



# Nachbearbeitung Schall

Unterlagen für den Unterricht nach einem Besuch des Schalllabors am PSI

# Nachbearbeitung Schall

Unterlagen für den Unterricht nach einem Besuch des Schalllabors am PSI

## Autoren

**Franz Theiler**

Professur Naturwissenschaftsdidaktik  
und ihre Disziplinen, PH FHNW

**Matthias von Arx**

Zentrum Naturwissenschafts- und  
Technikdidaktik der PH FHNW

**Martin Maire**

Teil Biologie

## Finanzierung

Departement Bildung, Kultur  
und Sport des Kantons Aargau  
Paul Scherrer Institut

Juli 2011



# Inhaltsverzeichnis

<b>4</b>	<b>1. Einleitung</b>
<b>6</b>	<b>2. Vorschläge für die Umsetzung im Unterricht</b>
7	2.1. Schallerzeugung
7	2.1.1. Einstieg
8	2.1.2. Der harmonische Oszillator
10	2.1.3. Anregen von Schwingungen
13	2.1.4. Experimente mit Stimmgabeln
15	2.1.5. Mit der eigenen Stimme
15	2.1.6. Das Federpendel
17	2.1.7. Zum Abschluss
18	2.2. Schallausbreitung – oder was unterwegs so passieren kann
18	2.2.1. Visualisierung von Längs- und Querwellen
20	2.2.2. Die Rolle des Mediums
21	2.2.3. Schwingende Luftsäulen
23	2.2.4. Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Medien
24	2.2.5. Schallwellen erlauben einen «Blick» in verborgene Welten
26	2.2.6. Was hörst du?
27	2.2.7. Schalldämmung und Schalldämpfung im Kleinen
28	2.2.8. Schallpegel
29	2.2.9. Lärm
31	2.2.10. Lärmschutz
32	2.3. Schall im biologischen Kontext
32	2.3.1 Das menschliche Ohr
33	2.3.2 Hörleistung
34	2.3.3 Echoortung der Fledermäuse
<b>36</b>	<b>3. Didaktische und methodische Hinweise</b>
36	3.1 Evidenzen sammeln
36	3.2 Arbeiten im Tischteam
38	3.3 Experimentieren im Tischteam
38	3.4 Experimente für Schulterpaare im Tischteam
38	3.5 Die Methode «GiveOne – GetOne»
39	3.6 Begriffsnetz
39	3.7 Schreiben einer Versuchsanleitung
39	3.8 Lernen an einer Station
39	3.9 Demonstrationsversuch
40	3.10 Ein Forschungsvorhaben
40	3.11 Projekte
40	3.12 Ausserschulische Lernorte

41	<b>4. Theoretische Grundlagen und Hintergrund-Informationen</b>
41	4.1. Schallerzeugung
41	4.1.1. Schwingungen als Alltagsphänomen
41	4.1.2. Physikalische Definition
44	4.1.3. Einige wichtige Begriffe
45	4.1.4. Schallerzeugung und Eigenschwingungen
49	4.1.5. Gedämpfte Schwingungen
50	4.2 Schallausbreitung – vom Schallerzeuger zum Schallempfänger
50	4.2.1 Zur Wellenlehre in einem Trägermedium
52	4.2.2 Darstellung von Wellen
53	4.2.3 Stehende Wellen
54	4.2.4 Schallwellen in der Luft
55	4.2.5 Resonanz durch Schallübertragung in Luft
56	4.2.6 Schallgeschwindigkeit
56	4.2.7 Bemerkungen zum Hören
56	4.2.8 Einteilungsmöglichkeiten für die Schallwahrnehmungen
57	4.2.9 Schalldruck und Lautstärke
59	4.2.10 Schwebung
60	4.2.11 Übergang einer Welle von einem Medium ins andere
60	4.2.12 Schallreflexion
61	4.2.13 Raumakustik
64	4.2.14 Lärmschutz
66	4.2.15 Echolot
66	4.2.16 Materialkontrollen mit Schall
66	4.2.17 Erdbebenwellen
68	4.2.18 Wellenbeugung (Diffraktion)
69	4.2.19 Brechung von Schallwellen
70	4.2.20 Interferenz von Schallwellen
71	4.2.21 Dopplereffekt
72	4.3. Schall und Biologie
72	4.3.1 Das menschliche Ohr
74	4.3.2 Richtungshören
75	4.3.3 Verstärkung im Mittelohr
75	4.3.4 Unterscheiden von Tonhöhen
76	4.3.5 Stimmbildung
77	4.3.6 Echoortung der Fledermäuse
78	<b>5. Literaturverzeichnis</b>

# 1. Einleitung

Der Begriff der Welle ist in der Physik zentral. Neben Schallwellen werden im Physikunterricht auch Wasserwellen und elektromagnetische Wellen (Lichtwellen, Radiowellen) besprochen. Die Erscheinungsformen von Wellen sind recht verschieden und doch haben sie viel Gemeinsames. Aus dem Alltag kennen Schülerinnen und Schüler Wasserwellen. Damit verbunden ist eine intuitive Vorstellung von Begriffen wie «Wellenlänge», «Frequenz» oder «Ausbreitungsgeschwindigkeit». Mehr Schwierigkeiten bereitet die Modellvorstellung von Schallwellen und elektromagnetischen Wellen. Dass Energie und Information durch den Raum übertragen wird, ohne dass dabei Materie transportiert wird, löst als reflektierte Erkenntnis Überraschung aus, trotz all der vielen Erfahrungen mit den Kommunikationstechnologien unserer Gesellschaft. Ein **Verständnis des Wellenbegriffs** und der damit verbundenen Phänomene (wie Resonanz, Reflexion) und den ihnen zugrunde liegenden Prinzipien sind also nicht nur für die Physik sondern auch für unser Weltverständnis elementar.

Ein erster Kontakt mit physikalischen Wellen und ihren wichtigsten Grundgrößen anhand von Schallwellen bietet einige Vorteile. Alle Schülerinnen und Schüler sind vertraut mit Schall. Unser Ohr kann sowohl einen Ton von einem Geräusch, als auch unterschiedliche Tonhöhen und Lautstärken unterscheiden. Es ist also möglich, im Unterricht phänomenologisch ans Thema heranzugehen und dann in weiteren Schritten Begriffe und Beziehungen sauber und verständlich herauszuarbeiten. Gelingt dies, ist eine Übertragung dieser Konzepte auf elektromagnetische oder andere Wellen später einfach möglich.

Die Auseinandersetzung mit Schallwellen im Unterricht ermöglicht also die Einführung wichtiger **Basiskonzepte, die über die eigentliche Unterrichtssequenz hinaus für die ganze Physik von Bedeutung sind**. Gelingt der Bezug zur Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler, fördert das die **Motivation**.

Das vorliegende Dossier enthält Materialien, die dazu dienen sollen, das **Thema Schallwellen nach einem Besuch im iLab des PSI im Unterricht aufzugreifen und weiter zu verfolgen**. Im Kapitel 2 sind viele Versuche, Aufgaben und Projekte für den Unterricht aufgeführt. Die Beschreibungen respektive Anleitungen richten sich in der Regel direkt an die Lernenden. Im Kapitel 3 finden sich Vorschläge zur methodischen Umsetzung und im Kapitel 4 werden die dazugehörige Theorie und weitere Hintergrundinformationen dargestellt. Diese Inhalte richten sich an die Lehrperson und sollen bei der Planung, Vorbereitung und Entwicklung des Unterrichts helfen.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten mit diesem Dossier zu Arbeiten. Der Zugang kann über Experimente, basierend auf didaktisch-methodischen Überlegungen oder aus der Theorie heraus erfolgen. Je nach Ansatz, Vorlieben und Zeit, die für eine Unterrichtseinheit oder -sequenz zur Verfügung steht, lassen sich Teile dieses Dossiers beliebig herausgreifen und im Unterricht anwenden. Aus diesem Grund weist das Dossier absichtlich einzelne Redundanzen auf.

Wenn Sie am liebsten direkt an ein Experiment des Schalllabors anknüpfen möchten, finden sie in der folgenden Tabelle eine Übersicht darüber, welche Inhalte des Dossiers zu welchen Experimenten am iLab passen (bezüglich Theorie, physikalischem Prinzip oder experimentellem Aufbau).

# Anknüpfungspunkte zu den Experimenten am iLab

Experiment im iLab	Experimente, Aufgaben, Projekte in diesem Dossier	Theorie und Hintergrundinformationen in diesem Dossier
Experiment 1	2.2.2. und 2.2.3. / 2.2.4. a) / 2.3.2. b) c)	4.2.1. / 4.2.4. / 4.2.6.
Experiment 2	2.2.4. b) / 2.2.5. b) c)	4.2.1. / 4.2.11.
Experiment 3	2.3.3.a)	4.2.12. / 4.3.6.
Experiment 4	2.2.6.b) c) / 2.2.7.c) / 2.2.10.	4.2.12.ff
Experiment 5	2.1.3.d) e) g)	4.2.20.
Experiment 6	2.2.1.c)	4.2.18.
Experiment 7	2.2.1.c)	4.2.18.
Experiment 8		4.2.18.
Experiment 9		

## 2. Vorschläge für die Umsetzung im Unterricht

### Vorangestellt A

#### Tonfrequenzgeneratorprogramme für Mac oder PC

Für viele akustische Experimente ist ein Tonfrequenzgenerator von Vorteil. Heute lassen sich solche Geräte mit Gratisprogrammen aus dem Internet simulieren.

Beispiele:

Mac: «Perfect Tone» [http://download.cnet.com/Perfect-Tone/3000-2025\\_4-52337.html](http://download.cnet.com/Perfect-Tone/3000-2025_4-52337.html)

«Audacity» auch zur Aufnahme und Analyse von Schall.

PC: «Multi Wave Frequency Generator 1.1.0»

<http://www.download32.com/multiwave-frequency-generator-i90236.html>

Hier finden sich auch weitere freie und kostenpflichtige Tongeneratoren.

«Goldwave» auch zur Aufnahme und Analyse von Schall.

#### Stroboskop

Mit einem frequenzvariablen Stroboskop (empfohlener Frequenzbereich: 60 bis 120 000 RPM, d.h. von 1 bis 2000 Hz) lassen sich periodische Schwingungen von Körpern (auch Rotationsbewegungen) und stehende Wellen in einem abgedunkelten Raum «einfrieren» und dabei ihre Frequenz bestimmen. Das Blitzlicht des Stroboskops wird dazu auf das schwingende oder rotierende Gebilde geworfen. Nun wird die Blitzabfolgegeschwindigkeit langsam erhöht oder erniedrigt, bis das beleuchtete Objekt zu stehen scheint. Die kleinste Blitzabfolgegeschwindigkeit, bei der das der Fall ist, entspricht der Frequenz des schwingenden oder rotierenden Gebildes.

#### Fotokamera

Eine Kamera mit variabler einstellbarer Öffnungszeit und rasch auslösender Mehrfachbelichtungsmöglichkeit kann bei der Beobachtung von schwingenden oder sich linear bewegenden Körpern gute Dienste leisten.

### Vorangestellt B

Die in der Folge aufgeführten Aufgaben, Experimente, Projekte, etc. weisen ein internes Raster auf. Die Rubrik «Beschreibung» richtet sich – ausser bei Demonstrationsexperimenten – an die **Lernenden** und kann bei Bedarf direkt in die Unterrichtssituation übertragen werden. Die Rubriken «Material», «Theorie», «Methode» und «besondere Hinweise» richten sich an die **Lehrperson**. Welches Material muss bereitgestellt werden? Wo findet man Theorie und Hintergrundwissen zum Versuch? Wie funktioniert die vorgeschlagene Methode? Was muss sonst noch beachtet werden? Fragen dieser Art werden durch diese Rubriken direkt oder durch Querverweise in die Kapitel 3 und 4 beantwortet.

Darüber hinaus sind jeweils mehrere Aufgaben, Experimente, Projekte, etc. unter einer Überschrift zu **kleineren Gruppen zusammengefasst**. Diese Gruppen sind zum Teil thematisch strukturiert, zum Teil besteht ein theoretischer Zusammenhang, oder es wird dabei verwandtes Material verwendet. Die Gruppierungen könnten durchaus auch anders vorgenommen werden. Wir glauben jedoch, dass die Gruppierung bei der Arbeit mit diesem Dossier und bei der Planung des Unterrichts hilfreich sein kann.

## 2.1. Schallerzeugung

### 2.1.1. Einstieg

#### a) Aufgabe: Was tönt und klingt überhaupt?

**Beschreibung:** Sammle während drei Wochen mindestens zehn möglichst unterschiedliche Beispiele von Gegenständen aus dem Alltag, die «zum Tönen oder Klingen» gebracht werden können oder «Schall» erzeugen. Beschreibe jeweils genau die Umstände von dem, was du hörst, fühlst, beobachtest und feststellst. Versuche deine Beispiele zu ordnen oder zu gruppieren. Welche der Beispiele haben etwas gemeinsam? Worin unterscheiden sie sich?

**Theorie:** Kapitel 4.1.4.

**Methode:** Evidenzen sammeln

#### b) Aufgabe: Das Klangrepertoire unserer Klasse

**Beschreibung:** Faltet je ein A4 Blatt einmal längs und dreimal quer und faltet dann das Blatt wieder auf. Ihr erhaltet so eine Tabelle mit 2 Kolonnen und 8 Zeilen.

Im Tischteam schlägt nun reihum ein Mitglied nach dem andern Schallkörper vor, die bei gegenseitigem Einverständnis von jedem Mitglied in die linke Kolonne des eigenen Blattes aufgelistet werden. Wenn die linke Kolonne voll ist oder keine Ideen mehr kommen, und die vorgegebene Zeit abgelaufen ist, steht ihr alle auf, sucht je ein Mitglied eines anderen Tischteams und bittet dieses um einen weiteren Begriff, der in die rechte Kolonne geschrieben wird. Gleichzeitig gebt ihr einen Begriff der eigenen Liste ab. Dann erfolgt der Austausch mit einer anderen Person, usw. Nach einer von der Lehrperson vorgegebenen Zeit setzt ihr euch alle wieder im eigenen Tischteam zusammen und ergänzt eure Tabellen mit den gewonnenen Begriffen.


Versucht im Anschluss folgende Frage zu beantworten: «Was ist diesen Schallerzeugern gemeinsam?» Diskutiert diese Frage im Tischteam. Der Sprecher oder die Sprecherin des Teams präsentiert dann das Ergebnis der Klasse.

**Material:** Blätter A4

**Theorie:** Kapitel 4.1.2 bis 4.1.4

**Methode:** GiveOne – GetOne und Arbeiten im Tischteam

**bes. Hinweise:** Anschlussfrage: Was ist diesen Schallerzeugern gemeinsam? → Sie vibrieren! Schall entsteht, wenn Körper in Schwingung versetzt werden.

#### c) Ein Massstabkonzert

**Beschreibung:** Drücke einen 30 cm langen Plastikflachmassstab mit einem harten Buch so auf den Tisch, dass er über die Kante herausragt und mit dem Daumen in Schwingung versetzt werden kann. Improvisiert dann im Team ein Konzert mit den Plastikmassstäben, führt es nachher vor und orientiert über Erfahrungen und Probleme beim Üben.

**Material:** Plastikflachmassstäbe

**Theorie:** Kapitel 4.1.2 bis 4.1.4.

**Methode:** Experimentieren im Tischteam



bes. Hinweise: Metallmassstäbe aus biegsamem Stahl eignen sich natürlich besser. Wenn Töne exakt reproduziert werden sollen, braucht es Tischklemmen statt Bücher.

#### d) Experiment: Tonhöhe und Frequenz

Beschreibung: Produziere mit einem Flachlineal (oder einer Blattfeder) Töne, indem du es (sie) um die Länge  $l$  über eine Tischkante hinausragen lässt und bei der Kante fest auf die Tischoberfläche drückst. Verwende dazu z.B. eine Schraubzwinge. Das über den Tisch hinausragende Stück schwingt umso rascher, je kürzer es ist. Summe oder singe die Töne, die du erzeugst. Was fällt dir auf? Identifiziere die Frequenz  $f$  der Töne mit Hilfe eines Sinusgenerators aus dem Internet oder mit einem Stroboskop (siehe 2.1. Schallerzeugung, Vorangestellt A) Vergleiche  $l$  und  $f$  mit Hilfe einer Tabelle!

Material: Flachlineal oder Blattfeder, ev. Zungenfrequenzmesser

Theorie: Kapitel 4.1.2. bis 4.1.4.

Methode: Schulterpaar

bes. Hinweise: Die Messwerte können als Schwingungszeit  $T=1/f$  versus  $l$  (am besten mit Hilfe von Excel) grafisch sinnvoll dargestellt werden.

