002275\text{s}} \quad \Rightarrow f = \frac{1}{T} = \underline{440\text{Hz}}$$

Die Frequenzanalyse zeigt eine Frequenz.

Klang

Aufnahme des „Tons“ a1 einer Flöte.



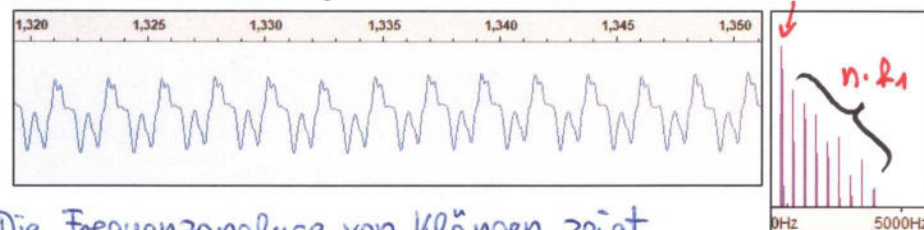
keine reine Sinuskurve, aber periodisch.

12 Schwingungen in $2,1373\text{s} - 2,1100\text{s} = 0,0273\text{s}$

$$\Rightarrow T = 0,0273\text{s} : 12 = \underline{0,002275\text{s}} \quad \Rightarrow f = \frac{1}{T} = \underline{440\text{Hz}}$$

2.3 Töne und Klänge

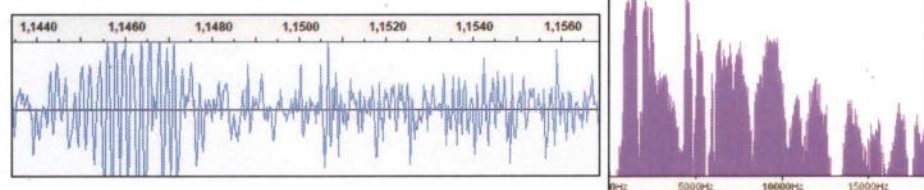
Aufnahme des „Tons“ a1 einer Geige.



Die Frequenzanalyse von Klängen zeigt mehrere Frequenzen, die Grundfrequenz (hier $f_1 = 440\text{Hz}$) und Vielfache davon ($n \cdot f_1$), aber je nach Instrument in unterschiedlicher Anzahl und Intensität.

Geräusch

Aufnahme des Zerknüllens eines Papiers.



- Wellenform nicht periodisch
- (nahezu) kontinuierliches Frequenzspektrum, keine Grundfrequenz mit Vielfachen, daher auch keine Tonhöhe.

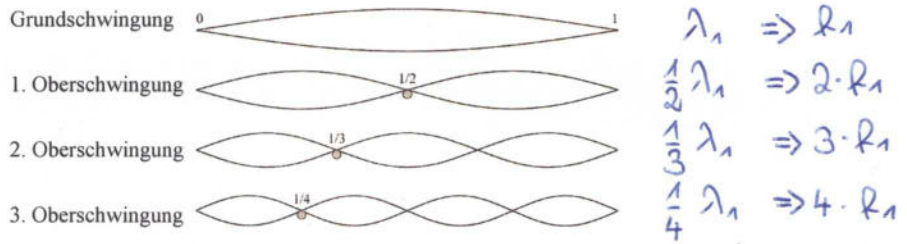
Die Entstehung von Grundschiwingung und Oberschwingungen bei Musikinstrumenten lässt sich am einfachsten an Saiteninstrumenten zeigen. Wir machen dies exemplarisch am Beispiel Geige.

Achtung:

Die Wellenlänge der Saitenschwingung ist nicht die Wellenlänge der Schallwelle! Diese sind aber proportional zueinander. Die Proportionalitätskonstante ist zum Beispiel vom Material und der Spannung der Saite abhängig.

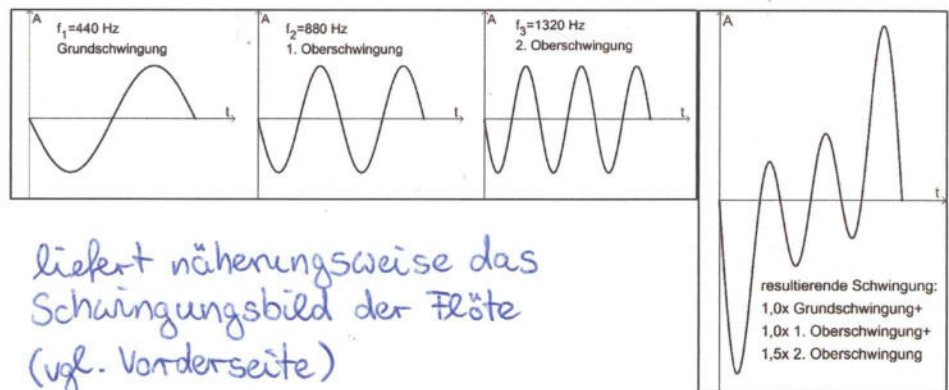
Grundschiwingung und Oberschwingungen

Saiten sind am Rand befestigt und schwingen dort nicht $\Rightarrow$ nur bestimmte Schwingungsmuster möglich.



