

# IZ1

Modul Akustik

## Schallwellen

Dieses Experiment widmet sich den Themengebieten Schall und Schallausbreitung. Zuerst werden Schallwellen mit einem Audio-Oszilloskop untersucht und der menschliche Hörbereich mittels eines Tongenerators vermessen. Im weiteren Verlauf des Experiments wird die Schallgeschwindigkeit in der Luft bestimmt und schliesslich werden mit Hilfe eines Sonars Distanzen gemessen.



## Versuch IZ1 - Schallwellen

Dieses Experiment widmet sich den Themengebieten Schall und Schallausbreitung. Zuerst werden Schallwellen mit einem Audio-Oszilloskop untersucht und der menschliche Hörbereich mittels eines Tongenerators vermessen. Im weiteren Verlauf des Experiments wird die Schallgeschwindigkeit in der Luft bestimmt und schliesslich werden mit Hilfe eines Sonars Distanzen gemessen.

## 1.1 Fragen zur Vorbereitung

Die nachfolgenden Fragen zur Vorbereitung sind schriftlich im Protokoll zu beantworten. Schreibe dazu höchstens zwei bis drei Sätze zu jeder Frage.

- Schau dir rechts den Cartoon an. Was ist eher als künstlerische Freiheit zu interpretieren und ergibt physikalisch keinen Sinn?
- Wie orientieren sich Fledermäuse im Raum?
- Was bedeutet die Abkürzung *Radar*? Wie funktioniert dieses System? Wo werden Radar-Systeme eingesetzt?
- Wofür steht die Abkürzung *Sonar*? Wo findet diese Technologie Anwendung?
- Erkläre die Begriffe *Periodendauer*, *Frequenz* und *Amplitude* in eigenen Worten. Was ist der Unterschied in der physikalischen Bedeutung von *Auslenkung* und *Amplitude*?
- Was sind *longitudinale* Wellen, was sind *transversale* Wellen? Welche Beispiele dazu kennst du?
- Erkläre die Begriffe *Ton*, *Klang*, *Geräusch* und *Knall*. Wie kann man diese unterscheiden?



Abbildung 1.1: Weit entfernt von der Erde wird ein Raumschiff von einem anderen getroffen. Quelle: Philipp Wichtrup, Universität Münster

## 1.2 Theorie

### 1.2.1 Longitudinal- und Transversalwellen

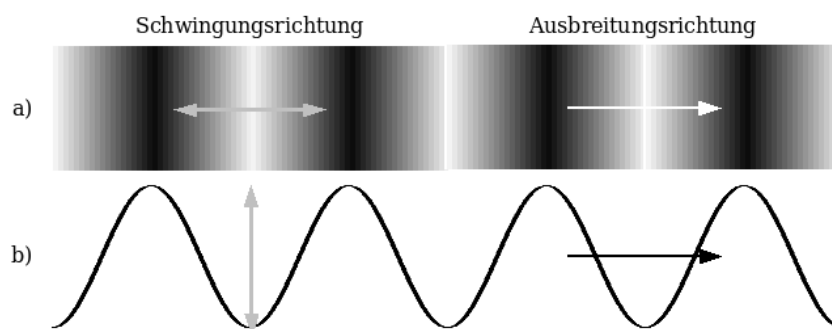


Abbildung 1.2: In der Zeile a) ist eine Longitudinalwelle zu sehen. In der darunterliegenden Zeile b) ist eine Transversalwelle zu sehen. In der linken Spalte sieht man die Schwingungsrichtung, in der rechten Spalte die Ausbreitungsrichtung. Longitudinalwellen schwingen in Ausbreitungsrichtung, während Transversalwellen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen. Quelle: Debianux

Es gibt longitudinale Wellen und transversale Wellen. *Longitudinalwellen* sind Druckwellen. Bei Longitudinalwellen ist die Schwingungsrichtung gleichzeitig auch die Ausbreitungsrichtung (siehe Abbildung 1.2). Ein Beispiel für longitudinale Wellen ist der Schall, der in Gasen und Flüssigkeiten ausschliesslich als Longitudinalwelle vorkommt.

*Transversalwellen* schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Beispiele hierfür sind die elektromagnetische Wellen (z.B. sichtbares Licht, Röntgenstrahlung), Gravitationswellen und Plasmawellen.

### 1.2.2 Longitudinalwellen als Pegeldiagramme darstellen

Ein Pegeldiagramm zeigt die Auslenkung aufgetragen zur Zeit. Longitudinalwellen schwingen vor und zurück wie in Kapitel 1.2.1 beschrieben. Als Neutralstellung bezeichnet man die Position in der Mitte zwischen zwei maximalen Auslenkungen. Möchte man ein Pegeldiagramm zeichnen, also ein Auslenkungs-Zeit-Diagramm, dann trägt man die Auslenkung in Ausbreitungsrichtung nach oben (positiv) ein und die Auslenkung entgegen der Ausbreitungsrichtung nach unten (negativ) ein.

Die *Periodendauer* bezeichnet die Zeit, die es braucht, um einmal hin und wieder zurück zu schwingen - analog wie bei einem Pendel. Die *Frequenz* gibt die Anzahl Perioden pro Sekunde an und ist damit der Kehrwert der Periodendauer. Die Frequenz wird in Hertz [Hz] angegeben. Als *Amplitude* bezeichnet man die maximale Auslenkung der Schwingung.

### 1.2.3 Schallwellen

Allgemein bezeichnet Schall mechanische Schwingungen in einem elastischen Medium. Diese Schwingungen propagieren in Form von Schallwellen durch Gas, Flüssigkeit und Festkörper. In Luft sind Schallwellen Druck- und Dichteschwankungen. Im Vakuum pflanzen sich Schallwellen nicht fort.