## 2.1.2. Der harmonische Oszillator

#### a) Experiment: Gesetz von Hooke für eine Blattfeder!

Beschreibung: Legt zwei Flachmassstäbe so nebeneinander auf den Tisch, dass ihre Nullmarken ca. 15 cm über die Kante ragen. Einen davon (A) klebt ihr mit Tape auf den Tisch. Den anderen (B) drückt ihr (z.B. mit einem Buch) ganz flach auf den Tisch. Hängt mit einer Schnur ganz aussen bei seiner Nullmarke ein Buch auf. Befestigt die Schnur mit Tape, damit sie nicht vom Massstab rutscht. Misst mit dem Geodreieck, wie viel sich die Nullmarke im Vergleich mit Massstab A absenkt. Wiederholt die Messung nachdem ihr ein zusätzliches, gleiches Buch bei der Nullmarke aufhängt. Füllt dann die Tabelle aus und erstellt eine Grafik. Was stellt ihr fest? Unterschreibt das Protokoll und gebt es ab.

Anzahl Bücher (x-Achse)	0	1	2	3
Auslenkung in mm y-Achse)	0			



Material: Schnur, drei gleiche Bücher, zwei 30cm-Plastikmassstäbe, Geodreieck

Theorie: Kapitel 4.1.2.

Methode: Schulterpaar

bes. Hinweise: Die Auslenkung der Nullmarke ist proportional zur Grösse der angehängten Kraft. **Festlegung (Definition):** Ein schwingfähiger Körper, der sich unter Krafteinwirkung so verhält wie ein elastischer Massstab, schwingt «harmonisch». **Merksatz:** Fadenpendel schwingen harmonisch, wenn sie – nur wenig ausgelenkt – losgelassen werden.

## b) Experiment: Schwingungen aus unterschiedlicher Perspektive

**Beschreibung:** Teammitglied 1 stützt den Ellbogen auf den Tisch und lässt mit Daumen und Zeigefinger ein Fadenpendel mit einer Plastilinkugel über dem Tisch kreisen. Teammitglied 2 hält ein Heft so, dass Teammitglied 3 mit einer Taschenlampe von der Seite her einen Schatten der Kugel darauf werfen kann. Beobachtet die Schattenbewegung. Wiederholt den Versuch, wenn das Pendel nur parallel zum Heft pendelt ohne zu kreisen. Formuliert gemeinsam, was ihr beobachtet und unterschreibt den Text, den ihr dazu verfasst habt.

**Material:** Schnur, Heft, Taschenlampe, Plastilinkugel

**Theorie:** Kapitel 4.1.2.

**Methode:** Tischteam

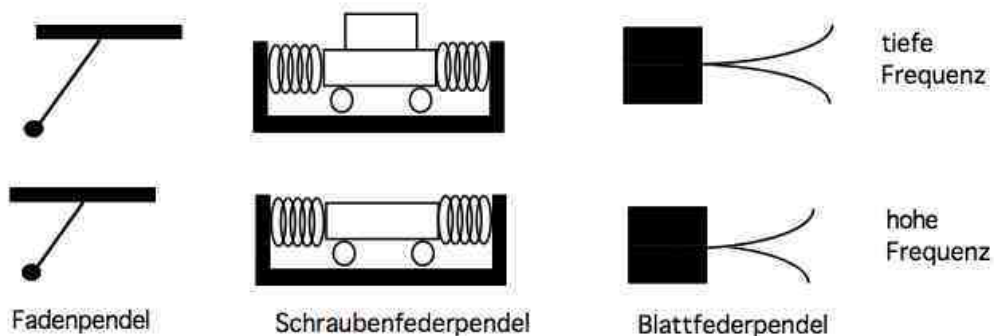
**bes. Hinweise:** **Merksatz:** Ein Körper schwingt harmonisch, wenn er so schwingt, wie der Schatten einer Kreisbewegung. Schallerzeugende Körper schwingen harmonisch. Sie heißen deshalb auch harmonische Oszillatoren.

**Bezug zur Wissenschaft und Forschung:** Schwingungen sind wichtig in fast allen physikalischen Gebieten. Der harmonische Oszillator ist eines der wichtigsten Modelle in der Physik. Mit ihm können z.B. auch Probleme aus der Quantenwelt (Atome, Moleküle) angegangen werden.

## c) Experiment: Was bestimmt die Frequenz?

**Beschreibung:** Überprüfe experimentell die folgende Tabelle. Miss dazu die Schwingungsdauer (= Periode) von Fadenpendeln unterschiedlicher Länge, Schraubenfedern mit unterschiedlich schweren Schwingkörpern oder von Blattfederpendeln mit unterschiedlicher Blattfederlänge. Zeichne je ein Diagramm, in welchem die Schwingungsdauer versus Fadenlänge, Masse des Schwingkörpers oder Blattfederlänge aufgetragen wird.

	(unteres Bild)	Periode	(oberes Bild)	Periode
Fadenpendel	Länge $l$	$T$	Länge $2l$	$2T$
Schraubenfederpendel mit Schwingkörper	Masse $m$	$T$	Masse $2m$	$2T$
Blattfederpendel der Länge $l$	Länge $l$	$T$	Länge $2l$	$4T$



**Material:** Schnur, Gewichte, Schraubenfedern, Blattfedern, Stoppuhr, etc.

**Theorie:** Kapitel 4.1.2 und 4.1.3.

**Methode:** mehrere Tischteams

**bes. Hinweise:** Eigenschwingungen und ihre verschiedenen Abhängigkeiten bieten Gelegenheit für viele Experimente auch auf Stufe Sek I. Die Frequenz oder die Schwingungsdauer kann versus einer variierenden Größe (Masse, Fadenlänge...) grafisch oder in Tabellenform dargestellt werden.

Es ist darauf zu achten, dass die Schülerinnen und Schüler nicht die Zeitspanne einer Periode messen (ungenau!), sondern z.B. 10 Perioden und dann den Messwert durch 10 dividieren (deutlich genauer!)

## 2.1.3. Anregen von Schwingungen

### a) Aufgabe: Das Klangrepertoire

**Beschreibung:** Ergänzt die früher bereits erstellte Liste von Schallkörpern, indem ihr euch überlegt, wie diese Klangkörper zum Schwingen angeregt werden. Tauscht die Informationen in der bereits bekannten Art und Weise mit anderen Tischteams aus.

**Material:** Blätter A4

**Theorie:** Kapitel 4.1.4.

**Methode:** GiveOne-GetOne

**bes. Hinweise:** Diese Aufgabe knüpft an die Aufgabe 2.1.1.b) an. Die Liste könnte Elemente enthalten, wie sie in den beiden ersten Kolonnen stehen. Ergänzend lassen sich dazu Experimente oder Recherchen (wie in der dritten Kolonne vorgeschlagen und z.T. in den vorliegenden Aufgaben aufbereitet) machen.

Schallegeber	Anregung	Mögliche Experimente oder Recherchen
Lautsprecher, Kopfhörer	Elektromagnetische Anregung	Reistanz auf Lautsprecher
Saite	Zupfen, streichen	Stroboskop, Monochord
Glocke, Schelle	Anschlagen, Schütteln, Kugeln, Klöppel	Blattfederring als Glockenmodell
Stimmgabel	anschlagen	Zunge, Wasserspritzen, Schreibgabel
Klingel	mit elektrischem Unterbrecher, durch Klöppel	einen Unterbrecher bauen und damit eine Klingel betreiben
Glas	Haften und Gleiten	klingende Gläser
Gong	anschlagen	Schallübertragung zwischen 2 Gongs
Stimmbänder	Luftstrom unterbrechen	Lochsirene
Klatschen	Luft komprimieren	Knall
Zeitung	Rascheln, reiben, knicken	Rauschen
Glasrohr	anblasen, leichtes Klopfen	singende Flamme <a href="http://de.wikipedia.org/wiki/Thermoakustik">http://de.wikipedia.org/wiki/Thermoakustik</a>
Musikinstrumente	streichen, blasen, schlagen, zupfen, ...	spielen, vergleichen
Harte Kreide auf Tafel	Haften und Gleiten auf Tafel	kratzen, quietschen
Motoren	Vibrationen	Frequenzanalyse
Reifengeräusch	Haftreibung, Luftkompression in den Pneurillen	Internetrecherche

### b) Experiment: Das gezupfte Gummiband

**Beschreibung:** Spanne ein Bürogummiband zwischen zwei Stativstangen. Erzeuge durch Anzupfen einen Ton. Was stellst du fest, wenn du jeweils vor dem Loslassen das Band verschieden stark auslenkst? Tonhöhe? Lautstärke? Amplitude? Wiederhole den Versuch mit einer anderen Spannung des Gummibandes!

**Material:** 2 Stativstangen, Bürogummibänder

**Theorie:** Kapitel 4.1.4.

**Methode:** Schulterpaar

**bes. Hinweise:** Als Erweiterung kann, wie in der Aufgabe: «Schreibe eine Versuchsanleitung» (Kap. 2.1.7.a) angeregt, die Spannkraft mit einem Newton-Meter bestimmt, die Tonhöhe mit einem Tonfrequenz-generator identifiziert werden und die Korrelation mit einer Tabelle oder grafisch dokumentiert werden.

### c) Experiment: Klangfarbe («Klangqualität»)

**Beschreibung:** Spiele mit unterschiedlichen Musikinstrumenten und mit den unterschiedlich dicken Saiten einer Gitarre immer gleich hohe und möglichst gleich laute Töne. Erstelle eine Rangliste, wie gut der jeweilige «Klang» dir gefällt. Welche speziellen Eigenschaften der Schall erzeugenden «Klangkörper» beeinflussen wohl die Klangfarbe bei gleicher Tonhöhe? Verändert sich die Klangfarbe mit der Lautstärke? Was ist schwieriger zu realisieren: a) gleiche Tonhöhe b) gleiche Lautstärke?

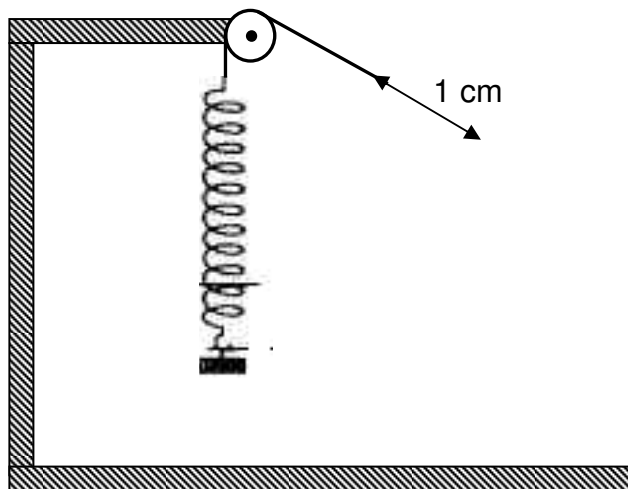
**Material:** Musikinstrumente (z. B. Gitarre), Saiten

**Theorie:** Kapitel 4.1.4. und 4.2.8.

**Methode:** Tischteam

### d) Experiment: Immer ein wenig kann auch zu viel sein - die Resonanzkatastrophe.

**Beschreibung:** Hänge ein Schraubenfederpendel an einer Schnur über eine Rolle (oder dünne Achse), fasse das Schnurende mit Daumen und Zeigfinger und ziehe bei aufgestütztem Ellbogen mit periodischen «hin und her»-Bewegungen (max. 1 cm) so an der Schnur, dass der Pendelkörper in Schwingung versetzt wird. Arbeite zuerst mit einer sehr raschen Frequenz, dann mit einer sehr kleinen. Beobachte die Amplitude der Schwingung. Anschliessend versuchst du die Resonanzfrequenz des Schraubenfederpendels zu finden. Erläutere den Begriff «Resonanzkatastrophe»!



**Material:** Aufhängung, Feder, Gewicht, Schnur

**Theorie:** Kapitel 4.1.4.

**Methode:** Schulterpaar

**bes. Hinweise:** Die Begriffe Frequenz und Amplitude sollten für dieses Experiment bekannt sein. Der Begriff Resonanz lässt sich anhand des Experimentes im wahrsten Sinne des Wortes begreifen. Eine Amplituden-Frequenz-Kurve lässt sich mit einem exzentrisch auf den Bohrer einer Drehfrequenz-regulierbaren Bohrmaschine aufgesteckten Korkzapfen aufnehmen. Um Transversalschwingungen zu vermeiden, kann die Feder wie bei einem N-Meter in ein Rohr gesteckt werden.

### e) Recherche: Resonanzkatastrophe und Tilgerpendel im Internet

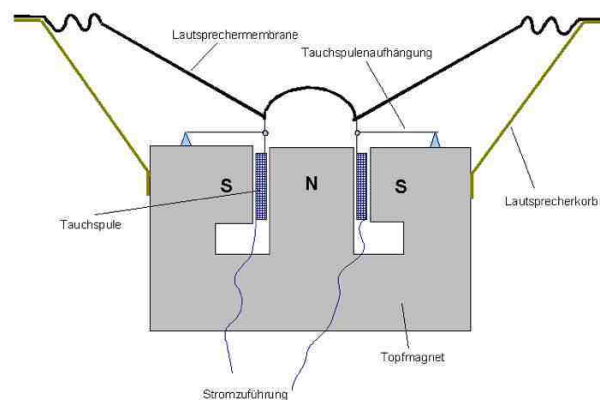
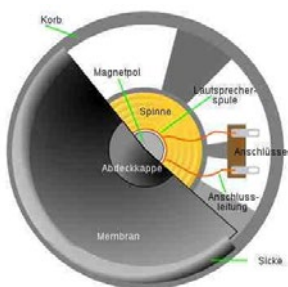
- Beschreibung: a) Suche im Internet nach historisch belegten Resonanzkatastrophen.  
b) Was ist ein Tilgerpendel? Wozu dient es? Wo kommt es zum Einsatz?
- Material: Internetzugang
- Theorie: Kapitel 4.1.4.
- Methode: Einzel- oder Gruppenauftrag
- bes. Hinweise: a) → Tacoma Narrows Bridge b) → Wolkenkratzer

### f) Experiment: Tanz auf dem Lautsprecher

- Beschreibung: Die Schwingungen einer Lautsprechermembran können mit auf die Membran gestreutem Reis, Maisgriess oder (hier im Bild) mit Reisszwecken sichtbar gemacht werden. Wird der Lautsprecher mit einem Tonfrequenzgenerator angesteuert, entstehen frequenzabhängige «Tanzmuster».
- Material: Lautsprecher, Frequenzgenerator, Reiskörner
- Theorie: Kapitel 4.1.4.
- Methode: Demonstrationsversuch
- bes. Hinweise: Im iLab wird Schall (17000 Hz) mit Piezokristallen erregt. Schall kann auch mit dynamischen Lautsprechern erzeugt werden. Ein Lautsprecher wandelt niederfrequente elektrische Signale in Schall um. Dazu wird eine Spule beweglich über einen Magnetpol gelegt. An ihr wird eine Membran (meistens ein trichterförmiger, konzentrisch zulaufender dünner Karton oder ein weiches Polymer mit ringförmigem Wulst am äusseren Rand und nach aussen gewölbtem Zentrum) befestigt. Der Rand der Membran wird an der Lautsprecherbox befestigt. Die elektrischen Wechselstromsignale aus dem Verstärker bewegen die «Tauchspule» mit der «Musikfrequenz» (hier im Bild) auf und ab. Dadurch wird die Membran in Schwingungen versetzt.

Grosse Lautstärke verstärkt das «Hüpfen». Die Membran sollte möglichst bei jeder Frequenz so in Schwingung versetzt werden können, dass nicht einzelne Töne bevorzugt oder benachteiligt werden. Auch sollten keine Teilschwingungen (Schwingungsmuster) entstehen. Der abgestrahlte Schall ist hauptsächlich von der Membranschnelle abhängig, der Schnelligkeit, mit der die Membran (oder Teile davon) schwingen und Luftdruckschwankungen hervorrufen.

Quelle: wikipedia, Suchbegriffe Lautsprecher, Schema, Front  
Suchbegriffe: wikipedia Datei dynamischer Lautsprecher

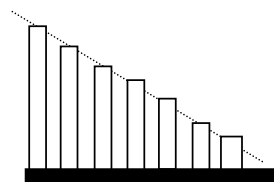
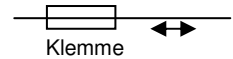


Lautsprecher mit Tauchspule (Prinzip)



### g) Projekt: Bau dir dein eigenes Frequenzmessgerät

Beschreibung: Baue (z.B. im Werkunterricht) einen Zungenfrequenzmesser mit dünnen Blattfedern («Zungen») aus elastischem Metall oder Kunststoff unterschiedlicher Länge. Er dient zur Frequenzanalyse. Bestimme damit die Hauptfrequenzen eines «röhrenden» Mofamotors, indem du die Resonanzschwingungen der Blattfedern beobachtest. Vor dem Bau machst du Vorversuche mit einer Blattfeder, deren Länge  $l$  du variieren kannst, indem du sie z.B. auf einer Seite in eine Halterung klemmst und diese auf eine schwingende Stelle des Mofas drückst. Verändere  $l$ , bis die Feder zu schwingen beginnt (Resonanz). Miss ihre Länge  $l$ . Suche durch Veränderung von  $l$  weitere Resonanzen. Bei einer so eingespannten Blattfeder ist ihre Periode  $T=1/f$  proportional zum Quadrat der Blattfederlänge  $l$ . Wird z.B. die Länge einer Blattfeder, die mit 220 Hz schwingt verdoppelt, schwingt sie nur noch mit einem Viertel, also mit 55 Hz. Verwende zur Eichung den Vergleichston eines Tonfrequenzgenerators.