Die Saite schwingt gleichzeitig in einer Überlagerung dieser Muster in unterschiedlicher Intensität.

Umgekehrt kann man einen einfachen Klang auch aus einer Grundschiwingung und (zwei) Oberschwingungen zusammensetzen:



liefert näherungsweise das Schwiwingungsbild der Flöte (vgl. Vorderseite)

Die Abbildung zeigt einen Klang der Frequenz 800 Hz.

a) Gib an, worin sich das Schwiwingungsbild eines Klangs von dem eines Geräusches unterscheidet.

b) Berechne die bis zum Punkt A vergangene Zeit in Millisekunden.

c) Zeichne in das Diagramm das Schwiwingungsbild eines reinen Tons mit der Frequenz 800 Hz und gleicher Lautstärke ein sowie mit 400 Hz und geringerer Lautstärke.

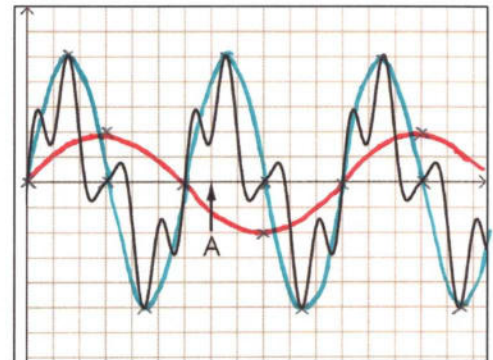
Übungsaufgabe: Ton und Klang im Diagramm •

a) Bei einem Klang ist das Schwiwingungsbild periodisch, bei einem Geräusch nicht.

$$b) T = \frac{1}{f} = \frac{1}{800 \frac{1}{s}} = 1,25 \cdot 10^{-3} s = 1,25 ms$$

$$\text{bei Punkt A: } t = \frac{7}{6} \cdot T = \underline{1,46 ms}$$

- c) **800 Hz**: Sinuskurve, gleiche Amplitude und Schwiwingungsdauer
400 Hz: kleinere Amplitude, halbe Frequenz $\Rightarrow$ doppelte Schwiwingungsdauer



Um die Schallausbreitung beschreiben zu können, gehen wir von einer idealisierten Situation aus. Betrachtet wird dazu eine punktförmige Schallquelle und der Schall kann sich verlustfrei gleichmäßig in alle Raumrichtungen ausbreiten.

2.4 Lautstärke

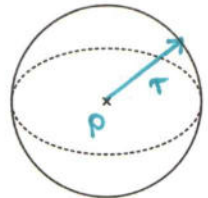
Schallintensität

Von einer Schallquelle mit der Schallleistung P breitet sich der Schall gleichmäßig in alle Raumrichtungen aus.

Dabei ist die **Schallintensität I** definiert als *Leistung pro Fläche*

$$\Rightarrow \text{Schallintensität: } I = \frac{P}{A} \quad ; \quad [I] = 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Da sich die Schallleistung auf eine (virtuelle) *Kugeloberfläche* ($A = 4\pi r^2$) verteilt, nimmt die Schallintensität mit zunehmender Entfernung *quadratisch* ab.



In einem Abstand von 100 m zu einer Sirene beträgt die Schallintensität $4,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

a) Berechne die Schallleistung der Sirene.

b) Bestimme die Schallintensität in einem Abstand von 500 m zur Sirene.

Übungsaufgabe: Sirene (1) ••

$$\begin{aligned} \text{a) } I &= \frac{P}{A} \Rightarrow P = I \cdot A = I \cdot 4\pi r^2 \\ &= 4,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 4\pi \cdot (100 \text{ m})^2 = \underline{503 \text{ W}} = 0,50 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\text{b) } I = \frac{P}{A} = \frac{503 \text{ W}}{4\pi \cdot (500 \text{ m})^2} = \underline{1,6 \cdot 10^{-4} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

alternativ:

5-facher Abstand $\Rightarrow \frac{1}{5^2} = \frac{1}{25}$ der Intensität

Schallintensitäten:

Hörschwelle: $I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

Schmerzgrenze: $I = 10^2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

Die Einheit Dezibel ist nach Alexander Graham Bell benannt, einem der Erfinder des Telefons.

Berechne den Schallpegel in 100 m Entfernung zur Sirene aus obiger Aufgabe.