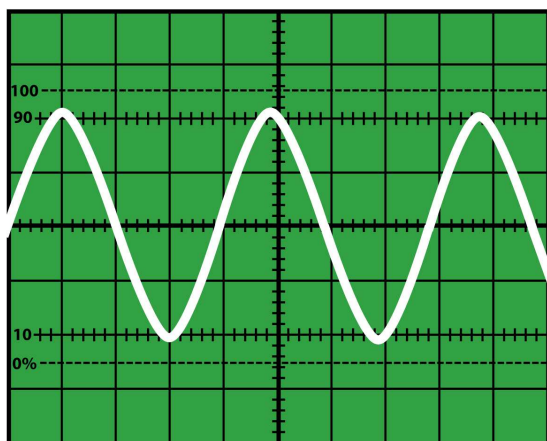


Abbildung 1.3: Man spricht von einem *Ton*, wenn im Auslenkungs-Zeit-Diagramm eine sinusförmige Wellenlinie zu sehen. Quelle: Klaus-Dieter Keller

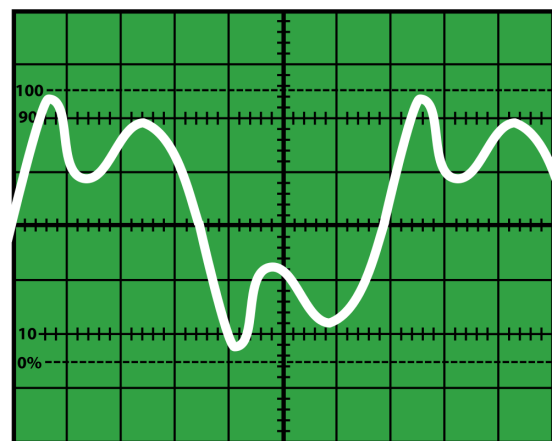


Abbildung 1.4: Ein *Klang* ist im Auslenkungs-Zeit-Diagramm eine komplizierte Wellenlinie mit sich wiederholenden Abschnitten. Quelle: Klaus-Dieter Keller

Bei Schallwellen differenziert man zwischen *Tönen*, *Klängen*, *Geräuschen* und *Knall*. In den Abbildungen 1.3 bis 1.6 sind entsprechende Auslenkungs-Zeit-Diagramme, auch Pegeldiagramme genannt, dargestellt (Zeit läuft von links nach rechts). Diese lassen sich mit einem Oszilloskop und einem Lautsprecher messen. Man unterscheidet:

- Ein *Ton* ist eine sinusförmige Schwingung im Auslenkungs-Zeit-Diagramm (siehe Abbildung 1.3). Die Frequenz bleibt über die Zeit konstant.
- Ein *Klang* ist eine Schwingung mit sich wiederholenden Abschnitten, wie in Abbildung 1.4 zu sehen ist.
- Man spricht von einem *Geräusch*, wenn das Auslenkungs-Zeit-Diagramm ein unregelmässiges Schwingbild zeigt wie in Abbildung 1.5.
- Ein *Knall* ist in Abbildung 1.6 dargestellt. Es handelt sich um ein Geräusch, welches charakterisiert wird durch ein schnelles zeitliches Abklingen der Amplitude.

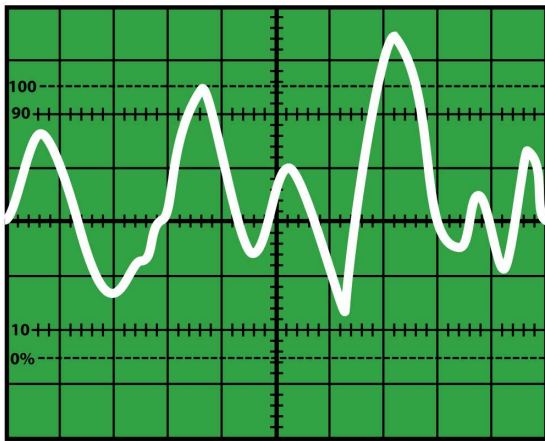


Abbildung 1.5: Ein *Geräusch* zeigt im Auslenkungs-Zeit-Diagramm ein unregelmässiges Schwingbild. Quelle: Klaus-Dieter Keller

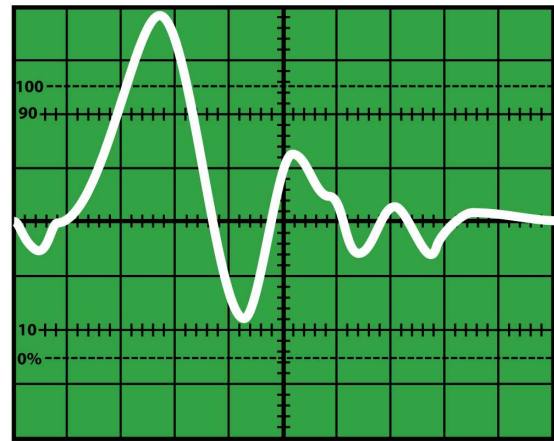


Abbildung 1.6: Ein *Knall* ist ein Geräusch mit einem schnellen zeitlichen Abklingen der Auslenkung. Quelle: Klaus-Dieter Keller

Ein hoher Ton hat eine grosse Frequenz und damit eine kleine Periodendauer der Schwingung. Ein tiefer Ton hat eine kleine Frequenz und eine grosse Periodendauer. Dies ist in Abbildung 1.7 zu sehen.