Frequenz:  $f_1$   $f_2$   $f_3$   $f_4$   $f_5$   $f_6$   $f_7$

Material: Blattfedern, Stimmgabel 220 Hz, div. Materialien und Werkzeuge aus dem Werkraum.

Theorie: Kapitel 4.1.3. und 4.1.4.

Methode: Projekt (Erfinden, Entwickeln)

Bes. Hinweise: Statt den gewünschten Frequenzbereich mit verschiedenen langen Blattfedern abzudecken, kann eine Vorrichtung erfunden und entwickelt werden, mit der die Länge einer einzelnen auf einer Seite eingeklemmten Feder rasch variiert und bei Resonanz abgelesen werden kann.

## 2.1.4. Experimente mit Stimmgabeln

### a) Experiment: Basisexperimente mit einer Stimmgabel

Beschreibung: Physikalisch gesehen ist die Stimmgabel ein Biegeschwinger. Die Zinken schwingen beim Anschlagen gegensinnig. Sobald sich die Zinken nach außen bewegen, wird die Luft vor ihnen verdichtet, während sie zwischen ihnen verdünnt wird. Beim Zurückschwingen kehrt sich die Dichteverteilung um. Die sich wellenförmig ausbreitenden Druckunterschiede nehmen wir als Schall wahr.

- Halte den Stimmgabelkopf an die Zunge. **Die Zähne nicht berühren!** Halte den Stimmgabelkopf auf den Schädelknochen oder auf den Ellbogen! Wenn du jemanden bittest, die Stimmgabel an diese Körperteile zu halten, kannst du dir dabei die Ohren zu halten. Was stellst du fest?
- Berühre mit der Stimmgabelzinke eine Wasseroberfläche. Beschreibe, was du beobachtest und erkläre! Lassen sich ausser dem Aufspritzen des Wassers auch feine Wellen beobachten?
- Schallabstrahlung: Drehe eine zum Tönen gebrachte aufrecht gehaltene Stimmgabel langsam vor deinem Gesicht. Was stellst du fest? Erkläre!

Material: Stimmgabeln, Wasserbecken

Theorie: Kapitel 4.1.4.

Methode: Schulterpaare

## b) Experiment: Schreibstimmgabel

**Beschreibung:** Stülpe ein ca. 5mm langes Schlauchstück ganz satt über die Zinke einer Stimmgabel und klemme ein Stück Blumendraht darunter. Eines der Drahtenden bleibt frei und dient als «Schreibnadel». Schlage nun die Stimmgabel per Hand an und ziehe sie mit **großem** Tempo  $v$  über eine mit Plakatfarbe eingefärbte oder berusste Glasplatte. Aus der sinusförmigen (eine Folge von Buckeln und Tälern) Schreibspur und aus  $v$  (abschätzen) kann auf die Stimmgabelfrequenz geschlossen werden, denn die Frequenz der Stimmgabel multipliziert mit dem (in der Einheit m) gemessenen Abstand zwischen zwei Buckeln des Wellenzuges (das ist die Wellenlänge) ergibt das Tempo  $v$  der bewegten Stimmgabel in der Einheit m/s. Schätze die Geschwindigkeit  $v$  und ermittle aus der Schreibspur die Wellenlänge (in m) und berechne daraus wie oben beschrieben die Frequenz der Stimmgabel.

**Material:** Stimmgabeln, Blumendraht, Glasplatte, Plakatfarbe oder Russ einer Kerzenflamme.

**Theorie:** Kapitel 4.1.2. und 4.1.4.

**Methode:** Tischteam

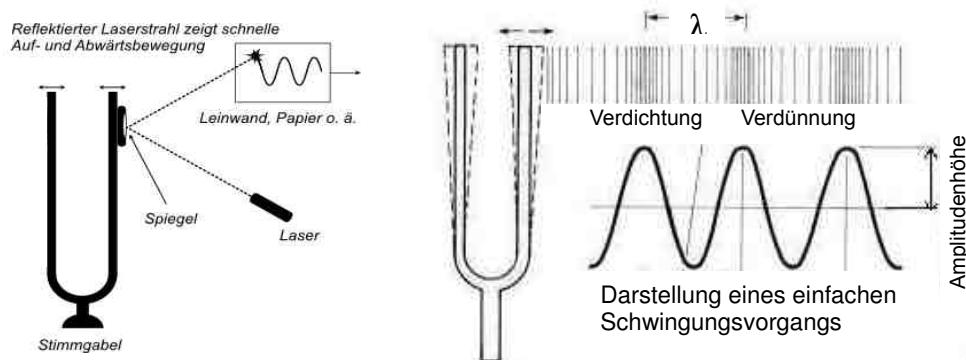
**bes. Hinweise:** Die Frequenz  $f$  (Anzahl der Schwingungen pro Sekunde) berechnet sich gemäss  $f = v/\lambda$  ( $\lambda$  = Wellenlänge). Der Draht kann mit einem Schrumpfschlauch über der Zinke festgeklemmt werden.  $v$  kann mit einer Fotokamera mit bekannter Blendenöffnungszeit bestimmt werden.

## c) Experiment: Wir machen die Bewegung der Stimmgabel sichtbar

**Beschreibung:** Durch Drehen einer Stimmgabel (z.B. auf einer Töpferscheibe oder von Hand in einem mit einem Reagenzglashalter fixierten Glasröhrchen; entscheidend ist, dass die Längsachse dabei möglichst starr bleibt) können mit einem Laser über eine auf eine Stimmgabelzinke geklebte Spiegelscherbe Sinuskurvenzüge erzeugt werden.

<https://lp.uni-goettingen.de/get/image/100>

<http://www.math.uni-bielefeld.de/birep>



**Material:** Stimmgabel, Spiegelscherbe, Klebmasse, Laser, Töpferscheibe oder Reagenzglashalter.

**Theorie:** Kapitel 4.1.2 bis 4.1.4.

**Methode:** Demonstrationsversuch

**bes. Hinweise:** Die Stimmgabel lässt sich unter Umständen auf eine Drehzahl-regulierte Bohrmaschine stecken.

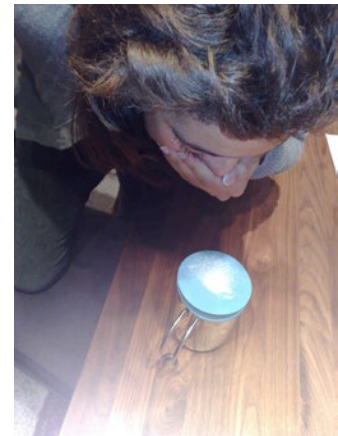
## 2.1.5. Mit der eigenen Stimme

### a) Experiment: Wer singt am «schönsten»?

**Beschreibung:** Versuche, Klangfiguren mit deiner Stimme zu erzeugen!

Spanne eine halbierte Ballonhülle über ein Gefäss mit einer grossen Öffnung. Streue Tafelsalz oder Maisgriess darauf. Dass die Körnchen nicht über den Rand fallen, kannst du mit einem am Rande befestigten Papierstreifen verhindern. Bringe die Körner zum Tanzen, indem du mit der Hand vor dem Mund verschiedene hohe Töne erzeugst. Kannst du Muster erzeugen?

**Erweiterung:** Halte ein Tamburin über einen kleinen mit einem Tonfrequenzgenerator verbundenen Lautsprecher, streue etwas Maisgriess darauf und verändere die Tonhöhe. Skizziere oder fotografiere die Muster und ordne jedem eine Frequenz zu!



**Material:** Luftballons, hohe Tasse oder hohes Glasgefäss, Tafelsalz oder Maisgriess, Papierstreifen, evtl. Sinusgenerator, evtl. Lautsprecher (Computer)

**Theorie:** Kapitel 4.1.4. und 4.3.5.

**Methode:** Tischteam

**bes. Hinweise:** Tonfrequenzgenerator: siehe 2.1. Schallerzeugung, Vorangestellt A.

Solche Klangmuster können mathematisch berechnet werden. Sie hängen von der Tonhöhe und der Geometrie der Fläche ab. Da wo in einem Klangmuster die Salzkörner hüpfen bewegen sich Teile der Ballonhülle («Bäuche»), da wo sie ruhen («Knoten», «Knotenlinien») bewegen sich auch die Stoffteilchen des Ballons nicht. Die Folie kann auch auf eine beidseitig geöffnete Blechbüchse gespannt werden. Mit einem gebogenen Schlauch kann durch einen Trichter Schall von unten auf die Folie geleitet werden.

## 2.1.6. Das Federpendel

### a) Experiment: Bestimmung der Federhärte

**Beschreibung:** Die Federkonstante oder Federhärte  $D$  gibt an, wie viel Kraft es braucht, um eine Feder einen Meter zu verlängern. Sie lässt sich aus dem Quotienten der die Feder verlängernden oder stauenden Kraft  $F$  und der daraus resultierenden Verlängerung  $x$  bestimmen (Hook'sches Gesetz:  $D = F/x$ ).

a) Bestimme auf diese Weise die Federkonstante einer Schraubenfeder.

b) Gibt es einen Zusammenhang zwischen Federhärte  $D$  und ihrer Schwingungsfrequenz  $f$ ? Vergleiche  $f$  für drei Federn unterschiedlicher Härte  $D_1$ ,  $D_2$  und  $D_3$ .

**Material:** Aufhängung, unterschiedliche Schraubenfedern, diverse Gewichte bekannter Masse, Massstab.

**Theorie:** Kapitel 4.1.2.

**Methode:** Schulterpaar

**bes. Hinweise:** Der Zusammenhang von Frequenz und Schwingungsdauer, respektive Amplitude und Frequenz lässt sich gut untersuchen an einem Schraubenfederpendel mit der Federkonstanten  $D$ , das vertikal aufgehängt und mit einem Körper der Masse  $m$  belastet wird. Solche Pendel schwingen harmonisch, da sie dem Gesetz von Hooke gehorchen. Als  $m$  eignet sich auch Knet, dessen Masse gewogen wird.



## b) Experiment: Messgenauigkeit

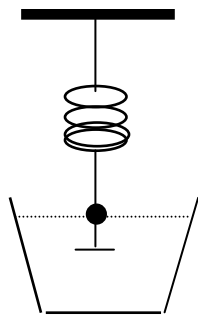
- Beschreibung: a) Miss zuerst drei Mal die Schwingungsdauer (=Periode)  $T_m$  für eine einzige Schwingung eines Schraubenpendels mit der Stoppuhr. Berechne den Mittelwert  $T$  und die grösste Abweichung  $\Delta t$  der Einzelmessungen. Schreibe das Resultat in der Form  $T = T_m \pm \Delta t$ .  
 $\Delta t$  heisst absoluter Fehler. Berechne auch den relativen Fehler  $(\Delta t/T) \cdot 100\%$
- b) Bestimme die Schwingungsdauer  $T$ , indem du dreimal die Zeit für 10 Schwingungen bestimmst. Mache erneut eine Fehlerrechnung. Was fällt dir auf im Vergleich zu a)?
- Material: Aufhängung, Schraubenfeder, Gewicht, Stoppuhr  
Theorie: Kapitel 4.1.2. und 4.1.3.  
Methode: Schulterpaar  
bes. Hinweise: Anhand des Federpendels kann das sehr wichtige Thema «Messfehler» gut angegangen werden.

## c) Experiment: Schwingungsdauer eines Federpendels

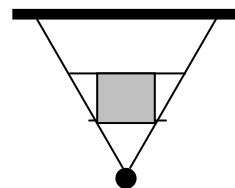
- Beschreibung: Verändere die Masse eines an einer Schraubenfeder schwingenden Körpers, indem du mehr und mehr Plastilin anklebst. Bestimme jeweils die Masse  $m$  des schwingenden Körpers. Zeichne in einem Koordinatensystem  $m$  versus Schwingungsdauer  $T$  auf. Was stellst du fest?
- Material: Aufhängung, Schraubenfeder, Gewicht, Plastilin, Stoppuhr  
Theorie: Kapitel 4.1.2. und 4.1.3.  
Methode: Schulterpaar  
bes. Hinweise: keine

## d) Experiment: Nichts währt ewig – gedämpfte Schwingungen

- Beschreibung: a) Tauche den an der Schraubenfeder schwingenden Körper in ein Gefäss mit Wasser. Miss wie lange es dauert, bis die Amplitude der Schwingung nur noch halb, nur noch ein Viertel, ein Achtel ... so gross ist wie beim Start. Erstelle dazu eine Grafik.
- b) Wiederhole den Versuch mit einem gedämpften Fadenpendel.



Das Schraubenfederpendel wird durch Eintauchen in Wasser gedämpft.



Ein an zwei Fäden (bifilar) aufgehängtes Pendel von vorne gesehen. Zwischen den Fäden ist ein Stück Papier gespannt. Je nach Grösse kann die Dämpfung (durch Luftwiderstand) reguliert werden. Hinweis: Fadenpendel werden bifilar (d.h. an zwei Fäden) aufgehängt, wenn sie in einer Ebene schwingen sollen. Erschwert werden kann dadurch die Messung der Pendellänge.

- Material: Federpendel, Gewicht, Aufhängung, Massstab, Wasserbecken, 2 Schnüre, Papier  
Theorie: Kapitel 4.1.5.  
Methode: Schulterpaar  
bes. Hinweise: Die Frequenz ist unabhängig von der Amplitude (gilt nur für harmonische Schwingungen).

## 2.1.7. Zum Abschluss

### a) Aufgabe: Schreibe eine Versuchsanleitung

Beschreibung: a) Entwickle ein ähnliches Experiment wie im Experiment «Nichts währt ewig» mit dem du das Schwingungsverhalten eines verschieden stark gespannten Gummibandes untersuchen kannst. Ziel ist es, einen Zusammenhang zu finden zwischen Spannkraft und Tonhöhe der Schwingung. Zur Bestimmung der Tonhöhe über das Gehör verwendest du einen Tonfrequenz-generator.

Erstelle eine genaue Versuchsanleitung mit Skizzen und Fotos.

b) Entwickle eine ähnliche Beobachtungsaufgabe wie im Experiment «Tonhöhe und Frequenz» mit einem eingespannten Flachlineal (einer Blattfeder). Führe den Versuch aus und beschreibe ihn verständlich!

Theorie: Kapitel 4.1.2. bis 4.1.5.

Methode: Schreiben einer Versuchsanleitung

bes. Hinweise: Die 2 Aufgaben beziehen sich auf die Experimente 2.1.6.d) und 2.1.1.d)

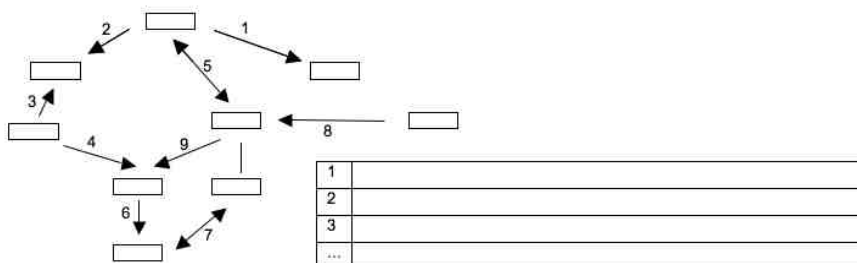
### b) Aufgabe: Begriffsnetz

Beschreibung: Erstelle ein Begriffsnetz mit folgenden Kärtchen, die du ausschneidest und auf einem A4-Papier möglichst sinnvoll verteilst, anordnest und mit Pfeilen deiner Wahl verbindest. Du darfst einen Begriff selber hinzufügen und ein Kärtchen weglassen. Nummeriere alle Verbindungspfeile, die dir wichtig erscheinen und schreibe in einer Tabelle zu jeder Nummer maximal zwei Sätze.

Tonhöhe	Lautstärke	Schwingungszeit	Schwingungsamplitude	Blattfederlänge
Klangfarbe	Saitenspannung	Tonfrequenz	Saitendicke	

(Kärtchen ausschneiden)

Nach 30 Minuten suchst du dir einen Partner oder eine Partnerin, mit der du vergleichst. Bei Texten, die ihr beide als richtig erachtet, setzt ihr ein Kreuz, bei den anderen ein Fragezeichen. Kehre zurück ins Tischteam und diskutiert dort die Sätze mit den Fragezeichen.



Material: Papier, Schreibzeug, Schere

Theorie: Kapitel 4.1.