Schallpegel

Die Schallintensität eignet sich grundsätzlich, um die Lautstärke zu beschreiben. Da sich der Hörbereich des Menschen aber über 14 Größenordnungen erstreckt, erweist sie sich aber als unpraktisch. Aus diesem Grund wurde ein logarithmischer Maßstab eingeführt, der **Schallpegel L** :

$$\Rightarrow \text{Schallpegel: } L = 10 \text{ dB} \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

$$\lg = \log_{10}; \quad \text{dB} = \text{Dezibel}$$

$$I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad \text{Hörschwelle}$$

Übungsaufgabe: Sirene (2) •

$$L = 10 \text{ dB} \cdot \lg\left(\frac{4,0 \cdot 10^{-3}}{10^{-12}}\right) = \underline{96 \text{ dB}}$$

Rechnen mit Logarithmen

Logarithmusrechenregel:

$$\lg(a \cdot b) = \lg(a) + \lg(b)$$

Berechne, wie sich eine Ver-k-fachung der Schallintensität auf den Schallpegel auswirkt. Bestimme anschließend die Werte für $k=2$, $k=10$ und $k=100$.

$$\begin{aligned} 10 \text{ dB} \cdot \lg\left(\frac{k \cdot I_{\text{alt}}}{I_0}\right) &= 10 \text{ dB} \cdot \lg(k) + 10 \text{ dB} \cdot \lg\left(\frac{I_{\text{alt}}}{I_0}\right) \\ &= \underline{10 \text{ dB} \cdot \lg(k) + L_{\text{alt}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bullet 10 \text{ dB} \cdot \lg(2) &= 3 \text{ dB} & ; & \quad k=2 \Rightarrow +3 \text{ dB} \\ \bullet 10 \text{ dB} \cdot \lg(10) &= 10 \text{ dB} & ; & \quad k=10 \Rightarrow +10 \text{ dB} \\ \bullet 10 \text{ dB} \cdot \lg(100) &= 20 \text{ dB} & ; & \quad k=100 \Rightarrow +20 \text{ dB} \end{aligned}$$

a) Ein Auto hat einen Schallpegel von 70 dB. Welchen Schallpegel erreichen zwei Autos? Wie viele Autos erzeugen zusammen einen Schallpegel von 86 dB?

b) Um wieviel dB nimmt der Schallpegel ab, wenn man den Abstand zu einer Schallquelle verzehnfacht?

c) In 50 m Entfernung zu einer Schallquelle beträgt der Schallpegel 73 dB. Berechne die Schallleistung der Schallquelle.

Übungsaufgabe: Verschiedenes zur Lautstärke ••

a) 2 Autos: 73 dB ($2 \cdot I \Rightarrow +3 \text{ dB}$)

$10 \text{ dB} \cdot \lg(2) = +16 \text{ dB}$ $\leftarrow 86 \text{ dB} - 70 \text{ dB}$

$\lg(2) = 1,6$ 10^x

$2 = 10^{1,6} = 39,8 \Rightarrow \underline{\underline{40 \text{ Autos}}}$

b) 10-facher Abstand $\Rightarrow \frac{1}{10^2} = \frac{1}{100}$ der Intensität

$\Rightarrow \underline{\underline{20 \text{ dB}}}$ weniger

c) $L = 10 \text{ dB} \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = 73 \text{ dB}$

$\lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = 7,3$ 10^x

$\frac{I}{I_0} = 10^{7,3}$

$I = 10^{7,3} \cdot I_0 = 10^{7,3} \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = \underline{\underline{20 \cdot 10^{-5} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}}$

$I = \frac{P}{A} \Rightarrow P = I \cdot A = I \cdot 4\pi r^2$
 $= 20 \cdot 10^{-5} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 4\pi \cdot (50 \text{ m})^2 = \underline{\underline{0,63 \text{ W}}}$
 2.4 Lautstärke 3

Deine eigene Hörkurve kannst in zahlreichen youtube-Videos testen. Beachte hierbei, dass auf youtube Frequenzen ab ca. 16 000 Hz nicht mehr abgespielt werden!

Die Kurve einer Farbe (=Isophone) wird vom Menschen gleich laut wahrgenommen.

Bei sehr tiefen oder hohen Tönen ist ein viel größerer Schalpegel nötig, damit sie genauso laut empfunden werden, wie Töne mittlerer Frequenzen.

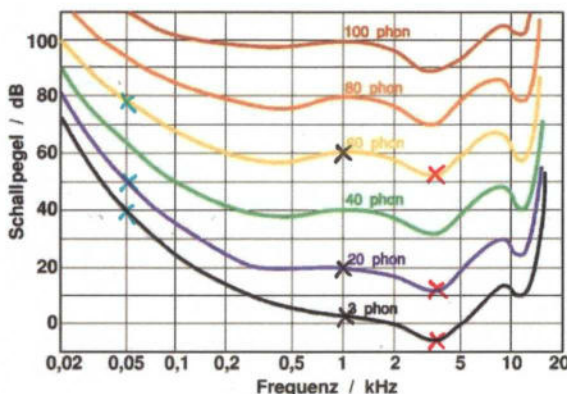
Bestimme die angegebenen Werte in phon.

Hörkurve des Menschen

Die vom Menschen empfundene Lautstärke wird in der Einheit phon angegeben.