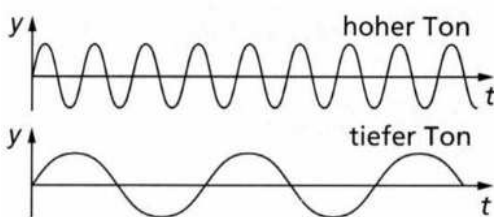


Abbildung 1.7: Je höher ein Ton ist, desto grösser ist die Frequenz der Schwingung. Quelle: Bildungsministerium Rheinlandpfalz

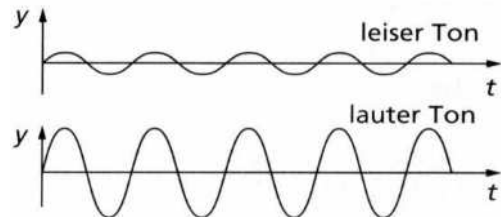


Abbildung 1.8: Je grösser die Amplitude im Auslenkungs-Zeit-Diagramm, desto lauter ist der Ton. Quelle: Bildungsministerium Rheinlandpfalz

Je grösser die Amplitude eines Geräusches ist, desto grösser ist die Lautstärke. Leise Geräusche haben eine kleine Amplitude, wie man in Abbildung 1.8 sieht.

## 1.2.4 Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit  $c$  gibt an, welche Strecke  $s$  der Schall in der Zeit  $t$  zurücklegt:

$$c = \frac{s}{t} \quad (1.1)$$

Schall breitet sich nur in elastischen Medien aus. Dabei ist die Schallgeschwindigkeit von der Dichte des Mediums  $\rho$  und dessen Kompressionsmodul  $K$  im Fall von Gasen und Flüssigkeiten bzw. dem Elastizitätsmodul  $E$  im Fall von Festkörpern abhängig. Die Größen  $K$  und  $E$  sind vom Material, dessen Temperatur und Druck abhängig. Es gilt für die Schallgeschwindigkeit  $c$  der Zusammenhang

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad \text{für Gase und Flüssigkeiten} \quad (1.2)$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{für Festkörper} \quad (1.3)$$

Literaturwerte<sup>1</sup> für Gase:

Stoff	$K$ in $[\text{N}/\text{m}^2]$ bei $0^\circ\text{C}$ und 1bar	Dichte $\rho$ $[\text{kg}/\text{m}^3]$ bei $20^\circ\text{C}$
Erdgas	$1.6 \cdot 10^9$	0.83
Luft	$1.5 \cdot 10^5$	1.29
CO <sub>2</sub>	$1.4 \cdot 10^5$	1.98

Literaturwerte<sup>1</sup> für Flüssigkeiten:

Stoff	$K$ in $[\text{N}/\text{m}^2]$ bei $20^\circ\text{C}$	Dichte $\rho$ $[\text{kg}/\text{m}^3]$ bei $20^\circ\text{C}$
Wasser	$2.2 \cdot 10^9$	998
Aceton	$9.2 \cdot 10^8$	791
Ethanol	$8.9 \cdot 10^8$	789
Quecksilber	$2.8 \cdot 10^{10}$	13546

Literaturwerte<sup>1</sup> für Festkörper:

Stoff	$E$ in $[\text{N}/\text{m}^2]$ bei $20^\circ\text{C}$	Dichte $\rho$ $[\text{kg}/\text{m}^3]$ bei $20^\circ\text{C}$
Aluminium	$7.1 \cdot 10^{10}$	2700
Plexiglas	$0.3 \cdot 10^{10}$	1180
Platin	$17 \cdot 10^{10}$	21450

<sup>1</sup>Die Werte stammen aus Werner Durandi, *Formeln, Tabellen, Begriffe*, 3. Auflage, orell füssli Verlag, 2011

## 1.3 Experiment

### 1.3.1 Material

Für dieses Experiment brauchst du zwei Geräte mit Lautsprecher und Mikrophon, auf denen die kostenlose App *phyphox* der RWTH Aachen installiert ist.



Bestens geeignet sind beispielsweise Smartphones und Tablets. Die App *phyphox* ist für die Betriebssysteme iOS und Android erhältlich und kann im App Store bzw. im Google Play Store kostenlos heruntergeladen werden.

Die App *phyphox* ermöglicht es, auf die im Gerät eingebauten Sensoren wie Mikrophon, Gyroskop, Teslameter, Luftdrucksonde, Lichtsensor und so weiter zuzugreifen. Wenn du damit arbeitest, sei bitte vorsichtig, um das Gerät nicht zu beschädigen: Setze es keinen starken Magnetfeldern aus, schütze es vor Feuchtigkeit sowie Wärme und lasse es nicht auf harte Oberflächen fallen. Weder die Hersteller der App *phyphox* noch die Universität Basel übernehmen die Verantwortung für Schäden an deinen Geräten. Die Benutzung erfolgt auf eigene Gefahr. Für den Datenexport wird eine Internetverbindung benötigt. Es wird dringend empfohlen, hierfür das Smartphone mit einem *Wlan* zu verbinden, um keine Gebühren für die Datenübertragung via Mobilfunknetz zu bezahlen.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über das für den Versuch benötigte Material:

Material	Menge
Gerät mit App <i>phyphox</i>	2
Messband oder Zollstock	1
Kissen zur Dämpfung	3

### 1.3.2 Durchführung

#### Hörbereich vermessen

1. Gehe in der App *phyphox* auf den *Tongenerator*. Es können - je nach Lautsprecher des Smartphones - sehr niedrige bis sehr hohe Frequenzen erzeugt werden. Es kann sich lohnen, externe Lautsprecher oder Kopfhörer am Smartphone anzuschließen, falls dessen Tonqualität ungenügend ist.

*Vorsicht:* Wähle eine geringe Lautstärke, um dein Gehör zu schützen! Am besten stellst du die Lautstärke bei einer Frequenz von etwa 500Hz ein.

2. Beginne bei einer Frequenz, die du gut wahrnehmen kannst (z.B. 500Hz). Erhöhe dann die Frequenz schrittweise, um zu testen, bis zu welcher Frequenz du den Ton hören kannst. Notiere die maximale von dir hörbare Frequenz.
3. Beginne wiederum bei einer gut hörbaren Frequenz (z.B. 500Hz) und reduziere diese dann schrittweise, um so die minimale von dir hörbare Frequenz zu bestimmen. Notiere diese.