Methode: Begriffsnetz / Einzelarbeit / Tischteam

## 2.2. Schallausbreitung – oder was unterwegs so passieren kann

### 2.2.1. Visualisierung von Längs- und Querwellen

#### a) Experiment: La Ola im Schulzimmer

**Beschreibung:** Die «Stadionwelle» ist ein schönes Beispiel, um das Fortpflanzungsprinzip einer Welle zu veranschaulichen. Alle stellen sich auf einer Kreislinie oder Halbkreislinie auf, den linken Arm ausgestreckt. Die Person am Anfang hebt den Arm und senkt ihn wieder. Die Person daneben führt dann sofort die gleiche Bewegung aus. Jeder Schüler/jede Schülerin führt der Reihe nach die gleiche Bewegung aus. Nachher haben alle ihren Arm wieder ausgestreckt. Wenn diese Grundübung «sitzt» lassen sich weitere Übungen zum Thema Wellen inszenieren.

**Theorie:** Kapitel 4.2.1.

**Methode:** Klassenversuch

**bes. Hinweise:** Mit einer «Bewegungswelle» kann auch gezeigt werden, wie sich eine Welle in alle Richtungen ausbreitet und dass Information ohne Materietransport übertragen wird (ohne dass die Beteiligten Plätze tauschen oder sich in der Ausbreitungsrichtung der Welle verschieben müssen). Je nach «Choreographie» kann man kleine und grosse Amplituden veranschaulichen. Wenn die Schülerinnen und Schüler eine geschlossene Kette bilden kann auch der Begriff der Periode resp. der Frequenz veranschaulicht werden

#### b) Experiment: Wellenmaschine

**Beschreibung:** Falls eine Wellenmaschine vorhanden ist, kann man damit sehr schön zeigen, dass eine Anregung an einer Stelle ausreicht, um eine Welle auszulösen. Aufgrund der Kopplung der einzelnen Teilchen (veranschaulicht die Kräfte zwischen den Materieteilchen) pflanzt sich die Welle dann durchs Medium fort. Man kann auch sehr schön das Phänomen der Reflexion einer Welle demonstrieren. Die Wellenmaschine eignet sich vor allem zur Veranschaulichung von Querwellen.

**Material:** Wellenmaschine

**Theorie:** Kapitel 4.2.1. und 4.2.2.

**Methode:** Demonstrationsversuch

**bes. Hinweise:** Kann auch zur Veranschaulichung der Reflexion eingesetzt werden.

#### c) Experiment: Wasserwelle im Teich

**Beschreibung:** Wird die Oberfläche eines ruhigen Gewässers durch einen Steinwurf gestört, wird ein Wasserwellenzug erzeugt, der sich konzentrisch von der Eintauchstelle des Steins weg bewegt.

Lege vor dem Steinwurf ein Kork- oder Styroporkügelchen auf die Wasseroberfläche, und beobachte, wie sich dieses beim Durchgang der Welle auf und ab bewegt. Es wird nicht mit der Welle fortgetragen! Das heisst, in einer Wasserwelle wird in der Ausbreitungsrichtung nicht Materie transportiert, sondern nur Energie. Die Welle äussert sich lediglich in einer Auf-/Abbewegung der Wasserteilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (Querwelle). Je nach örtlichen Begebenheiten kannst du auch Reflexionen der Welle am Ufer sehen. Vielleicht kannst du sogar beobachten, dass Wasserwellen über Untiefen langsamer laufen als über tiefem Wasser. Sehr schön kannst du

das im Kinderbad eines Hallenbades beobachten, wenn dieses unterschiedlich tiefe Zonen hat. Beschreibe deine Beobachtungen genau und fertige zur Veranschaulichung einige Skizzen an.

- Material:** Teich, grosses Wasserbecken oder Hallenbad am frühen Morgen, Steine, (mehrere) Kork- oder Styroporkügelchen
- Theorie:** Kapitel 4.2.1.
- Methode:** Demonstrationsversuch oder Beobachtungsaufgabe
- bes. Hinweise:** Genau genommen bewegt sich ein Korkstück auf einer Wasserwelle nicht nur auf und ab, sondern beschreibt eine kreisförmige Linie.

#### d) Experiment: Die Federschlange

**Beschreibung:** Bei einer Firma, die Schraubenfedern produziert, eine Schraubenfeder von 3 m Länge mit der Federkonstante 1 N/m (d.h. die vertikal aufgehängte Feder wird um einen Meter länger, wenn ein Körper der Masse 100 g angehängt wird) kaufen!

Die Feder wird auf hintereinander gestellte Tischflächen gelegt, die Lehrperson (LP) hält sie an einem, eine assistierende Person (A) am anderen Ende. Die Klasse sitzt verteilt auf beiden Tischseiten.

##### a) Longitudinalversuche

A hält ihr Ende am gleichen Ort fest. LP zupft die Feder mit der freien Hand in Längsrichtung: Tempo des Laufs der Störung bestimmen, Spannung verändern. Reflexion beobachten. Was bewegt sich? Dämpfung diskutieren.

LP erzeugt durch rasche hin-her-Bewegung eine Longitudinalwelle, eventuell sogar eine stehende Welle.

A und LP lassen gleichzeitig eine Störung laufen: Durchdringung ohne gegenseitige Beeinflussung.

##### b) Transversalversuche

A hält Ende fest, LP lenkt ein Federstück mit der freien Hand rechtwinklig-seitlich aus und lässt die Störung laufen. Zuerst analog wie bei a) verfahren.

Dann erzeugen der Grundschiwingung durch Schaukeln der Feder wie beim Seilspringen. LP erhöht die Anregungsfrequenz (horizontale Schwingung) bis sich die erste, zweite ... Oberschiwingung ausbildet.

A befestigt eine 50 cm lange Schur an seinem Ende und hält die Feder daran. Auf welcher Seite wird der Buckel einer Störung reflektiert bei losem Ende (mit Schnur), beim festgehaltenen Ende? Wie sieht eine Oberschiwingung mit losem Ende aus?

LP schwingt die Feder horizontal hin und her. Zwei auf die Ellenbogen gestützte Unterarme auf beiden Seiten der Feder simulieren ein enges Tor. Vertikale Schwingungen laufen durch, horizontale nicht mehr (Polarisationsfilter).

LP schwingt sein Ende im Kreis und erzeugt dadurch eine Zircumpolarwelle. Was bewirkt das Polarisationsfilter?

**Material:** spezielle Schraubenfeder, mehrere Tische

**Theorie:** Kapitel 4.2.1. und 4.2.2.

**Methode:** Demonstrationsversuch

**bes. Hinweise:** Das Experiment kann auch mit dem «Slinki» oder sonst einer sehr weichen Feder durchgeführt werden. Eine sehr lange Feder (mehrere Meter) ist natürlich ideal.

### e) Experiment: gekoppelte Pendel

**Beschreibung:** Zur modellhaften Veranschaulichung von Längswellen eignet sich eine Serie von gekoppelten Pendeln. Eine Serie von gleich schweren Plastilinkugeln kann an gleich langen Schnüren an einer horizontalen Stange aufgehängt werden. Die Schnüre werden im unteren Teil durch lockere Fäden mit ganz wenig Plastilin in ihrer Mitte («Kopplungskonstante») miteinander gekoppelt. Wird nun die erste Kugel in Richtung der andern Kugeln ausgelenkt und in Schwingung versetzt, pflanzt sich diese Schwingung durch die Federn fort und es entsteht eine Längswelle, die alle Kugeln erfasst. Die so entstehenden «Dichtewellen» können beobachtet werden. Es kann auch untersucht werden, ob durch Veränderung der Massen von Kugeln oder «Kopplungskonstanten» unterschiedliche Frequenzen und Ausbreitungsgeschwindigkeiten erzielt werden können.

**Material:** Aufhängung, dünne Schnüre zum Aufhängen der Pendelkörper, Faden zur Koppelung, Plastilin

**Theorie:** Kapitel 4.2.2.

**Methode:** Demonstrationsversuch oder Projekt

**bes. Hinweise:** Die Anordnung kann statt mit Kopplungsfäden – allerdings bei mehr Aufwand – mit Pendelkugeln (mit seitlichen Haken oder Ösen) und Kopplungsfedern dazwischen gebaut werden. Wenn Transversalschwingungen unerwünscht sind, können die Pendelkörper bifilar (vgl. Kap. 2.1.6 d) an zwei parallelen Stangen aufgehängt werden.

## 2.2.2. Die Rolle des Mediums

### a) Experiment: Luft ist mehr als «nichts»

**Beschreibung:** Mit zwei gleichen Stimmgabeln kann die Übertragung des Schalls durch die Luft indirekt nachgewiesen werden. Person A hält eine Stimmgabel an ihr Ohr und konzentriert sich darauf. Person B bringt in der Nähe eine gleiche Stimmgabel zum Tönen, dämpft sie dann aber sofort wieder mit der Hand bis sie nicht mehr schwingt. Schreibt auf, was ihr feststellt und erklärt!

**Zusatzexperiment:** Wickelt bei einer der Stimmgabeln etwas Blumendraht um eine ihrer Zinken. Wiederholt nun den Versuch. Was ist anders? Warum?

**Material:** 2 gleiche Stimmgabeln

**Theorie:** Kapitel 4.2.4.

**Methode:** Schulterpaare

**bes. Hinweise:** Dieses Experiment wird am besten in einem separaten, ruhigen Raum ausgeführt. Das Experiment gelingt natürlich nur, wenn die beiden Stimmgabeln aufeinander abgestimmt, also in Resonanz sind. Im Zusatzexperiment kann – anstatt eine der Gabeln zu verstimmen – eine solche mit einer anderen Frequenz genommen werden. Das Experiment gelingt auch, wenn die Person B durch einen Lautsprecher an einem Tonfrequenzgenerator mit kräftiger Verstärkung ersetzt wird (Tonhöhe ändern bis zur Resonanz).

### b) Experiment: ohne Luft kein Ton

**Beschreibung:** Halte die Wahrnehmung der Lautstärke des Alarms eines Weckers in unterschiedlichen Situationen fest. Löse dazu den Alarm des (zeitprogrammierten) Weckers zuerst auf einem Tisch im Schulzimmer, dann in einem nicht evakuierten und zuletzt in einem durch eine Wasserstrahlpumpe evakuierten Exsiccator (Rezipienten) aus. Was fällt auf? Wie lässt sich dieses Verhalten erklären?

Material: Wasserstrahlpumpe, Schlauch, Exsiccator, kleiner Taschenwecker.  
Theorie: Kapitel 4.2.4.  
Methode: Tischteam oder Posten für Lernen an Stationen  
bes. Hinweise: Die Lautstärke des Alarms wird jedes mal geringer. Mit einer Wasserstrahlpumpe erreicht man einen Druck von ca. 25 mbar, was ausreicht um einen deutlichen Effekt zu erzielen.

## 2.2.3. Schwingende Luftsäulen

### a) Experiment: Wir machen die Schwingungen der Luft sichtbar

Beschreibung: In eine Glasröhre (ca. 5 cm Durchmesser und 50 bis 100 cm Länge) gibst du mit Hilfe einer dünnen Leiste feinen Korkstaub (oder Lycopodium) und verteilst ihn über die ganze Rohrlänge. Vorsichtiges, leichtes Schütteln oder Kippen hilft bei der gleichmässigen Verteilung. Sobald dies erreicht ist, positionierst du am einen Ende des Glasrohrs den Lautsprecher direkt vor die Öffnung. Mit Hilfe des Frequenzgenerators kannst du jetzt einen Ton in die Röhre schicken, der am anderen (offenen) Ende reflektiert wird. Erhöhe nun langsam die Frequenz (evtl. auch die Lautstärke) und beobachte dabei das Pulver in der Röhre. Notiere dir den Abstand (mit dem Lineal messen!) zwischen den Bäuchen, wenn ein Muster aus Knoten und Bäuchen zu beobachten ist. Versuche möglichst viele Frequenzen zu finden, bei welchen ein Muster im Pulver auftritt und notiere dir jeweils die Abstände. Was fällt auf?.

Material: Glasrohr, Korkstaub oder Lycopodium (=Bärlappsporen), Frequenzgenerator, Lautsprecher, Massstab.

Theorie: Kapitel 4.2.3. und 4.2.4.

Methode: Posten für Lernen an einer Station.

bes. Hinweise: Das Kundt'sche Rohr ist eine weit verbreitete Versuchsanordnung, um Schallwellen (respektive die dazugehörigen örtlichen Druckschwankungen von stehenden Schallwellen) sichtbar zu machen. Bei gewissen Frequenzen (abhängig von der Rohrlänge) bildet sich eine stehende Welle. In den Wellenbäuchen wird dadurch der feine Korkstaub aufgewirbelt, was die stehende Welle sichtbar macht. Aus dem Produkt des doppelten Abstandes zwischen zwei Knoten oder Bäuchen (Wellenlänge) und der Frequenz kann die Schallgeschwindigkeit berechnet werden. Das Experiment gelingt nur, wenn das Rohr entfettet und ganz trocken ist (Föhn). Die zusätzlich beobachtbaren feinen Rippen im Pulvermuster entstehen auf Grund von feinen Luftwirbeln an der Rohrwand.

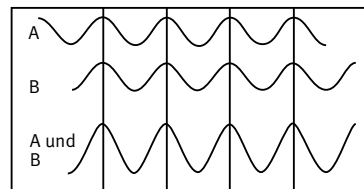
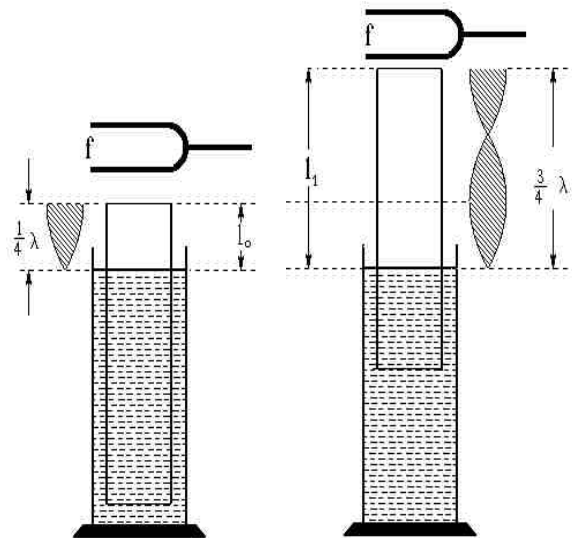
Vorsicht: Einige Personen reagieren allergisch auf Lycopodium (Heuschnupfensymptome)!

### b) Experiment: Die singende Röhre: Luft in einem Rohr zum Schwingen anregen!

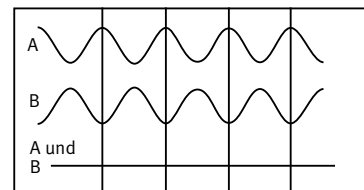
Beschreibung: Tauche ein auf beiden Seiten offenes Rohr (50 cm) ganz in ein hohes mit Wasser gefülltes Gefäss (z.B. Messzylinder). Halte dabei eine tönende Stimmgabel oder einen Lautsprecher (Tonfrequenz mindestens 1000 Hz) über die Rohröffnung. Merke dir die aus dem Wasser ragende Rohrlänge, bei welcher der Schall stärker wird (verschiebe dazu das offene Rohr nach oben und unten, bis du eine Position gefunden hast, in welcher der Schall besonders stark ist). Lies den Text im Kasten und studiere die Abbildungen.

Die Schallverstärkung erfolgt, wenn die Luftsäule in Resonanz schwingt. Du findest zwei Resonanzlängen  $l_0$  und  $l_1$ , die zur Grundschwingung und zur ersten Oberschwingung gehören. Da wo das Rohr offen ist, bewegen sich die Luftmoleküle schnell hin und her (Bewegungsbauch), bei den «Knoten» stehen sie still. Der Abstand der Knoten entspricht der halben Wellenlänge der Schwingung.

Der Ton der Stimmgabel erzeugt eine Schallwelle, die durch das Rohr läuft und zuerst an der Wasseroberfläche und dann an der oberen Öffnung reflektiert wird. Durch mehrere Überlagerungen der an den Rohrenden reflektierten Schallwellen entsteht etwas, das «stehende Welle» heisst, aber nur, wenn die Rohrlänge gerade passend ist. Dadurch, dass die Schallwellen an den Rohrenden reflektiert werden, überlagern sich die gegeneinander laufenden Wellenzüge, löschen sich teilweise gegenseitig aus oder verstärken sich. Wenn die Luftsäule im oben offenen Rohr gerade  $\frac{1}{4}$  oder  $\frac{3}{4}$  einer Wellenlänge ist, beginnt sie im Takt der Stimmgabel mitzuschwingen, sie resoniert. Auf der geschlossenen Seite können sich die Luftteilchen nicht bewegen. Dort entsteht ein «Wellenknoten», am offenen Ende bilden sich Schwingungsmaxima. Die Maxima sind die Orte, an denen maximale Luftteilchenbewegungen auftreten, sie werden Schwingungsbäuche genannt. An den Minima bewegen sich die Luftmoleküle nur minimal, sie heissen Schwingungsknoten. Beachte, dass sich Luftteilchen nie senkrecht zur Schallausbreitungsrichtung bewegen. Knoten sind also Luftverdichtungen, Bäuche das Gegenteil davon.