Sie hängt sowohl vom Schallpegel als auch von der Frequenz ab. Die

Größen sind so festgelegt, dass Phon und Dezibel für 2 = 1 kHz übereinstimmen.



Umrechnungsbeispiele:

1 kHz: 3 phon $\hat{=}$ 3 dB ; 20 phon $\hat{=}$ 20 dB ; 60 phon $\hat{=}$ 60 dB

50 Hz: 3 phon $\hat{=}$ 40 dB ; 20 phon $\hat{=}$ 50 dB ; 60 phon $\hat{=}$ 80 dB

3,5 kHz: 3 phon $\hat{=}$ -5 dB ; 20 phon $\hat{=}$ 12 dB ; 60 phon $\hat{=}$ 52 dB

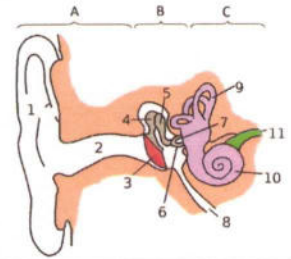
Unser Ohr ist für Frequenzen von 200 Hz - 5 kHz am empfindlichsten. In diesem Bereich liegt auch die Sprache.

2.5 Außenohr

Aufbau des Ohrs

Beschrifte die einzelnen Teile des menschlichen Ohrs und gib jeweils seine (physikalische) Funktion an.

A (1-2)	Außenohr
B (3-8)	Mittelohr
C (9-11)	Innenohr



Nr.	Bezeichnung	(physikalische) Funktion
1	Ohrmuschel	Bündelung und Weiterleitung des Schalls; Richtungshören
2	Gehörgang	
3	Trommelfell	wird durch Schallwellen in Bewegung versetzt
4	Hammer	Gehörknöchelchen; Hebelsystem, das die Bewegung des Trommelfells verstärkt und weiterleitet
5	Amboss	
6	Steigbügel	
7	ovales Fenster	Übertragung der Schwingungen ans Innenohr
8	Eustachische Röhre	Druckausgleich zwischen Außen- und Mittelohr $\Rightarrow$ Trommelfell immer gleich gespannt
9	Bogengänge	Gleichgewichtsorgan
10	Hörschnecke (= Cochlea)	wandelt die Schwingungen in Nervenimpulse um
11	Hörnerv	Signalweiterleitung ans Gehirn

2.5 Außenohr

1

Für das Richtungshören sind drei Mechanismen entscheidend:

- Laufzeitunterschied des Schalls
- Lautstärkeunterschied
- Reflexion, Beugung, Interferenz

Erst das Zusammenspiel aller Mechanismen ermöglicht ein gutes Richtungshören.

Leite eine Formel her für den Laufzeitunterschied des Schalls zu beiden Ohren.

Der Ohrenabstand ist von Mensch zu Mensch verschieden. Damit man sinnvoll rechnen kann, wird dieser per Definition auf $d=20\text{ cm}$ festgelegt.

Neben der Richtungslokalisierung ist es in geringem Umfang auch möglich, die Entfernung einer Schallquelle zu lokalisieren.

(1) Laufzeitunterschied des Schalls

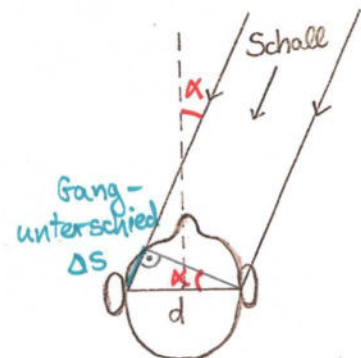
Von einer Schallquelle trifft Schall auf beide Ohren. Dabei erreichen die Schallwellen ein Ohr früher als das andere. Aus der Zeitdifferenz lässt sich der Winkel bestimmen, aus der der Schall kommt.

Für eine ferne Schallquelle kann man dies auch leicht berechnen. In diesem Fall ist der Einfallswinkel des Schalls an beiden Ohren (nahezu) identisch. Damit kann die Einfallsrichtung des Schalls an beiden Ohren als parallel angesehen werden. Somit gilt:

$$\sin \alpha = \frac{\Delta s}{d} \Rightarrow \Delta s = d \cdot \sin \alpha$$

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

$$\Rightarrow t = \frac{\Delta s}{c} = \frac{d \cdot \sin \alpha}{c}$$



Das menschliche Ohr kann eine Zeitdifferenz von ca. $30\text{ }\mu\text{s}$ wahrnehmen. Dies erlaubt eine Richtungslokalisierung auf etwa 3° genau. (vgl. Aufgabe Rückseite)

(2) Lautstärkeunterschied:

- Je größer der Gangunterschied Δs ist, desto größer ist der Lautstärkeunterschied.
- Je weiter eine Schallquelle entfernt ist, desto geringer ist der Lautstärkeunterschied.
($\Rightarrow$ auch Entfernungslokalisierung in geringem Maße möglich)
(vgl. Aufgabe Rückseite)