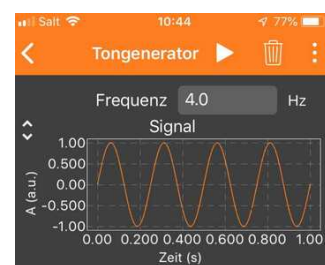


Abbildung 1.9: Der *Tongenerator* erzeugt die gewünschten Frequenzen und stellt sie graphisch dar.



## Arten von Schall

- Überlege dir, wo (beziehungsweise wann) du in deinem Haushalt Folgendes findest:
 

(a) hoher, lauter Ton	(e) leises Geräusch
(b) leiser Klang	(f) lauten Klang
(c) lautes Geräusch	(g) einen Knall
(d) tiefer, leiser Ton	(h) absolute Ruhe

Ob Klospülung oder Trompete - deiner Kreativität sind keine Grenzen gesetzt!

- Gehe in der App *phyphox* auf das *Audio Oszilloskop* und klicke auf ► im orangenen Balken, um die Messung zu starten. Schau dir (a) einen hohen, lauten Ton an und stoppe danach die Messung mit || (dort, wo zuvor noch ► war).
- Jetzt werden die Daten gespeichert und auf den Computer exportiert. Klicke dafür in der App oben rechts auf ⋮, so dass sich das Menü *Aktionen* öffnet. Wähle dann *Daten exportieren* und entscheide dich für ein passendes Dateiformat. Dann unten auf *Daten exportieren* klicken und z.B. *Mail* auswählen, Mailadresse eingeben und schon kannst du die Daten auf deinem Computer z.B. mit Excel öffnen und beispielsweise ins Programm *OriginPro* importieren (copy/paste).
- Verwende nun das *Audio Spektrum* von *phyphox* und zeichne damit den selben hohen, lauten Ton aus (a) auf, den du mit dem *Audio Oszilloskop* zuvor betrachtet hast. Klicke dafür auf ► und zeichne das Spektrum von (a) auf. Klicke dann auf ||, um die Messung zu stoppen. Exportiere das Spektrum analog zum vorherigen Pegelplot, indem du wiederum auf ⋮ oben rechts klickst und dem Menü folgst. Achte darauf, dass du beim Plotten des Spektrums eine logarithmische Skala für die Frequenz-Achse wählst.
- Wiederhole die Schritte (2) bis (4) für die Kategorien (b) bis (h) und zeichne jeweils ein Auslenkung-Zeit-Diagramm mit dem *Audio Oszilloskop* und ein Spektrum mit dem *Audio Spektrum* auf. Ein Beispiel dafür ist in den Abbildungen 1.12 und 1.13 zu sehen - es handelt sich hier um einen Ton einer Frequenz  $f$  von 595Hz.  
 MERKE: Die Auslenkung  $A$  aus Abbildung 1.12 ist proportional zur Lautstärke, und die Frequenz  $f$  der Schwingung in Abbildung 1.12 entspricht der Frequenz des Peaks in Abbildung 1.13.



Abbildung 1.10: Das *Audio Oszilloskop* zeichnet die Amplitude zur Zeit auf.

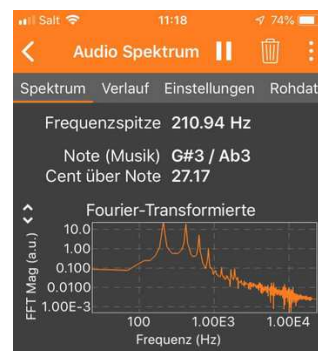


Abbildung 1.11: Für das *Audio Spektrum* wird das Frequenzspektrum durch eine Fourier-Transformation berechnet.

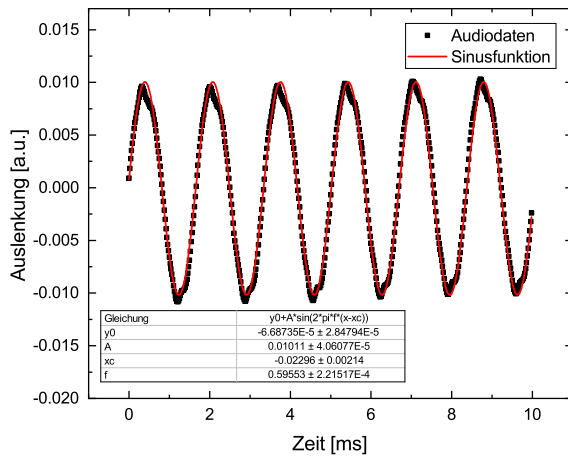


Abbildung 1.12: Aufnahme mit dem Audio Oszilloskop, wobei die Auslenkung zur Zeit geplottet wurde. Die Frequenz  $f = 0.5955 \text{ ms}^{-1} = 595.5 \text{ Hz}$  erhält man als Parameter aus dem Sinusfit.

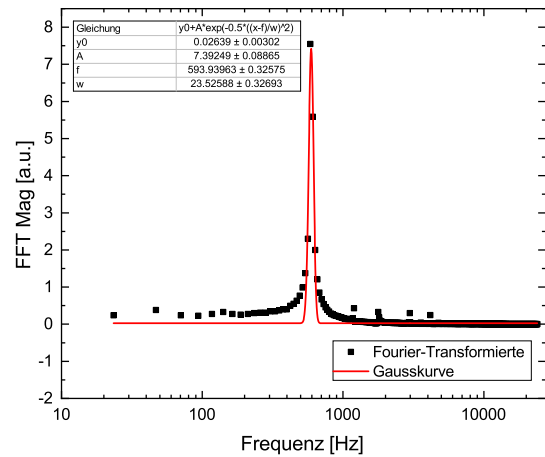


Abbildung 1.13: Im Spektrum ist die Fast Fourier Transformation (FFT) zur Frequenz aufgezeichnet. Eine Gausskurve wurde über das Spektrum gelegt, welche den Peak bei  $f = 593.9 \text{ Hz}$  hat.