Die Wellen A und B verstärken sich (konstruktive Interferenz).



Die Wellen A und B löschen sich gegenseitig aus (destruktive Interferenz).

[http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web\\_ph11/versuche/12stehwel/stehend.htm](http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph11/versuche/12stehwel/stehend.htm)

- Material:** Rohr (ca. 50 cm Länge), grosser Messzylinder, Stimmgabel (1000 Hz oder mehr), evtl. Lautsprecher und Frequenzgenerator.
- Theorie:** Kapitel 4.2.2. bis 4.2.4. und 4.2.20.
- Methode:** Posten für Lernen an einer Station
- bes. Hinweise:** siehe auch [http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web\\_ph11/versuche/12stehwel/stehend.htm](http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph11/versuche/12stehwel/stehend.htm). Geübte Sänger und Sängerinnen können dieses Resonanzphänomen auch in kleinen geschlossenen Räumen (z.B. Badezimmer) hervorrufen. Wird ein Ton gesungen und die Tonhöhe dann allmählich verändert, hört man bei einer bestimmten Tonhöhe die Resonanz. Man kann dann mit ganz wenig Aufwand einen ziemlich lauten Ton singen! Mit etwas Übung findet man auch die Obertöne dazu.

### c) Exkursion: Die Orgel

**Beschreibung:** Es gibt eine Vielzahl von Instrumenten, welche darauf basieren, Luftsäulen in Schwingung zu versetzen und dabei verschiedene Tonhöhen zu erzielen. Das vielleicht faszinierendste Instrument

ist in diesem Kontext die Orgel. Die Besichtigung einer Orgel kann dazu dienen, verschiedene Aspekte der Schallerzeugung und der Schallausbreitung zu erläutern. Da in fast allen Dörfern Kirchenorgeln vorhanden sind, ist eine solche Besichtigung recht leicht möglich. Die meisten Organistinnen und Organisten sind sehr gerne bereit ihr Instrument zu zeigen und zu erläutern.

Theorie: Kapitel 4.2.3. und 4.2.4. und 4.2.20.

Methode: Ausserschulischer Lernort

bes. Hinweise: Falls man eine Orgel besichtigen kann, lohnt es sich auch gleich auf die Raumakustik (vgl. Kapitel 4.2.13.) und den Nachhall zu achten.

## 2.2.4. Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Medien

### a) Experiment: Schallgeschwindigkeit in Luft

Beschreibung: Klatsche in ca. 100 m Entfernung von einer grösseren Wand (z. B. Turnhalle) die Hände oder zwei Bretter gegeneinander (Startklappe) und achte auf das Echo. Stoppe die Zeit, die vom Klatschen bis zum Eintreffen des Echos verstreicht und miss die Distanz zur Wand. Berechne daraus die Schallgeschwindigkeit  $c$  in Luft ( $\text{Distanz} \cdot 2 / \text{Zeit} = c$ ).

Material: Stoppuhr, Messband, grosse Wand

Theorie: Kapitel 4.2.4. und 4.2.6.

Methode: Lernen an einer Station

bes. Hinweise: Bei der Ausführung des Experimentes ist auf eine gute Koordination des ganzen Messvorgangs zu achten. Dies soll ausgenutzt werden, um Kompetenzen zu fördern, die mit der Planung, Ausführung und Auswertung von Experimenten zu tun haben.

**Versuchsvariante:** Eine Person schlägt mit einem Vorschlaghammer am Rande einer Wiese einen Pfosten ein. Die Schläge müssen im Sekundenrhythmus geführt werden. Eine zweite Person gibt den Takt. Der Vorgang wird aus 165 bis 170 m Entfernung beobachtet und ausgewertet. Das Experiment mit dem Vorschlaghammer ist eindrücklich, weil der Hammerschlag immer dann ertönt, wenn der Hammer angehoben ist. Kinder aus bäuerlicher Umgebung beobachten das mit Erstaunen und erzählen in der Schule davon. Vielerorts lässt sich das Experiment durch die LP fest einrichten und das Einschlagen des Pfostens direkt vom Schulzimmer aus beobachten. Spannend ist dabei eine Handy-Verbindung.

### b) Experiment: Schallgeschwindigkeit in Stahl

Beschreibung: Spanne eine Stahlstange (z. B. Stativstange oder eine Alu-Schiene) von ca. 1 m Länge in der Mitte mit einer Stativklemme ein. Schlage sie dann seitlich in Längsrichtung mit einem Hammer an. Es ertönt ein Klang, aus welchem du die Frequenz eines relativ hohen Tones heraushören kannst. Vergleiche seine Tonhöhe mit einer Stimmgabel von 440 Hz. Schätze ab, um wie viele Oktaven er höher ist. (Du kannst auch einen Tonfrequenzgenerator zu Hilfe nehmen, falls vorhanden.) Da eine Oktave immer der doppelten Frequenz entspricht, kannst du die Frequenz des durch den Schlag erzeugten Tones ungefähr angeben. Die Eigenschwingung eines Stabes hat eine Wellenlänge von zwei Stablängen, diese beträgt also 2 m bei einem Stab von 1 m Länge. Die Schallgeschwindigkeit im Stab ist gleich der Wellenlänge multipliziert mit der Frequenz.

Material: Stativstange, Klemme, Hammer, Stimmgabel oder Gerät zur Frequenzbestimmung.

Theorie: Kapitel 4.2.6.



**Methode:** Demonstrationsversuch oder Lernen an einer Station  
**bes. Hinweise:** Der Ton hat eine Frequenz von grob geschätzt 2000 bis 3000 Hz. Er ist etwa 2–3 Oktaven höher als der Kammerton der Stimmgabel. Für 2500 Hz ergibt dies also etwa 2500 Schwingungen pro s. Das heisst: die Schallwelle legt (bei einer Stablänge von 1 m) 5000 m/s zurück.  
 Die Schallgeschwindigkeit kann mit einer sehr guten elektronischen Stoppuhr – gesteuert durch zwei an den Stabenden festgeklemmten Piezomikrofonen – direkt gemessen werden (vgl. Experiment 2 im iLab). Wird der Stab an einem Ende rechtwinklig angeschlagen kann zusätzlich seine viel kleinere Transversalwellengeschwindigkeit bestimmt werden. Wird bei dieser Anordnung vor dem Stabanfang durch eine Stopplappe ein Knall erzeugt, lässt sich auch die Schallgeschwindigkeit in Luft bestimmen.

## 2.2.5. Schallwellen erlauben einen «Blick» in verborgene Welten

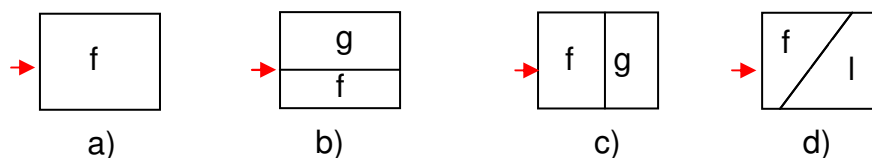
### a) Experiment: Schallübertragung von Wasser auf Luft

**Beschreibung:** Verpacke eine Weckeruhr oder ein Handy wasserdicht, nachdem du den Alarm auf einige Minuten später gestellt hast. Lege das Gerät in ein Aquarium mit Wasser. Halte das Ohr zuerst direkt an die Glaswand, wenn der Alarm losgegangen ist, dann einige Zentimeter weiter von ihr weg. Was stellst du fest? Kannst du deine Beobachtung erklären?  
**Material:** Wasserdichte Uhr/Wecker/Handy, «Aquarium», mit Wasser gefüllt  
**Theorie:** Kapitel 4.2.11.  
**Methode:** Tischteam oder Demonstrationsexperiment  
**bes. Hinweise:** Die Übertragung der Schallwellen von Wasser auf Luft funktioniert schlecht. Die Schallübertragung vom Glas über den Kopf auf das Ohr ist besser.

### b) Aufgabe: Ein Blick ins Erdinnere

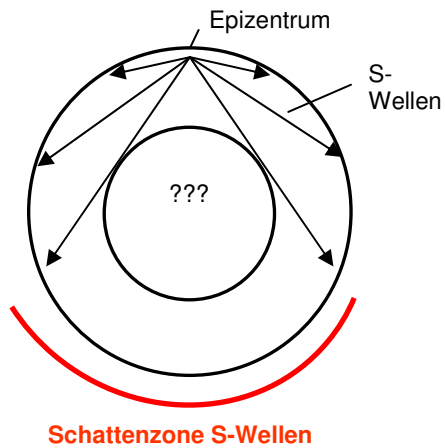
**Beschreibung:** Studiere einen Theorieauszug über Erdbebenwellen.

1. Studiere die unten aufgeführten Abbildungen. Sie beschreiben den Aggregatzustand von Materialien (f: fest, l: flüssig, g: gasförmig) und wie sie räumlich zueinander angeordnet sind.



Der rote Pfeil gibt den Ursprung einer Schallwelle/Schockwelle an. Überlege dir wo und ob man auf der gegenüberliegenden Seite Querwellen und/oder Längswellen registrieren kann. Zeichne deine Antworten ein und begründe sie!

2. Betrachte die schematische Abbildung des Querschnitts der Erde und die eingezeichneten Zonen. Wie ist es zu erklären, dass auf der gegenüberliegenden Seite der Erde nicht alle Erdbebenwellen ankommen? Wie muss der Erdkern zusammengesetzt sein, damit es zu diesem Verhalten kommt?



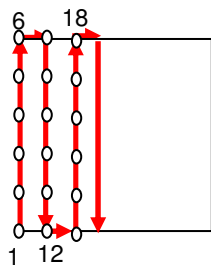
Theorie: Kapitel 4.2.11., 4.2.12. und 4.2.17.

Methode: Lernaufgabe

bes. Hinweise: Zur Bearbeitung sollten die theoretischen Grundlagen aus dem Kapitel 4.2.17. in schülergerechter Form zur Verfügung gestellt werden – allerdings ohne die Abbildung mit der Schattzone. Diese wird dann zur Bearbeitung von Teil 2 nachgeliefert.

### c) Aufgabe: Ein Blick in die Tiefe des Meeres

- Beschreibung:
- Versucht über das Internet herauszufinden, wie mit einem Echolot die Tiefe von Gewässern ermittelt wird. Welche Rolle spielen dabei die Schallgeschwindigkeit in Wasser und die gemessene Zeit (die sogenannte Laufzeitmessung)? Entwickelt dazu eine geeignete Formel für die Berechnung der Wassertiefe.
  - Der Seegrund unter einem quadratischen Flächenstück der Wasseroberfläche von 1000 m Seitenlänge wurde mit dem Echolot vermessen.



06	07	18	19	30	31
05	08	17	20	29	32
04	09	16	21	28	33
03	10	15	22	27	34
02	11	14	23	26	35
01	12	13	24	25	36

Das Messschiff machte seine 1. Messung an einer Quadratecke, dann bewegte es sich einer Quadratseite entlang und machte immer nach 200 m eine Laufzeitmessung. Nach der 6. Messung fuhr es in einem Winkel von 90 Grad 200 m nach rechts zum nächsten Messpunkt 7. Dort drehte es wieder um 90 Grad nach rechts und weiter ging es bis zum Messpunkt 12... und dann wie in der Abbildung bis zur letzten Quadratecke, dem Messpunkt 36. Dabei entstand folgende Messtabelle für die Laufzeiten der Schallimpulse in Zehntelsekunden.

13.0	13.5	14.0	14.2	15.0	14.8
12.7	13.0	13.8	14.1	14.9	15.0
13.8	12.6	13.2	14.0	14.5	14.7
13.5	13.0	13.1	4.3	13.8	14.1
13.1	12.2	12.5	13.0	13.4	13.9
12.0	12.1	12.4	12.8	13.0	13.5

Teilt die Kolonnen der Messwerte untereinander auf und berechnet dann die Wassertiefen. Zur Kontrolle übernimmt jemand von euch die Punkte auf den Diagonalen. Die Resultate werden verglichen und am Schluss in einer Tabelle wie oben festgehalten.

- c) Vielleicht ist es euch aufgefallen, dass es unter den Messwerten einen komischen Wert (Ausreisser) gibt! Markiert ihn! Wie konnte ein solcher Wert entstehen, obwohl die Apparatur immer korrekt funktioniert hat?
- d) Welches ist der tiefste aller Punkte unter der ausgemessenen Seeoberfläche?  
Erstellt für jede Kolonne und für die erste und sechste Reihe je eine Grafik, aus der hervorgeht, wie hoch jeder Punkt über dem tiefst gelegenen Seepunkt liegt. Macht miteinander ab, welchen gemeinsamen Massstab ihr für diese Grafiken wählen wollt. Der tiefste Seepunkt bestimmt in jeder der acht Grafiken die Lage der x-Achse.
- e) Die Form der acht Grafiken (Bodenschnitte) wird auf Karton übertragen und ausgeschnitten. Wenn ihr sie richtig auf ein massstabgleiches Kartonquadrat klebt, könnt ihr mit Sand das Bodenprofil nachbauen.

**Material:** Karton, Scheren, paralleles Raster (z.B. Holzbrett mit eingesägten parallelen Kerben) zum Befestigen der einzelnen Kartonausschnitte.

**Theorie:** Kapitel 4.2.12. und 4.2.15.

**Methode:** Projekt

**bes. Hinweise:** Effekte die bei solchen Messungen zu Fehlern führen: sehr steile Flanken am Boden, Fischschwärme, U-Boote, Unterwasserströmungen, etc.  
Wenn genügend Zeit vorhanden ist, kann die Aufgabe z.B. so formuliert werden: «Erstellt ein Bodenprofil aus einer vorgegebenen Laufzeitmesstabelle eines Echolots!» Die Ausführung obliegt dann der Projektgruppe.

## 2.2.6. Was hörst du?

### a) Hörtest

**Beschreibung:** Untersuche mit einem Frequenzgenerator und einem Lautsprecher deinen Hörbereich bezüglich der Frequenzen verschieden hoher und evtl. auch unterschiedlich lauter Töne! Dokumentiere deine Feststellungen!

**Material:** (PC-)Tonfrequenzgenerator, Test CD und Player oder PC für Online Test, Kopfhörer oder Lautsprecher

**Theorie:** Kapitel 4.2.9. und 4.3.1.

**Methode:** Posten für Lernen an einer Station

**bes. Hinweise:** Es gibt verschiedene Anbieter von CDs oder anderem Audiomaterial, welches Töne und Geräusche in unterschiedlichen Lautstärken und Frequenzbereichen abspielt. Es gibt auch online Hörtests, die zum Teil ganz gut sind (z.B. <http://www.earaction.de/>).

### b) Experiment: wie tönen verschiedene Räume

**Beschreibung:** Erzeuge in verschiedenen Räumen (Schulzimmer, Turnhalle, langer Korridor, Kirche, Besenkammer, Dusche) Geräusche (z.B. Schritte, Klatschgeräusche, gesungene Töne). Was fällt dir auf? Versuche deine Wahrnehmung möglichst präzise zu beschreiben und zu vergleichen. Beachte auch den Nachhall und Echos. In grösseren Räumen kannst du versuchen den Nachhall zu messen (in s). In einer Turnhalle hörst du vielleicht, wie ein Schallimpuls zwischen den Wänden hin und her pendelt.  
Experimentiere auch mit geschlossenen Augen. Nimm unterschiedliche Positionen ein, z.B. nahe an einer Wand oder in einer Ecke.