(3) Reflexion, Beugung, Interferenz:

Treffen Schallwellen aus bestimmten Richtungen (z.B. vorne/hinten, oben/unten) auf das Ohr, dann ist der Laufzeitunterschied und der Lautstärkeunterschied jeweils identisch. Trotzdem kann die Richtung eindeutig festgelegt werden. An der Ohrmuschel werden die Schallwellen unterschiedlich reflektiert und gebeugt. Es kommt zu unterschiedlichen Interferenzmustern und damit je nach Auftreffrichtung zu einer minimal anderen Klangfärbung. Das Gehirn kann daraus Rückschlüsse auf die Richtung ziehen, aus der der Schall kommt. (Zusätzlich werden die Frequenzen im mittleren Bereich durch Interferenzen verstärkt.)

„Das menschliche Ohr (Ohrenabstand: $d=20\text{ cm}$) kann eine Zeitdifferenz von $30\text{ }\mu\text{s}$ wahrnehmen. Dies erlaubt eine Richtungslokalisierung auf etwa 3° genau.“

a) Zeige durch eine Rechnung, dass diese beiden Angaben zusammenpassen. Berechne auch den Gangunterschied Δs für diesen Fall.

b) Bei einer fernen Schallquelle tritt ein Schallereignis an beiden Ohren mit einer Zeitdifferenz von $0,50\text{ ms}$ auf. Berechne den Einfallswinkel des Schalls.

c) Beurteile, ob das Richtungshören beim Menschen auch unter Wasser ($c_{\text{Wasser}} = 1500\text{ }\frac{\text{m}}{\text{s}}$) funktioniert.

Der Laufzeitunterschied kann auch experimentell nachgewiesen werden. Dazu hält man einen Schlauch mit zwei Trichtern an die Ohren und lässt knapp neben der Mitte auf den Schlauch klopfen.

Übungsaufgabe: Laufzeitunterschied beim Richtungshören ••

$$a) t = \frac{d \cdot \sin \alpha}{c} = \frac{0,2\text{ m} \cdot \sin 3^\circ}{340\text{ }\frac{\text{m}}{\text{s}}} = 3,1 \cdot 10^{-5}\text{ s} = \underline{\underline{31\text{ }\mu\text{s}}} \quad \checkmark$$

$$\Delta s = d \cdot \sin \alpha = 0,2\text{ m} \cdot \sin 3^\circ = 0,010\text{ m} = \underline{\underline{1,0\text{ cm}}}$$

$$b) t = \frac{d \cdot \sin \alpha}{c}$$

$$\Rightarrow \sin \alpha = \frac{t \cdot c}{d} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}\text{ s} \cdot 340\text{ }\frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,2\text{ m}} = 0,85$$

$$\Rightarrow \alpha = \underline{\underline{58^\circ}}$$

$$c) c_{\text{Wasser}} = 4,4 \cdot c_{\text{Luft}}$$

$\Rightarrow$ Laufzeitunterschied t um Faktor 4,4 kleiner

$\Rightarrow$ keine Richtungslokalisierung möglich

2.5 Außenohr

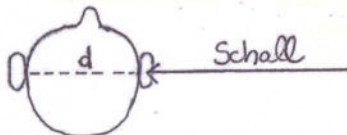
3

Rechts von einer Person ereignet sich ein Schrei mit der Leistung $P = 10^{-3}\text{ W}$. Die Einfallsrichtung des Schalls erfolgt in einem 90° -Winkel (siehe Abbildung; Ohrenabstand $d=20\text{ cm}$)

Berechne den Schallpegel am rechten und am linken Ohr, wenn sich der Schrei a) 50 cm b) $5,0\text{ m}$ neben dem rechten Ohr ereignet.

c) Nenne einen möglichen Grund, weshalb der Lautstärkeunterschied zwischen den beiden Ohren vermutlich etwas größer ist als berechnet.

Übungsaufgabe: Lautstärkeunterschied ••



$$a) I_{re} = \frac{P}{A} = \frac{10^{-3}\text{ W}}{4\pi \cdot (0,5\text{ m})^2} = 3,18 \cdot 10^{-4}\text{ }\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$L_{re} = 10\text{ dB} \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10\text{ dB} \cdot \lg\left(\frac{3,18 \cdot 10^{-4}}{10^{-12}}\right) = \underline{\underline{85\text{ dB}}}$$

$$I_{li} = \frac{10^{-3}\text{ W}}{4\pi \cdot (0,7\text{ m})^2} = 1,62 \cdot 10^{-4}\text{ }\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$L_{li} = 10\text{ dB} \cdot \lg\left(\frac{1,62 \cdot 10^{-4}}{10^{-12}}\right) = \underline{\underline{82\text{ dB}}}$$

$$\Delta L = 3\text{ dB}$$

$$b) L_{re} = \dots = \underline{\underline{65\text{ dB}}}$$

$$L_{li} = \dots = \underline{\underline{64,7\text{ dB}}}$$

$$\Delta L = 0,3\text{ dB}$$

c) Der Kopf stellt für den Schall ein Hindernis dar. Daher ist der Schallpegel auf der linken Seite kleiner als berechnet.