### Schallgeschwindigkeit in der Luft

Man stelle sich folgendes Szenario vor: Zwei Zwerge sind am Wandern. Unglücklicherweise haben sie Mühe mit dem Lesen der Karten, haben kein GPS- und Internetsignal auf dem Smartphone und können sich auch nicht mit Hilfe von Wegweisern orientieren. Einer der Zwerge erinnert sich an den Echo-Trick: Er ruft laut 'Hallo Echo!' und stoppt mit dem Smartphone die Zeit  $t$ , bis er das Echo seiner Stimme hört. Er findet damit  $t = 4.10$  Sekunden. Leider weiss keiner der beiden die Schallgeschwindigkeit in Luft auswendig - und auch wenn beide ein Smartphone dabei haben, können sie den Wert nicht online nachschlagen ohne Verbindung zum Internet.

Zum grossen Glück haben beide die App *phyphox* auf ihrem Smartphone installiert - damit wollen sie nun die Schallgeschwindigkeit in der Luft messen. Im Wissen, dass zehn Zwergenschritte ganz exakt 5m lang sind, können sie nun die Distanz zum Berg bestimmen. Hilf ihnen dabei!

1. Gehe in der App *phyphox* auf die *Akustische Stoppuhr*. Diese startet und stoppt den Timer des Smartphones, wenn das eingebaute Mikrophon Geräusche empfängt, welche lauter sind als die zuvor eingegebene Schwelle. Wenn die Zeitmessung beim Klatschen nicht startet, muss die Schwelle nach unten korrigiert werden. Wenn die Zeitmessung bereits bei Hintergrundgeräuschen startet oder stoppt, dann muss die Schwelle erhöht werden. Um zu verhindern, dass ein längeres Geräusch die Messung startet und gleich wieder stoppt, wählt man eine vernünftige Mindestverzögerung - d.h. eine minimale Zeit zwischen dem Starten und dem Stoppen des Timers.



Abbildung 1.15: Die *Akustische Stoppuhr* im Modus *Einfach* kann mit dem ► Symbol gestartet werden.

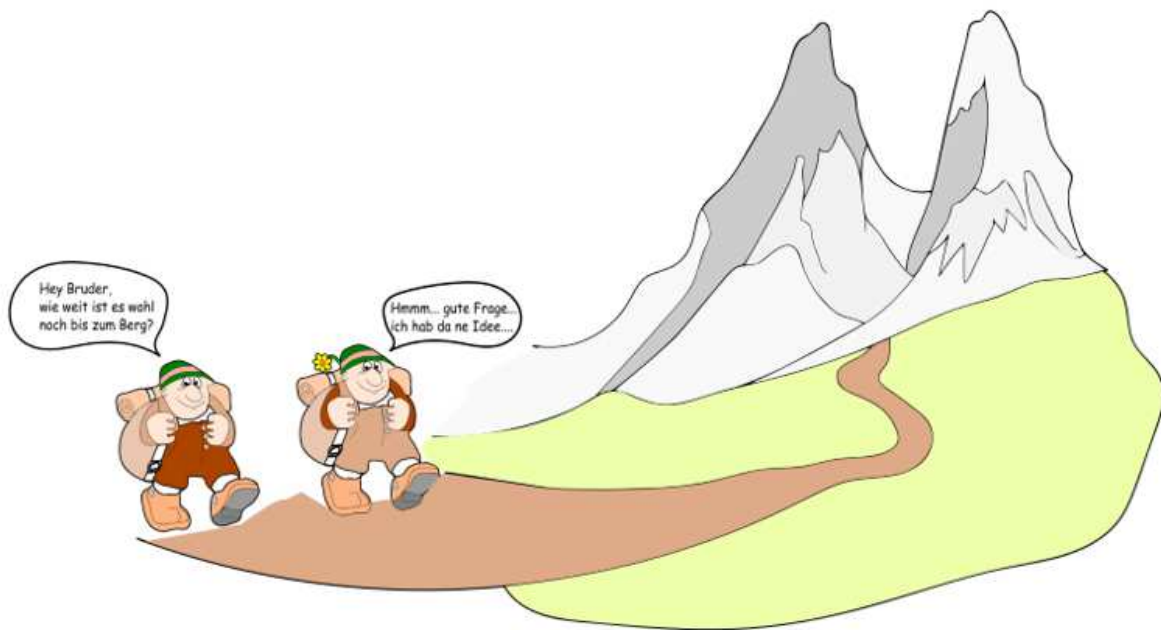


Abbildung 1.14: Wenn der Zwerg ruft, ertönt ein Echo vom Berg. Durch Messung der Zeit zwischen dem Rufen und dem Hören des Echos kann die Distanz bestimmt werden.

2. Platziere die beiden Smartphones mit Hilfe eines Messbands oder eines Zollstocks in einem Abstand von 5m. Notiere den Messfehler der Distanz.
3. Für dieses Experiment benutzt man den Modus *Einfach* (und nicht *Sequenz*, *Parallel* oder *Viele*). Klicke auf beiden Smartphones oben im orangen Balken auf das ► Symbol. Damit ist das Mikrophon eingeschaltet und zur Messung bereit - verhalte dich ganz ruhig. Gehe nun wie folgt vor:
  - (a) Klatsche direkt oberhalb vom Smartphone *A* in die Hände. Dies startet den Timer vom Smartphone *A*, und mit einer Verzögerung startet der Timer von Smartphone *B*.
  - (b) Gehe nun ganz leise zum Smartphone *B* und klatsche direkt oberhalb von Smartphone *B*. Dies wird den Timer von Smartphone *B* sofort stoppen, und mit einer Verzögerung stoppt auch der Timer von Smartphone *A*.