Theorie: Kap. 4.2.12. und 4.2.13.  
Methode: Klassenversuch, Forschungsvorhaben, Lernen an einer Station  
bes. Hinweise: Solche Experimente sind auch geeignet, um in einer Klasse «absolute» Stille zu üben, zu ertragen und bewusst zu machen, dass wir nirgends ganz vor Umgebungsgeräuschen (Lärm) geschützt sind.  
Im Rahmen eines Projekts können Hörbilder verschiedener Orte zu unterschiedlichen Tages und Nachtzeiten aufgenommen werden. Mit diesen Klangkonserven könnte dann im Schulzimmer sogar ein Klangkonzert improvisiert werden.  
(vergleiche auch bes. Hinweise zum Experiment «Die singende Röhre», Kap. 2.2.3. b)

### c) Experiment: drinnen und draussen

Beschreibung: Mit einem Tonfrequenzgenerator wird ein Ton erzeugt und dann immer leiser gemacht. Die Zuhörenden sollen sich im Zimmer darauf einigen, wann die Lautstärke nur noch halb so gross ist. Anschliessend wird das Experiment im Freien (ohne reflektierende Wände und Personen) wiederholt. Dann wird wieder die Originallautstärke eingestellt und der Abstand (zwischen Lautsprecher und Ohr) so vergrössert, dass der Ton nur noch halb so laut erscheint.  
Die Resultate der drei Versuche werden möglichst genau und individuell dokumentiert und dann diskutiert.  
Material: PC oder Tonfrequenzgenerator (siehe auch Vorangestellt A)  
Theorie: Kapitel. 4.2.9.  
Methode: Forschungsvorhaben  
bes. Hinweise: Dieses Projekt steht in engem Zusammenhang mit dem Experiment 2.2.8.b). Im Freien ergibt sich ein anderes Abstandsgesetz (Halbierung der Lautstärke bei ca.  $-6\text{dB}$ ) als in einem Raum mit reflektierenden Wänden (Halbierung der Lautstärke bei ca.  $-3\text{dB}$ )

## 2.2.7. Schalldämmung und Schalldämpfung im Kleinen

### a) Experiment: Die tickende Uhr

Beschreibung: Lege eine tickende Armbanduhr auf einen Tisch. Halte das eine Ohr auf die Tischplatte, während das andere Ohr zu gehalten wird. Was hörst du? Lege die Uhr nun auf den Wandtafelschwamm und höre wiederum mit dem Ohr auf der Tischplatte. Was stellst du fest? Versuche zu erklären!  
Material: tickende Armbanduhr, Tisch, Wandtafelschwamm, Gehörschutzpfropfen  
Theorie: Kapitel 4.2.11.  
Methode: Lernen an einer Station  
bes. Hinweise: Weiche, poröse Stoffe sind geeignet für die Schalldämmung. Tipp: Man kann für das Verschliessen des Ohres Standard-Gehörschutzpfropfen verwenden. Dadurch wird das Prinzip im gleichen Experiment gleich zweimal gezeigt.

### b) Experiment: Der leise Wecker

**Beschreibung:** Lasse den Alarm eines Weckers erklingen, lege ihn dann in einen Schuhkarton und vergleiche die Lautstärke mit und ohne Deckel. Teste dann verschiedene Füllungen (Schaumstoff, Styropor, Papier, etc.) und vergleiche die wahrgenommenen Lautstärken. Versuche deine Beobachtungen zu erklären.

**Material:** Wecker, Schuhkarton, Füllmaterialien

**Theorie:** Kapitel 4.2.14.

**Methode:** Demonstrationsversuch oder Lernen an einer Station

**bes. Hinweise:** Man erhält auch kombinierte Effekte (Schalldämmung und Schalldämpfung), die zur Veranschaulichung des Prinzips der Schallabsorption geeignet sind. In der leeren Schachtel können unter Umständen auch Resonanzphänomene auftreten.

### c) Auftrag: Beeinflussung der Raumakustik

**Beschreibung:**

- Versuche anhand der Bilder von Räumen (aus dem Internet) herauszufinden, was zur Schalldämpfung in einem Raum beiträgt.
- Suche im Internet nach Bildern, die besondere Materialien zur Schalldämpfung und ihre Verwendung zeigen.
- Analysiere zwei Räume zu Hause bezüglich Raumakustik. Halte es oder ist es besonders ruhig? Warum?
- Mache Vorschläge zur Umgestaltung von Räumen in deiner Umgebung, die du akustisch als unangenehm empfindest.
- Wie wird in Grossraumbüros oder Bibliotheken eine gedämpfte Akustik erzielt?

**Material:** Internetzugang

**Theorie:** Kapitel 4.2.13 und 4.2.14.

**Methode:** Evidenzen sammeln oder Tischteam und GiveOne – GetOne

## 2.2.8. Schallpegel

### a) Experiment: Schallpegelmessungen

**Beschreibung:** Schreibe eine Liste mit fünf alltäglichen Geräuschen, deren Lautstärke ihr vergleichen möchtet. Beispiele: Pausenglocke, Lärm auf dem Pausenplatz, ruhiges Schulzimmer, vorbeifahrendes Auto, Musik aus Radio, schreiender Mensch. Ermöglicht nun für jedes der Beispiele eine konkrete Situation für eine Schallpegelmessung. Beschreibe sie! Berücksichtige dabei auch die Distanz zur Schallquelle.

Ordne die Beispiele auf eurer Liste nach der Lautstärke, die ihr erwartet. Was tönt wohl am lautesten, was ist besonders leise? Führt dann die Messungen in dieser Reihenfolge aus. Die Resultate schreibt ihr in die Liste. Vergleiche mit eurer Schätzung!

**Material:** CD-Player mit Lautsprecher, Schallpegelmessgerät (einfache Geräte sind schon für weniger als 100 Franken im Handel erhältlich)

**Theorie:** Kapitel 4.2.9.

**Methode:** Posten für Lernen an Stationen

**bes. Hinweise:** Die Schätzung vor der Messung kann aufschlussreich sein, da «angenehmer Schall» wie Musik

oft als weniger lautstark empfunden wird als «unangenehmer Lärm» (Risiko für Hörschäden). Schallpegelmessungen sind immer situativ (z.B. Raumverhältnisse) und besonders im freien Umfeld distanzabhängig. Das Lautstärkeempfinden wird hauptsächlich durch den Schalldruck ( $1/r$  – Abstandsgesetz) und weniger durch die Schallintensität ( $1/r^2$  – Abstandsgesetz) bestimmt. Bei den Messungen ist also auf die Distanz zur Quelle zu achten.

### **b) Experiment: Distanzabhängigkeit des Schallpegels**

- Beschreibung: a) Stellt einen CD-Player in einer ruhigen Tageszeit in die Mitte eines menschenleeren Fussballfeldes. Misst in zunehmenden Abständen (1m, 2m, 3m ...) den Schallpegel des gleichen Ausschnitts eines dynamisch ruhigen Musikstücks. Erstellt eine Grafik für den Schallpegel versus Abstand.
- b) Wiederholt das Experiment zuerst mit dem CD Player dann mit einem Rauschgeräusch (Wasserlaufen lassen im Waschbecken) in einem leeren Schulzimmer. Vergleicht auch mit a) und diskutiert die Unterschiede.
- Material: CD-Player mit Lautsprecher, Schallpegelmessgerät (einfache Geräte sind schon für weniger als 100 Franken im Handel erhältlich), Messband
- Theorie: Kap. 4.2.9.
- Methode: Forschungsvorhaben, Projekt
- bes. Hinweise: Im Schulzimmer eignet sich ein Rauschen am besten, weil so Resonanzphänomene minimiert werden können.

## **2.2.9. Lärm**

### **a) Aufgabe: Lärminventar**

- Beschreibung: Erstelle eine Liste mit Geräuschen welche du als unangenehm oder als Lärm empfindest. Beschreibe das Geräusch und die Umgebung und Situation in der du dich bei seinem Auftreten befindest! Begründe individuell, warum du das Geräusch als störend oder als Lärm empfindest.
- Theorie: Kapitel 4.2.14.
- Methode: Evidenzen sammeln und GiveOne – GetOne
- bes. Hinweise: Nicht nur die Lautstärke von Geräuschen am falschen Ort sind störend, auch die Tonhöhe spielt eine Rolle. Durch Vergleich der Listen kann verdeutlicht werden, dass die Wahrnehmung von Lärm subjektiv und situationsabhängig ist. Anschliessend lässt sich diskutieren, wo relativ leicht Lärm vermieden werden könnte, respektive in welchen Umgebungen Lärm besonders heikel ist. Interessante Informationen finden sich auch unter [http://www.laermorama.ch/laermorama/modul\\_laerm\\_betroffen/definition\\_v.html](http://www.laermorama.ch/laermorama/modul_laerm_betroffen/definition_v.html)

### **b) Projekt: Musik in den Ohren**

- Beschreibung: Einzelarbeit: Lies den Text auf Seite 30.
- Partnerarbeit: Welche Bedeutung hat Lärm im Leben eines Schülers/einer Schülerin?
- a) Entwerft ein Plakat, mit dem ihr eure Kollegen und Kolleginnen auf drei Gefahren aufmerksam macht und Empfehlungen für richtiges Verhalten abgibt.

b) Erarbeitet eine Meinungsumfrage (Fragebogen, Interview) mit dem Thema: Was wissen unterschiedliche Personengruppen über dieses Thema? Wie verhalten sie sich?

Klassenarbeit: Vergleicht die Plakate, bewertet sie und platziert die guten Beispiele im Einverständnis mit der Klassenlehrperson auf dem Schulhausareal.

Umfrage nach zehn Tagen: Bei wem haben die Plakate etwas bewirkt? Was?

Material: Plakate, Stifte

Theorie: Kapitel 4.2.7, 4.2.9. und 4.3.1.

Methode: Projekt

### **Schall und Hörvermögen**

Die Amplitude oder Schwingungsweite beschreibt die Stärke der Schallwelle. Wenn die Amplitude einer Schallwelle zunimmt, erhöht sich analog dazu die Lautstärke des Schalls. Musik besteht aus einer Mischung unterschiedlicher Frequenzen und Amplituden.

Der Mensch ist in der Lage zu hören, weil die Ohren die Vibrationen einer Schallwelle oder Schwingung in der Luft in Signale umsetzen, die das Gehirn als Ton interpretiert. Wenn die Vibrationen einer Schallwelle in das Ohr eindringen, werden sie durch das Trommelfell und die Gehörknöchelchen im Mittelohr (Hammer, Amboss und Steigbügel) verstärkt. Im Innenohr setzen diese verstärkten Vibrationen winzige Haarzellen in Bewegung, die diese Vibrationen in Nervenimpulse verwandeln, die an das Gehirn weitergeleitet werden. Das Gehirn interpretiert diese Nervenimpulse dann als Ton.

Wenn Sie Ihre Ohren übermäßigem Schalldruck aussetzen, besteht die Gefahr, dass die winzigen Haarzellen in Ihren Ohren dauerhaft geschädigt werden. Eine solche Schädigung bewirkt, dass die Haarzellen den Schall nicht mehr an Ihr Gehirn weiterleiten können. Die Folge: Sie leiden unter Lärmschwerhörigkeit. Die Symptome hierbei sind u.a. verzerrter oder gedämpfter Ton oder Schwierigkeiten Gesprochenes zu hören.

Lärmschwerhörigkeit kann durch eine einmalige sehr hohe Geräuschbelastung entstehen, beispielsweise durch einen Gewehrschuss. Aber auch wenn Sie Ihre Ohren über einen längeren Zeitraum hinweg einer hohen Schallbelastung aussetzen, kann Lärmschwerhörigkeit die Folge sein.

### **Vernünftiges Hören**

Die meisten Untersuchungen zur Lärmschwerhörigkeit beschränken sich auf die Gesundheitsrisiken durch übermäßigen Lärm am Arbeitsplatz. Die Auswirkungen, die Freizeitlärm auf den Menschen hat, sind weniger erforscht. Beim Anhören von Musik und Audioinhalten mit Kopf- oder Ohrhörern, egal ob diese an Ihren iPod, Ihren Computer oder eine andere Audioquelle angeschlossen sind, sollten Sie unbedingt einige allgemein gültige Empfehlungen beachten.

### **Achten Sie auf die Lautstärke**

Es gibt keine «ideale» Lautstärke, die für jede Person geeignet ist. Unter Umständen nehmen Sie mit unterschiedlichen Ohrhörern oder Kopfhörern und unterschiedlichen Equalizer-Einstellungen verschiedene Schallpegel wahr.

Einige Experten empfehlen, die Lautstärke in einer ruhigen Umgebung einzustellen. Reduzieren Sie die Lautstärke, wenn Sie Personen in Ihrer Nähe nicht sprechen hören. Vermeiden Sie es, die Lautstärke zu erhöhen, um laute Umgebungsgeräusche zu übertönen. Verwenden Sie Ohrhörer oder Kopfhörer nur für eine begrenzte Dauer bei sehr hoher Lautstärke.

### **Beachten Sie die Dauer**

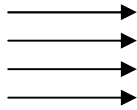
Achten Sie unbedingt darauf, wie lange Sie Musik in hoher Lautstärke hören. Denken Sie immer daran: Sie können sich im Laufe der Zeit an eine höhere Lautstärke gewöhnen, ohne zu bemerken, dass diese höhere Lautstärke Ihr Gehör schädigen kann. Gehörspezialisten warnen ausdrücklich, dass Lärmschwerhörigkeit entstehen kann, wenn das Gehör kontinuierlich hoher Lautstärke ausgesetzt wird. Je höher die Lautstärke ist, desto schneller treten Hörschäden auf. Unterbrechen Sie die Audiowiedergabe und lassen Sie Ihr Gehör untersuchen, sobald Sie Pfeifen oder Klingeln in Ihren Ohren hören oder Sprechen nur noch gedämpft oder undeutlich wahrnehmen.

<http://www.apple.com/de/sound/>

## 2.2.10. Lärmschutz

### a) Aufgabe: Oberflächenbeschaffenheit von Lärmschutzwänden

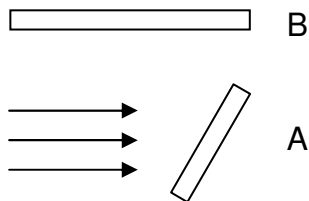
Beschreibung: a) Mache dich kundig über das Thema «Reflexion von Schallwellen»!  
Eine Schallwelle kann modellhaft durch «Schallstrahlen» dargestellt werden.



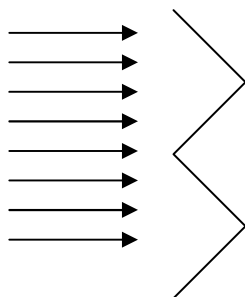
b) In welche Richtung wird Schall zurückgeworfen, wenn er im rechten Winkel auf eine ebene, glatte Oberfläche trifft? In welche Richtung wird Schall zurückgeworfen, wenn er in einem beliebigen Winkel auf eine ebene, glatte Oberfläche trifft? Konstruiere mit roten Pfeilen die reflektierte Schallwelle!



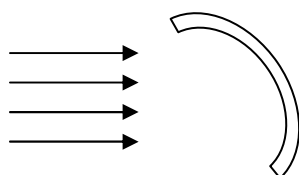
c) Auch Mehrfachreflexion ist möglich! Hier zuerst von Wand A, dann weiter von Wand B. Konstruiere mit roten Pfeilen die reflektierte Schallwelle.



d) Versuche es auch mit komplizierter gestalteten Flächen!

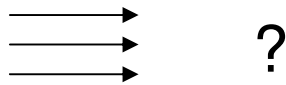


e) Geht es auch mit einem Hohlspiegel?





- f) Bei jeder Reflexion wird ein Teil des Schalls absorbiert («verschluckt»)  
Entwurf eine aus ebenen, glatten Teilflächen zusammengesetzte Fläche, die den Schall möglichst oft reflektiert und damit «einfängt»!



- g) Finde über das Internet heraus, wie Lärmschutzwände aufgebaut sind! Hat deine Konstruktion in f) damit Ähnlichkeiten?

Theorie: Kapitel 4.2.11. und 4.2.12. und 4.2.14.

Methode: Lernaufgabe

bes. Hinweise: Als Lärmschutz eignen sich («fraktal aufgebaute») Oberflächen besonders gut. Wird nämlich das Profil, welches als Lösung in f) gefunden wurde in kleineren Dimensionen nochmals wiederholt, wird der Effekt verstärkt.

## 2.3. Schall im biologischen Kontext

### 2.3.1 Das menschliche Ohr

#### a) Aufgabe: Anatomie des menschlichen Ohrs

Beschreibung: Setze anhand des beschrifteten anatomischen Modells Titel für die Teile der schematischen Zeichnung eines Ohrs!

Material: Anatomisches Modell, Arbeitsblatt mit Darstellung des Ohrs (siehe Theorieteil)

Theorie: Kapitel 4.3.1.

Methode: Lernen an einer Station

#### b) Experiment: Trommelfellmodell 1

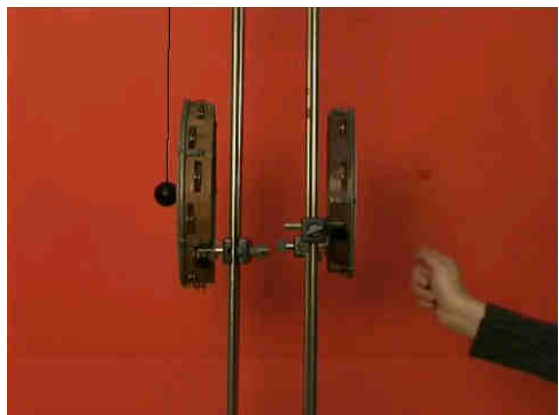
Beschreibung: Die Auslenkung des Trommelfells durch Schallwellen kann mit Hilfe von Tamburins gezeigt werden. Man befestigt, wie auf dem Bild, zwei Tamburine vertikal und parallel zueinander. Eines davon dient zur Schallerzeugung durch Anschlagen. In Kontakt mit dem anderen – es stellt das Trommelfell des Ohrs dar – wird ein Pingpongball aufgehängt.  
Frage: Was beobachtest du beim Anschlagen? Beschreibe die Schallübertragung von der Schallquelle auf das «Trommelfell»!