2.5 Außenohr

4

Alle Landlebewesen, also auch wir Menschen, besitzen ein Mittelohr. Dies ist nötig, da sonst zwei verschiedene Medien aufeinandertreffen würden (Außenohr: Luft, Innenohr: wässrige Flüssigkeit). Dies würde die Schallübertragung massiv behindern.

2.6 Mittelohr

Schall an Grenzflächen

Trifft eine Schallwelle auf eine Grenzfläche zu einem anderen

Medium (z. B. Luft – Wasser), dann wird ein Teil der Welle

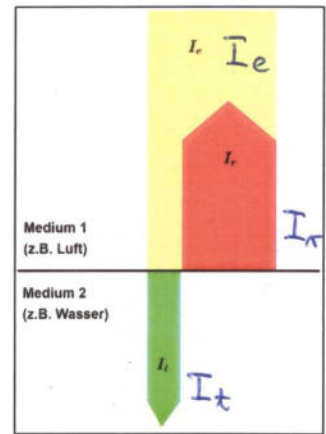
reflektiert und der andere Teil transmittiert

I_e : einfallende Intensität

I_r : reflektierte Intensität

I_t : transmittierte Intensität

(Die transmittierte Schallintensität I_t ist derjenige Teil der Schallintensität, der im Wasser noch zu hören ist.)



Impedanz

I_t und I_r hängen von der Impedanz Z (= „Wellenwiderstand“) der Medien ab.

(Diese gibt an, wie stark sich ein Medium der Anregung einer Schallwelle widersetzt.)

$$\text{Impedanz: } Z = \rho \cdot c ; [Z] = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

ρ : Dichte
 c : Schallgeschwindigkeit im Medium

Impedanzen:

$$Z_{\text{Luft}} = 414 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$$Z_{\text{Wasser}} = 1,48 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

2.6 Mittelohr

1

Transmittierte Schallintensität

An der Grenze zwischen Medium 1 und Medium 2 gilt:

$$I_r = I_e \cdot \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 ; I_t = I_e - I_r$$

Je größer der Impedanzunterschied zweier Medien ist, desto größer ist der reflektierte Anteil und umso geringer ist der transmittierte Anteil.

Beispiel: Übergang Luft - Wasser

$$I_r = I_e \cdot \left(\frac{414 - 1,48 \cdot 10^6}{414 + 1,48 \cdot 10^6} \right)^2 = I_e \cdot 0,9989$$

⇒ 99,89% des Schalls wird reflektiert, also nur 0,11% wird transmittiert

⇒ I sinkt auf $\frac{1}{1000}$ ⇒ L sinkt um 30 dB !

Aufgabe des Mittelohrs

Medium Außenohr: Luft ; Medium Innenohr: wässrige Lösung

⇒ Ohne Mittelohr würde es eine Grenzfläche Luft-Wasser geben.

⇒ Absenkung des Schallpegels um ca. 30 dB

Die Aufgabe des Mittelohres besteht darin, diesen Effekt möglichst gering zu halten. Dies funktioniert mit den folgenden zwei Mechanismen.

2.6 Mittelohr

2

(1) „Schubstangenmodell“

Betrachtet man die Gehörknöchelchen als starre Stange, dann ist die Kraft F_T , die auf das Trommelfell wirkt, genauso groß wie die Kraft F_F auf das ovale Fenster.

$$F_T = F_F$$

$$p_T \cdot A_T = p_F \cdot A_F$$

$$\Rightarrow p_F = p_T \cdot \frac{A_T}{A_F}$$

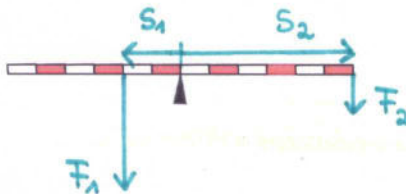


Beim Menschen gilt durchschnittlich: $A_T = 55 \text{ mm}^2$; $A_F = 3,2 \text{ mm}^2$

$$\frac{A_T}{A_F} = \frac{55 \text{ mm}^2}{3,2 \text{ mm}^2} = 17 \Rightarrow \text{Druckerhöhung um den Faktor } 17$$

Das Hebelgesetz kennst du bereits von der „goldenen Regel der Mechanik“ (9. Klasse). Diese besagt, dass bei jedem Kraftwandler (schiefe Ebene, Flaschenzug, Hebel) das Produkt aus Kraft und Weg konstant ist.