*Vorsicht:* Falls die Timer bereits stoppen, bevor du ein zweites Mal geklatscht hast, dann ist die Schwelle oder die Mindestverzögerung nicht gut eingestellt. Es ist hilfreich, das Experiment an einem sehr ruhigen Ort durchzuführen.

  - (c) Notiere die beiden Zeiten  $t_A$  und  $t_B$  auf den Timern der Smartphones und schätze einen Fehler ab.
  - (d) Stelle die beiden Timer mit *Reset* zurück, das Mikrophon bleibt dabei eingeschaltet.
4. Wiederhole diese Messung neun Mal, so dass du am Schluss zehn Messwerte für  $t_A$  und zehn Messwerte für  $t_B$  hast.

## Sonar

1. Schau dir auf *Youtube* das folgende Video an: <https://www.youtube.com/watch?v=3JtJoJAAgKU>. Hier demonstrieren die Entwickler der App *phyphox* die Funktionsweise des Sonars.
2. Gehe in der App *phyphox* auf den *Sonar* und wähle den Modus *Entfernung der Echos*. Ein Sonar misst Entfernungen mit Hilfe von Echos bei bekannter Schallgeschwindigkeit.
3. Gib die im vorherigen Versuch bestimmte Schallgeschwindigkeit in [m/s] im entsprechenden Feld ein.
4. Durch drücken auf ► oben im orangen Balken beginnt ein Zwitschergeräusch. Achte darauf, dass der Lautsprecher des Smartphones auf einer mittleren Lautstärke eingestellt und das Mikrophon frei ist.
5. Platziere wie im Video ein kleines, hartes Zielobjekt und schirme in alle anderen Richtungen mit Kissen, Schaumstoff oder Decken ab. Eine ruhige Umgebung ist sehr hilfreich für dieses Experiment.
6. Miss mit dem Sonar die Distanz zum gewünschten Objekt. Miss anschliessend mit einem Messband oder Zollstock nach und notiere beide Messwerte.
7. Miss mit dem Sonar verschiedene Objekte in verschiedenen Distanzen und versuche herauszufinden, was gut geht und was nicht. Mache jeweils mit dem Messband oder Zollstock eine Kontrollmessung.

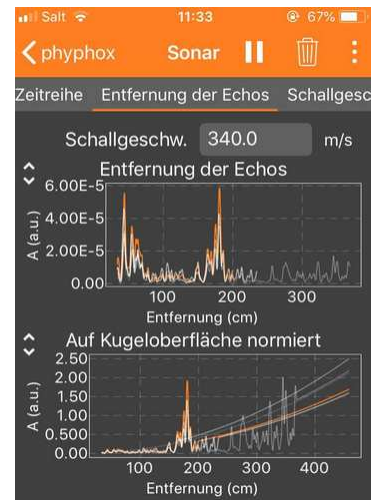


Abbildung 1.16: Der *Sonar* wird im Modus *Entfernung des Echos* verwendet. Die Schallgeschwindigkeit ist manuell einzustellen.

BEISPIEL: In Abbildung 1.16 wurde die Raumhöhe im Keller mit Hilfe des *phyphox* Sonars gemessen. Man beobachtet Rauschen im Bereich kurzer Abstände. Der Peak liegt bei rund 180cm, was mit der Kontrollmessung mittels Messband konsistent ist. Das Rauschen wird durch Reflexionen an Lagergestellen etc. verursacht, da die Dämpfung durch Kissen usw. im Keller ungenügend war.

### 1.3.3 Auswertung

#### Hörbereich vermessen

1. Gib deinen Hörbereich als Intervall an und ordne diesen im Vergleich zum Hörbereich verschiedener Tierarten (siehe Abbildung 1.17) ein.

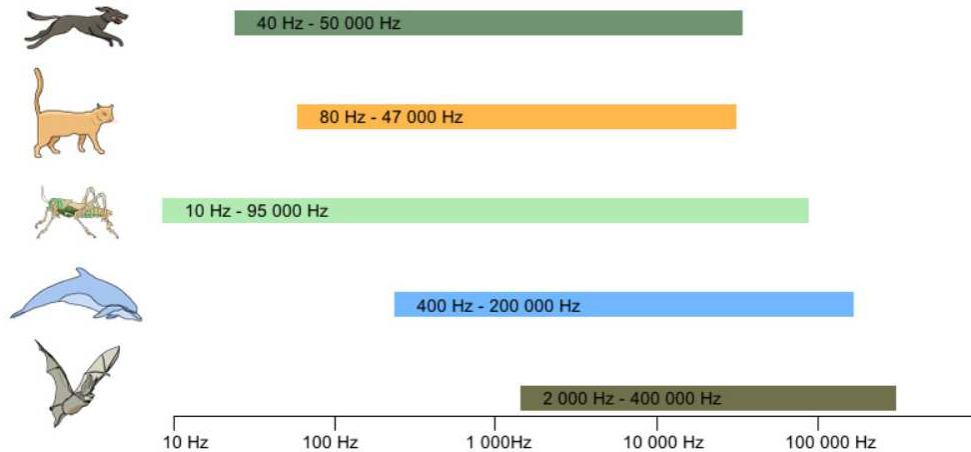


Abbildung 1.17: Zu sehen sind die Hörbereiche verschiedener Tierarten. Ein Hund hört beispielsweise die Frequenzen zwischen 40Hz und 50'000Hz. Quelle: Ernst Klett Verlag

2. Im Kapitel 1.2.3 im Theorieteil wird behauptet: Ein hoher Ton hat eine grosse Frequenz und ein tiefer Ton hat eine kleine Frequenz. Kannst du dies an Hand deiner Erfahrungen mit dem Tongenerator bestätigen?