Material: 2 Tamburine, 2 Stative, Schnur, Tischtennisball, Kerze, Nagel, Tamburinschläger.

Theorie: Kapitel 4.3.1., 4.2.5. und 4.2.7.

Methode: Demonstrationsversuch oder Lernen an einer Station

bes. Hinweise: Pingpongbälle lassen sich mit einem heißen Nagel durchlöchern.



Quelle: <http://www.kontexis.de>

### c) Trommelfellmodell 2

**Beschreibung:** Spanne mit Hilfe eines Bürogummibandes eine aufgeschnittene Ballonhülle – als Modell für das Trommelfell des Ohrs – über einen grossen, leeren Joghurtbecher. Mit Klebstreifen klebst du einen kleinen Papierrand um die aufgespannte Gummimembran. Brenne mit einem heissen Nagel seitlich ein Loch in den Becher und vergrössere es mit einer Schere. Halte das Trommelfellmodell waagrecht und streue Salz oder Maisgriess darauf. Was stellst du fest, wenn du durch das Loch sprichst oder singst? Für die Beobachtung kann es hilfreich sein, wenn du mit jemandem zusammenarbeitest. Während eine Person in einen Becher singt kann die andere beobachten was oben passiert.

**Material:** Joghurtbecher, Ballone, Gummibänder, Papier, Klebstreifen, Schere, Salz, Nagel

**Theorie:** Kapitel 4.3.1., 4.2.5. und 4.2.7.

**bes. Hinweise:** Dieses Experiment ist vom experimentellen Aufbau her eng verwandt mit dem Experiment 2.1.5.a).

## 2.3.2 Hörleistung

### a) Experiment: Frequenzhörtest

**Beschreibung:** Suche im Internet einen Hörtest und führe ihn für dich aus. Halte die Ergebnisse schriftlich fest.

**Material:** PC mit Lautsprechern (oder Kopfhörern) und Internetzugang

**Theorie:** Kapitel 4.3.1., 4.3.4. und 4.2.9.

**Methode:** Posten für Lernen an einer Station

**bes. Hinweise:** Siehe auch Versuch 2.2.6 Hörtest.

Interessant ist der Vergleich mit der Lehrperson, die bei hohen Frequenzen altersbedingt wohl Mühe hat. Da oft Lautsprecher bei Frequenzen am Rand der wahrnehmbaren Frequenzen nicht optimal arbeiten, sollte man vorher testen, ob die Töne wirklich in der richtigen Höhe gesendet werden. Hörtests gibt es an verschiedenen Orten, so unter <http://www.auricilla.de/hoertest.htm> [http://www.kind.de/hoertest\\_de.html](http://www.kind.de/hoertest_de.html), oder <http://www.hoerbild.de/hoertest/hoertest.php>

### b) Experiment: Richtungshören 1

**Beschreibung:** Halte die beiden Enden eines Schlauchs von 1 m Länge – wie im Bild – an deine Ohren und lege den Schlauch hinter dir auf einen Tisch. Jemand aus deinem Team drückt die mit Filzstift bezeichnete Schlauchmitte leicht auf die Tischoberfläche und klopft mit einem Bleistift abwechselnd links und rechts von der Mitte sanft auf den Schlauch. Du sagst jedes Mal, mit welchem Ohr du das Geräusch zuerst gehört hast. Wie gross ist der Bereich, in dem du es nicht genau sagen kannst? Wo liegt er? Miss seine Länge! Wie lange braucht der Schall, um dieses kurze Stück zu durchlaufen (Schallgeschwindigkeit 340 m/s)? Was bedeutet diese Zeit?

**Material:** Schlauch, 2 Trichter, Klebeband



Quelle: <http://www.kontexis.de>

Theorie: Kapitel 4.3.2. und 4.2.6.  
Methode: Tischteam  
bes. Hinweise: Wenn die Testperson die Enden des Schlauchs genau ans Ohr setzt, funktioniert das Experiment auch ohne Trichter. Der Schlauch muss neben der Klopfstelle gut festgehalten werden, damit er nicht auf dem Tisch aufspringt und Störgeräusche entstehen. Die berechnete Zeit entspricht der Verzögerung beim Eintreffen des Signals auf die Ohren. Nicht alle Menschen hören bei diesem Experiment symmetrisch.

### c) Experiment: Richtungshören 2

Beschreibung: Verbinde deine Augen und halte ein Ohr zu. Versuche jedes Mal herauszufinden, wo dein Partner/deine Partnerin «psst» gemacht hat. Wiederhole den Versuch mit beiden Ohren offen und/oder mit verformten Ohrmuscheln. Mache die gleichen Versuche mit einem gesprochenen «Hallo». Die Partnerin/der Partner protokolliert jeweils.  
Was bedeuteten die Versuchsergebnisse für das Hören mit Hörgeräten und Kopfhörer?

Methode: Tischteam, Posten für Lernen an einer Station  
Theorie: Kapitel 4.3.2. und 4.2.6.  
bes. Hinweise: Wenn nur der Lautsprecher, nicht aber das schallsendende Mikrofon im Ohr liegt, geht die Modulation am Ohr verloren, und die Töne werden als «falsch» oder unecht empfunden. Mit Hörgeräten wird das Richtungshören erschwert – bei grösseren Modellen, die hinter dem Ohr getragen werden, stärker als bei solchen im Ohrkanal. Teilweise werden Musikaufnahmen für Kopfhörer mit Mikrofonen in den Ohren eines Wachskopfes gemacht, um die Modulierung der Ohrmuschel bereits in der Aufnahme zu haben.

## 2.3.3 Echoortung der Fledermäuse

### a) Aufgabe: Spallanzani Experimente

Beschreibung: Lest (oder hört) aufmerksam den Text über Versuche des Fledermausforschers Lazzaro Spallanzani. Diskutiert im Tischteam die einzelnen Schritte des Experiments und notiert – jedes für sich – die Antworten auf folgende Fragen:

- 1) Welchen Einfluss hat das Zukleben
  - a) der Ohren?
  - b) des Mundes?
- 2) Wozu dienen die Kontrollexperimente mit den verschliessbaren Röhrchen?
- 3) Weshalb könnten und würden diese Experimente heute nicht mehr so durchgeführt? Wenn Ihr Ideen habt für Alternativen, schreibt sie auf.

Wenn die für diese Arbeit vorgegebene Zeit abgelaufen ist, werden die Ergebnisse mit den anderen Teams verglichen und vervollständigt.

Material: Papier, Text  
Methode: Tischteam  
Theorie: Kapitel 4.3.6. und 4.2.18.

### **Das Rätsel der Orientierung im Dunkeln**

Wie Fledermäuse nachts fliegen können, ohne dauernd gegen Objekte zu stossen, hat die Menschen schon seit langem fasziniert. Der italienische Naturforscher Lazzaro Spallanzani hat im 18. Jahrhundert versucht, dem Geheimnis auf die Spur zu kommen. Er hängte in einem Zimmer Schnüre mit Glocken auf, und liess Fledermäuse in vollständiger Dunkelheit fliegen. Er hörte die Fledermäuse zwar fliegen, aber keine der Glocken läutete. Daraus schloss er, dass die Fledermäuse einen zusätzlichen Sinn haben mussten.

Eulen, mit denen er den Versuch wiederholte, flogen von sich aus gar nicht im Dunkeln, und wenn er sie aufscheuchte, kollidierten sie mit den Schnüren.

Bei den Fledermäusen stellte er in weiteren Versuchen fest, dass sie nicht mehr in der Lage waren, sich zu orientieren, wenn er ihnen die Ohren oder den Mund zugeklebt hatte. Er ging sogar soweit, den Fledermäusen Röhrchen in die Ohren zu kleben, die er wahlweise öffnen oder schliessen konnte. So konnte er sichergehen, dass das Ergebnis von der Hörfähigkeit der Fledermäuse abhing, und nicht von einer sonstigen Beeinträchtigung durch den Eingriff.

# 3. Didaktische und methodische Hinweise

In der Folge werden einige Methoden, die im Kapitel 2 nur als Schlagworte aufgeführt sind, genauer beschrieben.

## 3.1 Evidenzen sammeln

Diese Methode eignet sich als längerfristige Vorbereitung eines geplanten Unterrichtsthemas. Das so entstandene Portfolio kann durch die Lehrperson beurteilt und benotet werden. Jede Evidenz kann nach einem von der Lehrperson vorgegebenen Raster z.B. mit 0 bis maximal 4 Punkten bewertet werden.

Hinweis: Diese Unterrichtsform wird beschrieben in

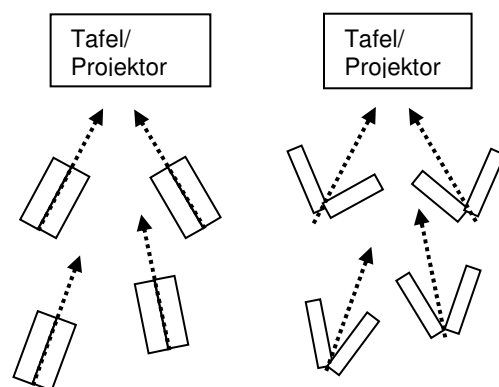
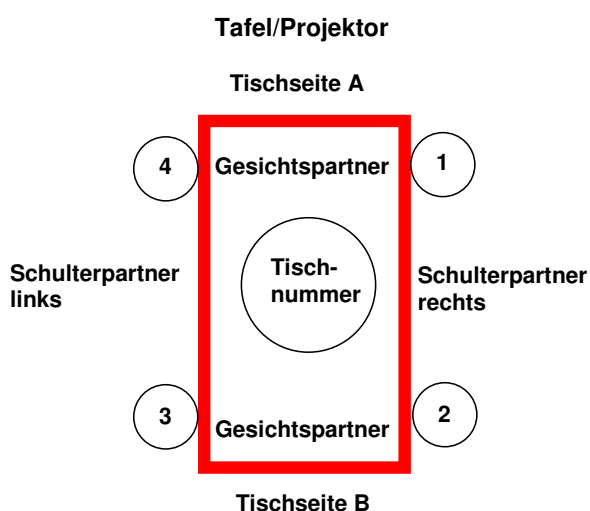
«Physikdidaktik», Kircher et al., Springer, ISBN-10 3-540-34089-0. S. 370 ff

Beispiel siehe 2.1.1. a)

## 3.2 Arbeiten im Tischteam

Team-Tisch-Organisation nach Spencer Kagan

<http://ednet.kku.ac.th/~paisan/tld/kagan-struct.html>



Teamarbeit ist weit mehr als Gruppenarbeit. Damit eine Ad-hoc-Gruppe zum Team wird, braucht es gut durchdachte Strukturen und dauernde Übung damit.

Eine Tischeinteilung, wie sie Spencer Kagan vorgeschlagen hat, kann dabei sehr hilfreich sein. Die Ausrichtung der Achsen aller Teamtische erlaubt allen Schülerinnen und Schülern den Blick auf Wandtafel oder Projektor. Je nach örtlichen Möglichkeiten kann das durch eine in Sekunden zu errichtende V-Anordnung noch optimiert werden.

Aufträge lassen sich so rasch zuteilen und die Abläufe über ein vorgegebenes Zeitmanagement gut überwachen.

Es empfiehlt sich, die Teamzuteilung nach (evtl. nach einem Quartal) wechselnden Kriterien durch die Lehrperson machen zu lassen. Bei Teamaufgaben sind die Aktivitäten innerhalb der Teams rotierend zu gestalten.

### Beispiel

Alle falten ein A4 Blatt einmal längs und dreimal quer, und falten es dann wieder auf. In der linken Kolonne dieser (2x8)-Liste werden gemeinsam im Team Schallgeber, d.h. «Dinge, die tönen und auch benannt werden können» aufgelistet. Teammitglied 1 beginnt mit einem Vorschlag, 2 beschreibt eine Art und Weise, wie dieser Schallgeber zum Tönen gebracht werden kann, 3 sucht dafür einen kurzen sprachlichen Ausdruck, 4 schaut, dass alle das Beispiel richtig (mit «Autorenname») in ihre Liste schreiben, dann wird permutiert, d.h. es folgt der Vorschlag von 2 ... Es werden 25 Minuten Arbeitszeit veranschlagt.

Die Lehrperson könnte solche Listen bekommen:

4er-Tisch-Team Nr.1 Schallgeber (vorgeschlagen...)	Anregungsart (Lösungsvorschlag...)
Stimmgabel (von Hans)	Anschlagen oder durch Resonanz (von Maja)
Lautsprecher, Kopfhörer (Maja)	Elektromagnetische Anregung einer Membran (von Marc)
Saite (Marc)	Zupfen oder streichen mit «klebrigem» Bogen (mit Kolofoniumharz einreiben) (von Brigi – Violinistin)
Glocke, Schelle (Brigi)	Anschlagen, Schütteln einer Kugel, Klöppelschlag (Hans)
Klingel (Hans)	Klöppel mit elektrischem Unterbrecher bewegen und damit eine Schelle anschlagen (von Maja)
Klingendes Glas (Maja)	«Haften und Gleiten» mit feuchter Fingerbeere oder Anschlagen (Marc)
Gong (Marc)	Anschlagen (Brigi)

oder:

3er-Tisch-Team Nr. 2 Schallgeber (von..)	Anregungsart (Lösungsvorschlag von...)
Stimmbänder (Therese)	Luftstrom durch Unterbrechen zum Schwingen bringen (Rudi)
Klatschen (Rudi)	Luft komprimieren (Therese)
Zeitung (Therese)	reiben, knicken, zerknüllen (Vali)
Glasrohr (Vali)	anblasen, leichtes Klopfen, durch Resonanz (Rudi)
Harte Kreide auf Tafel (Rudi)	«Haften und Gleiten» auf einer Wandtafel (Therese)
Motoren (Therese)	Rotation und Vibrationen beweglicher Teile (Vali)
Musikinstrumente (Vali)	(Zeit reichte nicht mehr)

Beispiele: 2.1.1. b) oder 2.1.3. a)

### 3.3 Experimentieren im Tischteam

Teamfördernd ist das Experimentieren in festen Teams (statt in variierenden Gruppen). Wichtig ist, dass von der Lehrperson das Rollenverhalten der Teammitglieder insbesondere auch im Hinblick auf die Genderproblematik beobachtet und beeinflusst wird. Die Klasse kann von Teamspeakern über den Verlauf orientiert werden. Welche Teams dabei zum Zuge kommen, und wer Teamspeaker ist, entscheidet unmittelbar vor der Präsentation z.B. der «Zufallsgenerator» der Lehrperson.

(Siehe dazu «Student Selector» unter <http://www.kaganonline.com/Catalog/index.html>)

[www.kaganonline.com](http://www.kaganonline.com)



**Beispiel 1** siehe 2.1.2. b)

Die Lehrperson könnte diesen Text bekommen:

«Die Schattenbewegung ist in beiden Fällen gleich. Wir finden das cool.» (Hans, Krista, Jacques, Wolf)

**Beispiel 2** siehe 2.1.1. c)

Zwei von der Lehrperson als erfolgreich eingeschätzte Teams dürfen präsentieren. Die Speakerin/der Speaker eines Problemteams berichtet über die Schwierigkeiten beim Üben.

### 3.4 Experimente für Schulterpaare im Tischteam

Schulterpaare sitzen im Team besonders nah beieinander und eignen sich deshalb gut als Untergruppe des Teams. In 3er-Tischteams entfällt in der Regel diese Möglichkeit (ausser es gibt zwei 3er-Tischteams in der Klasse). Nach der Durchführung des Experiments besteht die Möglichkeit, dass sich die GesichtspartnerInnen austauschen.

**Beispiel** siehe 2.1.1.g)

1 Buch lenkt 4 mm aus, zwei 8 mm. Die Punkte liegen auf einer Geraden. Die Auslenkung ist proportional zur Anzahl der angehängten Bücher. (Zita, Ulf)

### 3.5 Die Methode «GiveOne – GetOne»

Diese am Beispiel 2.1.1. b) gezeigte Methode aktiviert gleichzeitig sehr viele Schülerinnen und Schüler zum Mitdenken und fördert bei häufiger Anwendung die Teambildung. Die Austauschphase bringt zielgerichtete physische Bewegung in den Unterricht. Dabei wird das Wissenspotenzial der ganzen Klasse genutzt. Die Kurzpräsentationsphase hilft, Hemmungen beim Sprechen vor «vielen Menschen» abzubauen.

**Wichtig** bei dieser Methode ist ein **gutes Zeitmanagement** durch die Lehrperson z.B. mittels eines Gongs oder eines digitalen «Unterrichtsweckers».