(2) Hebelmodell (Gehörknöchelchen als Hebelsystem)



$$\text{Hebelgesetz: } F_1 \cdot S_1 = F_2 \cdot S_2$$

„kurzer Arm - große Kraft
langer Arm - kleine Kraft“

Hammer $\triangleq$ langer Arm; Amboss mit Steigbügel $\triangleq$ kurzer Arm

$\Rightarrow$ Kraft- und damit Druckerhöhung um den Faktor 1,3

2.6 Mittelohr

3

Schalldruck und Schallintensität

In der Formelsammlung findest du einen Zusammenhang zwischen dem Schalldruck p und der Schallintensität I . Dabei ist die Schallintensität proportional zum Quadrat des Schalldrucks. Es gilt:

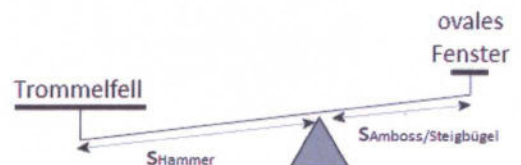
$$I = \frac{p^2}{2 \rho c} = \frac{p^2}{2Z}$$

Einfluss des Mittelohrs in Zahlen

p steigt um Faktor $17 \cdot 1,3 = 22$

Da $I \sim p^2$ steigt I um den Faktor $22^2 \approx 500$

$\Rightarrow L$ steigt nur um wenige dB.



[Thomas.haslwanter, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MiddleEar_Amplification.jpg, übersetzt]

Schalldruck und Schallpegel

Die Formel für den Schallpegel L lässt sich nun auch in Abhängigkeit vom Schalldruck p schreiben. Diese lässt sich über den obigen Zusammenhang wie folgt herleiten:

Logarithmusrechenregel:

$$\lg(u^v) = v \cdot \lg(u)$$

$$L = 10 \text{ dB} \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10 \text{ dB} \cdot \lg\left(\frac{\frac{p^2}{2Z}}{\frac{p_0^2}{2Z}}\right) = 10 \text{ dB} \cdot \lg\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right) = 10 \text{ dB} \cdot \lg\left(\left(\frac{p}{p_0}\right)^2\right) = 2 \cdot 10 \text{ dB} \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right)$$

Diese Formel für L ist in der Formelsammlung leider sehr ungünstig dargestellt.

$$L = 20 \text{ dB} \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right)$$

mit Hörschwelle: $p_0 = 28,3 \text{ } \mu\text{Pa}$

Die Umwandlung der akustischen Signale in elektrische Nervenimpulse findet in der Hörschnecke (Cochlea) statt.

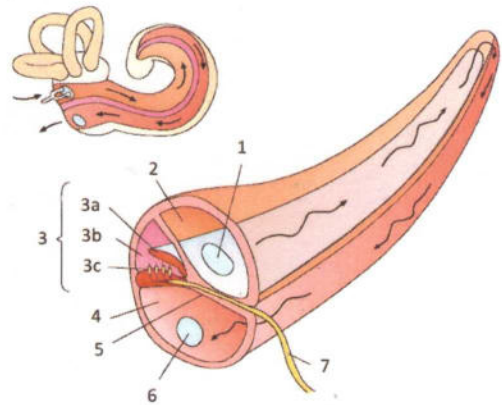
Beschrifte die einzelnen Teile der Hörschnecke.

2.7 Innenohr

Aufbau der Hörschnecke

1. ovales Fenster
2. Vorhofgang
3. Corti'sches Organ
- 3a. Deckmembran
- 3b. Schneckengang
- 3c. Haarzellen
4. Paukengang
5. Basilarmembran
6. rundes Fenster
7. Hörnerv

Hörschnecke im „ausgerollten“ Zustand



[Schnecke – transparent ausgerollt; Beschriftung geändert; Siemens Stiftung 2018. CC BY-SA 4.0]

Drückt der Steigbügel ans ovale Fenster, setzt sich die Flüssigkeit im Vorhofgang in Bewegung („Wanderwelle“). Am Ende des Paukengangs dient das runde Fenster zum Druckausgleich, damit die Welle nicht reflektiert wird.

2.7 Innenohr

1

Experiment:

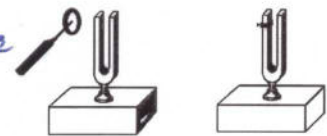
Eine Stimmgabel wird angeschlagen, eine zweite steht daneben.

Beschreibe die Beobachtung, abhängig von den Frequenzen der beiden Stimmgabeln.

Resonanz

Haben beide Stimmgabeln dieselbe Frequenz, dann fängt die zweite Stimmgabel an zu schwingen.

Bei unterschiedlichen Frequenzen bleibt die zweite Stimmgabel stumm.



[www.leifiphysik.de]

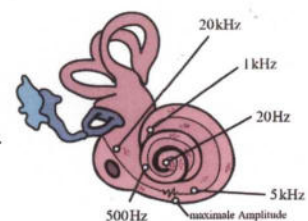
Jeder Körper hat eine Eigenfrequenz (Das ist die Frequenz, mit der der Körper nach einer Anregung schwingt.) Wird er mit genau dieser Frequenz angeregt, dann beginnt er von selbst zu schwingen. Dies nennt man Resonanz.