#### Arten von Schall

1. Zeichne für jedes Beispiel von (a) bis (h) jeweils ein Pegeldiagramm und ein Spektrum auf und stelle die beiden Diagramme nebeneinander dar (siehe als Beispiel Abbildungen 1.12 und 1.13). Beim Plotten des Spektrums sollte für die Frequenz eine logarithmische Skala verwendet werden.
2. Lege wenn möglich eine passende Fitfunktion bzw. eine Verteilkurve an und bestimme die relevanten Parameter wie Frequenz und Amplitude.
3. Beantworte an Hand deiner Messungen folgende Fragen:
  - Wie unterscheiden sich die Pegeldiagramme und Spektren von *Tönen*, *Klängen*, *Geräuschen* und *Knall*? Kann durch deine Messungen die Theorie (siehe Kapitel 1.2.3) bestätigt werden?
  - Sind Pegeldiagramm und Spektrum jeweils konsistent, d.h. haben sie beispielsweise bei der Messung des selben Klangs die selbe Frequenz?
  - Vergleiche die Frequenz und die Amplitude des hohen, lauten Tons (a) mit der Frequenz und Amplitude des tiefen, leisen Tons (d). Was stellst du fest?
  - Vergleiche die Amplitude des lauten Geräusches (c) mit der Amplitude des leisen Geräusches (e). Was beobachtest du?
  - Was findet man beim Vergleich des lauten Klangs (f) mit dem leisen Klang (b)?
  - Wie verhält sich ein Knall?

- Kannst du absolute Ruhe ( $h$ ) messen? Falls nicht, was bedeutet das für die anderen Messungen?

### Schallgeschwindigkeit

1. Zeichne zuerst ein schematisches  $t$ - $x$ -Diagramm (d.h. die Zeit  $t$  ist auf der horizontalen und die Distanz  $x$  auf der vertikalen Achse) und veranschauliche damit den Ablauf des Experiments. Trage dazu in dieses Diagramm auf der jeweiligen Achse folgende Punkte und Größen ein:

- $x_A$  der Ort von Smartphone A
- $x_B$  der Ort von Smartphone B
- $t_A^{\text{Start}}$  Startzeitpunkt Smartphone A
- $t_B^{\text{Start}}$  Startzeitpunkt Smartphone B
- $t_A^{\text{Stop}}$  Stopzeitpunkt Smartphone A
- $t_B^{\text{Stop}}$  Stopzeitpunkt Smartphone B
- $d$  ist der Abstand zwischen  $x_A$  und  $x_B$
- Schall braucht  $\Delta t$  von  $x_A$  nach  $x_B$

Zeichne nun den Weg des Schalls im Verlauf der Zeit ein.

2. Schau dir das soeben erstellte Diagramm gut an und versuche mit dessen Hilfe eine Formel zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit  $c$  in Luft aus den gemessenen Größen zu entwickeln. Tipp: In deinem  $t$ - $x$ -Diagramm ist  $t_A = t_A^{\text{Stop}} - t_A^{\text{Start}}$  und  $t_B = t_B^{\text{Stop}} - t_B^{\text{Start}}$ .
3. Bestimme den Mittelwert und die Standardabweichung des Mittelwerts der jeweils zehn gemessenen Zeiten  $t_A$  und  $t_B$ .
4. Berechne aus deinen Messdaten die Schallgeschwindigkeit  $c$  in Luft und führe eine Fehlerabschätzung durch.
5. Wie viele Messungen sollten durchgeführt werden, um eine sinnvolle Statistik zu haben?
6. Berechne mit den Angaben in Kapitel 1.2.4 die Schallgeschwindigkeit in der Luft und vergleiche diesen Literaturwert mit deinem Messresultat.
7. Wie weit sind die Zwerge vom Berg entfernt?
8. Wie lässt sich auf diese Weise die Distanz zu einem Gewitter abschätzen?
9. Was könnte man ohne viel Aufwand bei diesem Experiment verändern, um das Ergebnis zu verbessern?

### Sonar

1. Vergleiche die Distanzmessungen mittels Sonar mit den Kontrollmessungen mit dem Messband oder Zollstock. Für welche Distanzen bzw. welche Objekte sind die beiden Messmethoden konsistent und wann nicht?
2. Beantworte folgende Fragen:
  - Weshalb wird bei Flugzeugen mit Radar-Systemen gearbeitet, in U-Booten sowie in der Fischerei aber mit Sonar- und Echolot-Systemen?
  - Warum kann in der Astrophysik nicht mit Sonaren gearbeitet werden?
  - Ultraschalluntersuchungen basieren auf dem Prinzip eines Sonars. Wie funktioniert das und wo liegen die Vorteile im Vergleich zu Röntgenuntersuchungen?

## Literatur

- W. Demtröder, *Mechanik und Wärme*, Band 1, 2. Auflage, Springer-Verlag, 1998
- K. Lüders, *Mechanik, Akustik, Wärme*, Band 1, 12. Auflage, de Gruyter-Verlag, 2008
- F. Kohlrausch, *Praktische Physik 1: Mechanik, Akustik, Wärme, Elektrizität*, 24. Auflage, Teubner-Verlag, 1996
- R. Feynman, *Feynman-Vorlesungen über Physik*, Band 1, Oldenbourg-Verlag, 2001
- Webseite der Entwickler von *phyphox*, <https://phyphox.org/>, RWTH Aachen, Stand März 2020

## A.1 Ultraschallsonographie in der medizinischen Diagnostik

Die *Ultraschallsonographie* ist eine schmerzfreie und im Vergleich zu Röntgen- oder nuklearmedizinischen Untersuchungen unschädliche Methode in der medizinischen Diagnostik. Besonders gut können u.a. Herz, Nieren, Leber und Schilddrüse mittels Ultraschallsonographie untersucht und Schwangerschaftsvorsorgeuntersuchungen durchgeführt werden. Für gashaltige oder von Knochen verdeckte Organe wie Lunge oder Gehirn ist die Ultraschallsonographie eher ungeeignet. Gewisse Organe wie der Blinddarm oder die Nebennieren können im Normalzustand kaum beobachtet, im krankhaft vergrößerten Zustand aber bestens untersucht werden.

Für diverse Materialien ist in der nachfolgenden Tabelle die Schallgeschwindigkeit  $c$  und die Dichte  $\rho$  zusammengetragen (Quelle: Universität Tübingen).

Material	$c$ in [m/s]	$\rho$ in [g/cm <sup>3</sup> ]
Muskel	1568	1.04
Fett	1470	0.97
Knochenmark	1700	0.97
Knochen (kompakt)	3600	1.7
Gehirn	1530	1.02
Wasser bei 20°C	1492	0.998
Luft bei 20°C/Normaldruck	331	0.0013

Bei Ultraschalluntersuchungen werden von einem Sender Ultraschallpulse abgestrahlt. Diese werden an diversen Grenzschichten im Körper reflektiert und schliesslich von einem Mikrofon detektiert. Die Verzögerung, mit welcher die Schallwellen beim Mikrofon ankommen, ist analog dem Echolot ein Mass dafür, wie tief die reflektierende Grenzschicht liegt. Die Signalstärke gibt hinweise auf die Materialdichte und lässt damit Rückschlüsse auf die Art des Gewebes zu.

Es gibt verschiedene Messmethoden in der Ultraschallsonographie. Die drei wichtigsten sind der *A-Mode*, der *B-Mode* und der *M-Mode* (siehe Abbildung A.18). Diese lassen sich wie folgt beschreiben:

- Der *A-Mode* stellt die an den Grenzschichten reflektierten Schallwellen als Pegeldiagramm dar. Dabei wird ein Ultraschallpuls ausgesendet, welcher an verschiedenen Grenzschichten teilweise reflektiert wird. Wenn jeweils ein reflektierter Teil der Schallwelle



vom Mikrophon aufgezeichnet wird, schreibt das Oszilloskop einen Peak. Die Abstände dieser Peaks lassen Rückschlüsse auf die Tiefe der jeweiligen Grenzflächen zu.

- Im *B-Mode* rastert ein Schallstrahl das Gewebe linienförmig ab. Die Echos werden als Lichtpunkte dargestellt, wobei ein stärkeres Echo als hellerer Lichtpunkt erscheint. Durch ein periodisch wiederholtes Abrastern können Bewegungsabläufe sichtbar gemacht werden.
- Der *M-Mode* ist eine eindimensionale Variante des B-Mode. Hierbei registriert ein ortsfester Schallkopf die Echos von bewegten Grenzflächen im Körper. Schliesslich werden diese Echos als Bildpunkte über eine Grenzwertskala dargestellt.

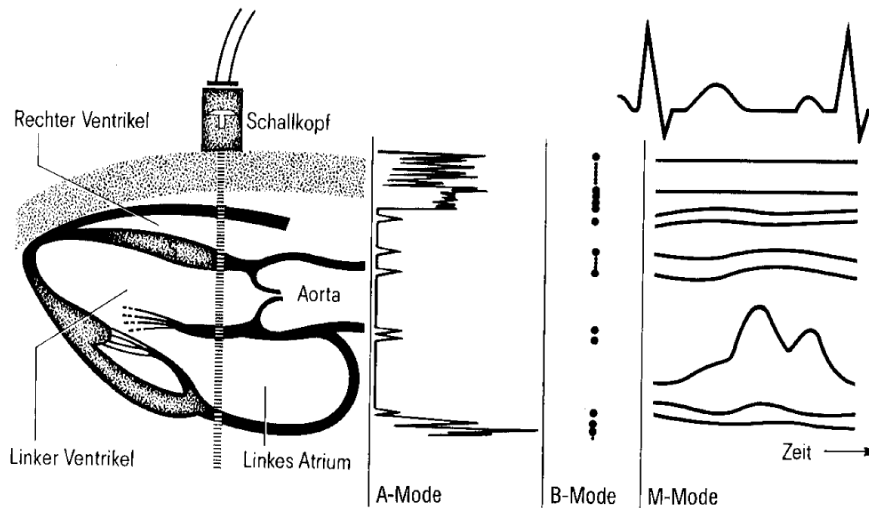


Abbildung A.18: Die verschiedenen Ultraschalluntersuchungsverfahren A-Mode, B-Mode und M-Mode in der Übersicht. Quelle: Universität Tübingen

Die in der Medizin verwendeten Ultraschallfrequenzen bewegen sich, abhängig von der untersuchten Gewebetiefe (siehe untenstehende Tabelle), im Bereich von 1MHz bis 40MHz - je grösser die Untersuchungstiefe, desto kleiner die Frequenz. Die Schallintensitäten liegen zwischen  $1\text{mW}/\text{cm}^2$  und  $10\text{mW}/\text{cm}^2$  bei einem Schalldruck von rund 0.6bar. Die Auslenkung der Moleküle beträgt dann etwa  $2 \cdot 10^{-6}\text{mm}$ , wobei Teilchen mit  $7 \cdot 10^4$ -facher Erdbeschleunigung beschleunigt werden (Quelle: Universität Tübingen). Die Zahlen sind als ungefähre Werte zu verstehen und hängen stark vom verwendeten Gerät und der jeweiligen Untersuchung ab.



Abbildung A.19: Ultraschallaufnahme eines Fötus. Quelle: Universität Bonn

Organ	Frequenz in [MHz]	Maximale Untersuchungstiefe in [cm]
Herz, Leber, Fötus	2 bis 3	25 bis 20
Niere	3.5	15
Schilddrüse	7.5	7
Prostata	8	6
Gefässe	40	0.6