Das Phänomen der Resonanz ermöglicht ein frequenzselektives Hören.

Basilarmembran

Die Basilarmembran ist am ovalen Fenster schmal und dünn, wird zum inneren der Hörschnecke immer breiter und dicker. Sie hat eine kontinuierliche Eigenfrequenz von 20 kHz am ovalen Fenster bis 20 Hz im Inneren.

Stimmt die Eigenfrequenz der Basilarmembran mit Frequenz der Wanderwelle überein, dann schwingt die Basilarmembran an dieser Stelle mit. Töne unterschiedlicher Frequenz werden an unterschiedlichen Stellen wahrgenommen.



[Sgbeer https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Frequenzabhängigkeit_Ohrschnecke.svg]

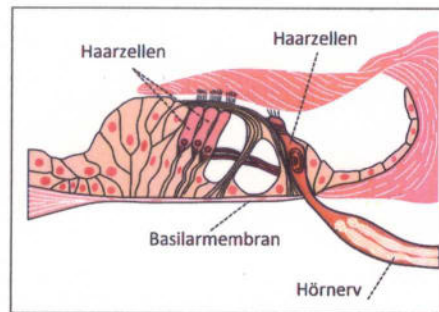
2.7 Innenohr

2

Der exakte Ort für die Umwandlung akustischer in elektrische Nervensignale befindet sich im Schnecken gang im Corti'schen Organ. Hier findet sowohl frequenz- als auch amplitudenselektives Hören statt.

Corti'sches Organ

Aufbau des Corti'schen Organs

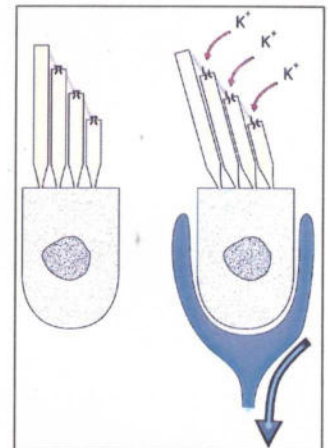


[Madhero88 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Organ_of_corti.svg]

Zilien (Haarbündel) zweier Haarzellen im Rasterelektronenmikroskop



Erzeugung eines Nervensignals



[Thomas.haslwanter; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HairCell_Transduction.svg]

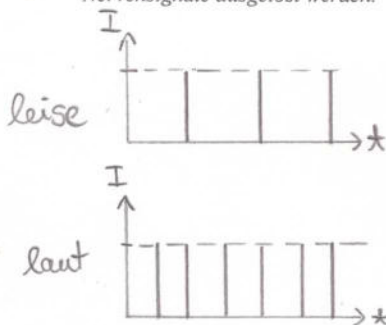
Wie die Erzeugung eines Nervensignals physikalisch genau funktioniert, erfährst du in Kapitel V Neuronale Signalleitung.

- Basilarmembran schwingt
- Zilien neigen sich zur Seite
- Kalium - Ionenkanal (K^+) öffnet sich
- Haarzelle lädt sich auf
- Nervensignal wird erzeugt

2.7 Innenohr

3

Eine größere Lautstärke wird dadurch empfunden, weil im selben Zeitraum mehrere Nervensignale ausgelöst werden.



Amplitudenselektives Hören

- Ton ist lauter
- Basilarmembran schwingt stärker
- Zilien neigen sich stärker
- K^+ -Kanäle öffnen sich weiter
- Zelle lädt sich stärker auf
- mehr Nervensignale werden erzeugt

Achtung: Bei sehr hohen Lautstärken oder einer dauerhaften Beschallung über 85 dB brechen Zilien in den Haarzellen ab. Diese sind dann irreparabel geschädigt! Es kommt zu Hörverlust!

Das Gleichgewichtsorgan ist aus physikalischer Sicht hoch interessant. Auch bei verschiedenen Erkrankungen in diesem Zusammenhang spielt die Physik eine große Rolle. Im Lehrplan der Biophysik ist es aber nicht vorgesehen, sich damit zu beschäftigen.

*Ausblick: Gleichgewichtsorgan (=Vestibularapparat)

Die drei Bogengänge sind im 90° -Winkel zueinander angeordnet (wie ein 3D-Koordinatensystem). Sie sind mit einer Flüssigkeit gefüllt, die sich bei jeder Kopfbewegung unterschiedlich stark in Bewegung setzt. Dadurch werden Haarzellen in den Bogengängen unterschiedlich stark geneigt, wodurch Nervensignale ausgelöst werden. Gleichzeitig sendet das Gehirn Nervensignale an die Augenmuskeln, sodass eine Drehung des Kopfes automatisch eine Drehung der Augen in die Gegenrichtung bewirkt. Dadurch bleibt das Bild auf der Netzhaut auch bei Kopfdrehungen stabil.

2.7 Innenohr

4