(Siehe dazu «TeachTimer» unter <http://www.kaganonline.com/Catalog/index.html>)

In der **Bewegungsphase** muss immer darauf geachtet werden, dass sich **alle bewegen** und zwar weg von den eigenen Stühlen.

**Beispiel** siehe 2.1.1. b)



[www.kaganonline.com](http://www.kaganonline.com)

## 3.6 Begriffsnetz

In Begriffsnetzen werden mehrere vorgegebene und im Unterricht behandelte Begriffe grafisch sinnvoll angeordnet. Je zwei Begriffe können mit einem einfachen Pfeil oder mit einem Doppelpfeil dazwischen zueinander in Beziehung gesetzt werden. Die Pfeile werden direkt beschriftet oder mit Nummern versehen, zu denen dann eine Legende erstellt wird. Wenn Begriffsnetze zuerst an Beispielen geübt werden, können sie auch zur Leistungsbeurteilung herangezogen werden. Gewertet wird dabei der Inhalt der Beziehungsbeschreibungen, z.B. 0 bis maximal 1 Punkte pro Pfeilrichtung. **Beispiel** siehe 2.1.7. b)

Hinweis: Diese Unterrichtsform wird beschrieben in

«Physikdidaktik», Kircher et al., Springer, ISBN-10 3-540-34089-0. S. 281 ff

## 3.7 Schreiben einer Versuchsanleitung

Wer eine Versuchsanleitung schreiben will, muss sich mit der hinter dem Versuch stehenden Theorie intensiv auseinandersetzen, sich über die Versuchsanordnung im Klaren sein, sie optimieren und beschreiben können. Die Anleitung muss gut lesbar und verständlich sein. Das im Versuch angestrebte Lehrziel zu formulieren und die zu erwartende Lösung darzulegen, kann durchaus sinnvoll sein. Je nach Zeitgefäß kann die Aufgabe sogar darin bestehen, eine eigene Versuchsanordnung entwickeln zu lassen. **Beispiel** siehe 2.1.7. a)

## 3.8 Lernen an einer Station

Stationen sind dann sinnvoll, wenn der Inhalt einer ganzen Lernsequenz handelnd mit Experimenten erarbeitet oder dargestellt werden soll. Während einer vorgegebenen Zeit muss eine bestimmte Anzahl von Stationen in freier Wahl – natürlich im Rahmen der Verfügbarkeit – durchlaufen werden. Das Zeitmanagement für die einzelnen Stationen ist Sache der Lernenden. Manchmal ist es sinnvoll, kleine «Jokerstationen» oder Spezialaufgaben (z.B. eine kleine Internetrecherche) bereit zu halten, um Engpässe sinnvoll überbrücken zu können. Beim Lernen an Stationen wird ein Thema nicht «Versuch nach Versuch» aufbauend behandelt, da die Stationen ja in unterschiedlicher Reihenfolge durchlaufen werden.

**Beispiel** siehe 2.1.1.d) 2.1.1.e) 2.1.3.b) etc.  
2.2.3.a) 2.2.3.b) 2.2.7.a) 2.2.7.b)

**Joker:** 2.1.3.e)

## 3.9 Demonstrationsversuch

Demonstrationsversuche sind sinnvoll, wenn spezielle, eventuell langwierige und exakte Vorbereitungen für einen Versuch nötig sind, wenn dafür gefährliches, wertvolles oder sonst besonderes Material verwendet wird, wenn besonderes Geschick für das Gelingen vorausgesetzt werden muss, wenn mehrere oder sogar viele Assistierende bei der Durchführung helfen müssen, wenn aus dem Alltag selbstverständliche und gut bekannte



Phänomene diskutiert werden, wenn ein spezieller Einstieg geplant ist. Demonstrationsversuche der Lehrperson können auch als Lernanlass für exaktes Beobachten (z.B. bei Einstiegsexperimenten) und Beschreiben (z.B. zum Einüben und Durcharbeiten bereits bekannter Begriffe) dienen. **Beispiel** siehe 2.2.1. d)

### 3.10 Ein Forschungsvorhaben

Forschungsvorhaben eignen sich besonders gut für Projektwochen, schulhausinterne Spezialtage oder für langfristige Arbeiten. Wichtig ist:

- das vorherige Erarbeiten einer verbindlichen Fragestellung (evtl. verbunden mit einer Hypothese) und die Darlegung der persönlichen Motivation,
- das Setzen von «Meilensteinen» zur Kontrolle des Arbeitsfortschrittes und zum Informationsaustausch mit der Lehrperson, der Klasse oder anderen Teams und aller sonstiger Termine,
- die Absprachen zu Inhalt und Form der Dokumentation (Arbeitsjournal mit allen Irrungen und Ideenwandlungen, Fotos und andere Medien, Arbeitsskizzen, «Werkskizzen», Finanzielles) und der Präsentation.

**Beispiel** siehe 2.2.6. c)

### 3.11 Projekte

Projekte lassen ein breites inhaltliches und formales Spektrum zu. Sie eignen sich je nach dem durch die Lehrperson vorgegebenen oder durch die Beteiligten (z.B. die Klasse) entwickelten Rahmen auch für grössere Gruppen oder für die ganze Klasse. Es ist sinnvoll ähnlich vorzugehen wie unter «Forschungsvorhaben» beschrieben. Bei der Organisation von grösseren Projekten muss Platz sein für Einzelarbeit, Partnerarbeit, Teamarbeit und Arbeit mit der ganzen Klasse. Verbinden mit Projekten lassen sich Lehrausflüge, Kontaktaufnahmen mit ausserschulischen Experten und Expertinnen oder eine auf spezielle Projekte bezogene Zusammenarbeit mit Behörden, aber auch Umfragen und politisch sinnvolles Handeln. **Beispiel** siehe 2.2.9. b)

**Wichtig: Echte Projekte** entwickeln sich nur im gemeinsamen Tun aller Beteiligten und aus einer möglichst offenen Fragestellung. Leider sind dafür nur selten schulische Gefässe vorhanden. Solche lassen sich aber in Zusammenarbeit mit Kollegen und Kolleginnen des Schulhauses durchaus schaffen. Immer möglich sind aber thematisch und formal bereits eingegrenzte Projektschritte.

### 3.12 Ausserschulische Lernorte

Lernprozesse lassen sich an ausserschulischen Lernorten besonders gut initiieren (iLab-Besuch), mit dem gesellschaftlichen Umfeld verbinden (Besuch eines Instrumentenbauers), mit einer speziellen Thematik (Museen) beladen oder operativ (im Schulhaus unmögliche Experimente) erweitern. Es ist wichtig, solche Anlässe in das reguläre Unterrichtsgeschehen einzubinden, entsprechend gut vor- und nachzubereiten. Immer sollen damit explizite und später überprüfbare Lernziele verbunden sein. Die Abteile der Züge lassen sich übrigens sehr gut als Team-Arbeitsplätze gestalten. **Beispiel** siehe 2.2.3. c)

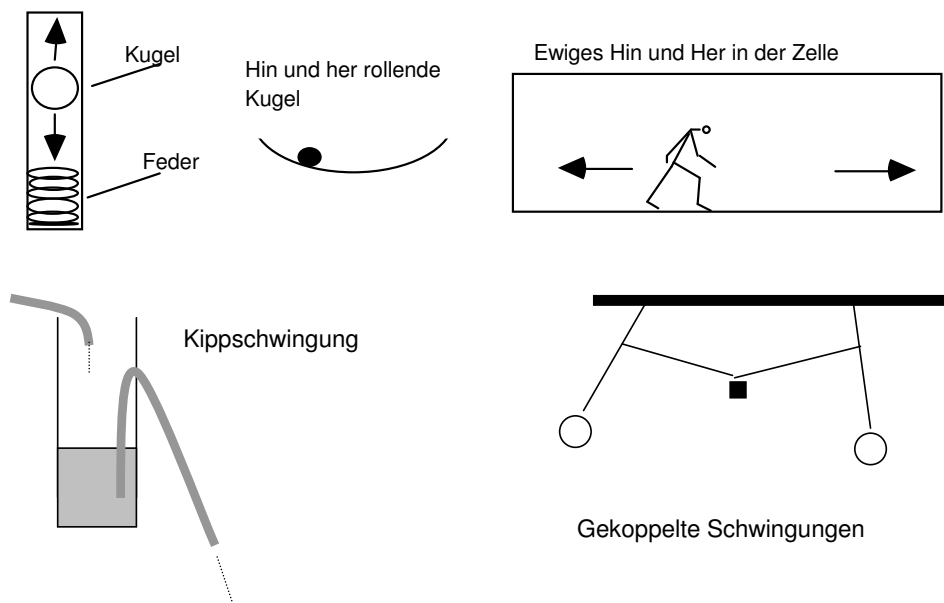
# 4. Theoretische Grundlagen und Hintergrund-Informationen

## 4.1. Schallerzeugung

### 4.1.1. Schwingungen als Alltagsphänomenen

«Ein periodisch wiederkehrender Bewegungsablauf heisst Schwingung.»

Diese Definition ist sehr offen und unpräzise. Muss der Bewegungsablauf immer genau gleich ablaufen? Sind periodische Ereignisse wie das Ticken einer Uhr Schwingungen? Sicher genügt diese Definition weitgehend den Anforderungen der Sek I. Trotzdem ist es reizvoll, Unterschiede zwischen verschiedenen schwingenden Systemen herauszuarbeiten.



### 4.1.2. Physikalische Definition

Schwingungen sind zeitlich periodische Bewegungen. Sie lassen sich durch Funktionen, die von der Zeit abhängig sind, beschreiben.

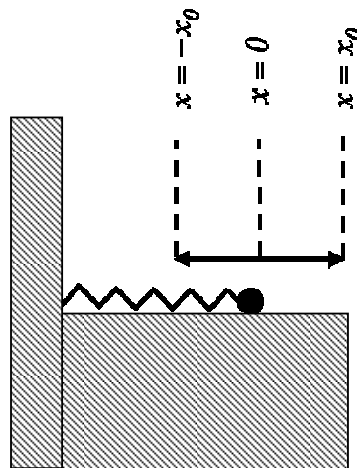
Ein wichtiger Spezialfall ist die **harmonische Schwingung**: Wenn ein Körper sich so bewegt wie die Projektion einer Kreisbewegung, schwingt er harmonisch. Harmonische Schwingungen lassen sich mathematisch einfach beschreiben.

*Mathematische Darstellung harmonischer Schwingungen mit Hilfe der Differentialrechnung: «Physik», Paul A. Tipler, Spektrum akademischer Verlag Heidelberg, 1994, S.379 ff.*

### Einfache mathematische Darstellung harmonischer Schwingungen (ohne Differentialrechnung)

Es soll gezeigt werden, dass die Schwingungszeit eines harmonisch schwingenden Körpers mit einfacher Algebra berechnet werden kann.

Ein Körper K mit der Masse  $m$  ist an einer reibungslos auf einem Tisch liegenden Schraubenfeder mit der Richtgrösse (Federkonstanten)  $D$  befestigt. Der Körper K befindet sich bei  $O$  in der stabilen Gleichgewichtslage. Wird er nach links oder nach rechts aus der Ruhelage entfernt, wirkt in beiden Fällen die rücktreibende Kraft  $F = -Dx$  auf ihn. Einmal, weil die Feder gespannt, im anderen, weil sie gestaucht ist. Das Minuszeichen bringt zum Ausdruck, dass die Vektoren  $F$  und  $x$  entgegengesetzt gerichtet sind.



An einer beliebigen Stelle  $x$  beträgt die potentielle Energie der Feder  $E_p = \frac{1}{2} Dx^2$ .

Die gesamte Energie des Systems ist gleich der potentiellen Energie in den Umkehrpunkten, also  $E = \frac{1}{2} Da^2$ , mit der Amplitude  $a = x_0$ .

Besitzt der Körper mit der Masse  $m$  an der Stelle  $x$  die Geschwindigkeit  $v$ , beträgt dort seine kinetische Energie

$$E_{kin} = \frac{1}{2} mv^2.$$

An dieser Stelle gilt nach dem Energiesatz:  $E = E_k + E_p$ , also  $E = \frac{1}{2} Da^2 = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} Dx^2$ .

Daraus ergibt sich: 
$$v = \sqrt{\frac{D}{m}(a^2 - x^2)} = \sqrt{\frac{D}{m}y^2}.$$

Bei 0 ist  $v$  am grössten, nämlich 
$$v_{max} = a\sqrt{\frac{D}{m}}.$$

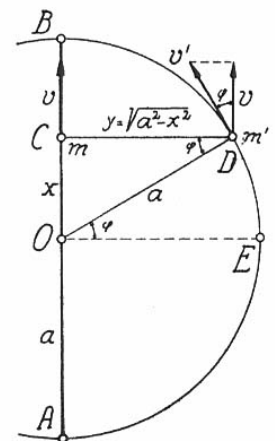
Die Bewegung des Körpers  $m$  kann als Projektion einer Kreisbewegung eines Körpers mit der Masse  $m'$  um  $O$  mit dem Radius  $a$  aufgefasst werden.

$y$  kann mit dem Satz von Pythagoras als  $\sqrt{(a^2 - x^2)}$  geschrieben werden.

Der rotierende Körper mit der Masse  $m'$  und der schwingende Körper mit der Masse  $m$  sollen immer auf der gleichen Linie  $CD$  parallel zu  $OE$  liegen und gleichzeitig in  $A$ , resp.  $B$  sein. Damit das so ist, muss die  $x$ -Geschwindigkeitskomponente von  $v'$  immer gleich gross sein wie

die Geschwindigkeit  $v$  des schwingenden Körpers, und es muss gelten  $\frac{v'}{v} = \frac{a}{y}$  (ähnliche Dreiecke!).

Mit  $v = \sqrt{\frac{D}{m}(a^2 - x^2)} = \sqrt{\frac{D}{m}y^2}$  von oben wird 
$$v' = a\sqrt{\frac{D}{m}} = konst.$$



Der Körper mit der Masse  $m'$  bewegt sich also gleichförmig mit der Geschwindigkeit  $v_{\max}$ .

Die Schwingungszeit der Feder stimmt also mit der Umlaufzeit  $T$  des Körpers mit der Masse  $m'$  überein. Aus der kinematischen Formel «Geschwindigkeit = Weg geteilt durch Zeit» folgt für die Bewegung des Körpers mit der Masse  $m'$

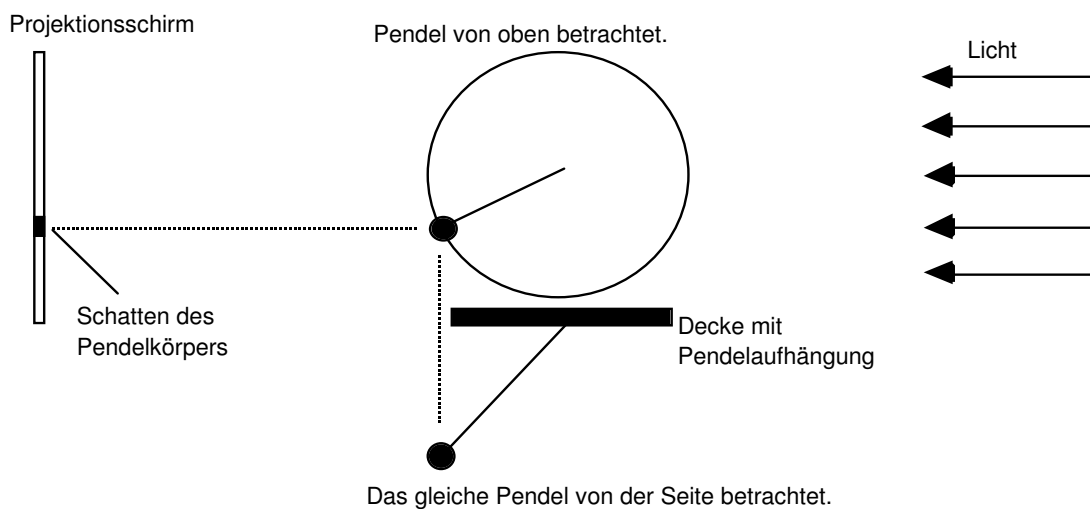
$$v = \text{Kreisumfang geteilt durch die Umlaufzeit } T, \text{ also } v_{\max} = \frac{2a\pi}{T}.$$

Die Schwingungszeit der Feder beträgt also  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}}$ . Sie ist unabhängig von der Amplitude  $a$ .

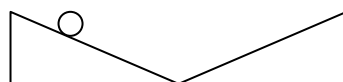
*Die Idee dieser Herleitung basiert auf Ausführungen im Lehrbuch der Physik, Seiler/Hardmeier, Polygraphischer Verlag Zürich.*

### Visualisierung der harmonischen Schwingung durch Projektion einer Kreisbewegung

Ein an der Decke hängendes Pendel wird so angestossen, dass der Pendelkörper von oben betrachtet einen Kreis beschreibt. Die Bewegung des Pendelkörpers wird als Schatten auf einen Schirm projiziert. Dieser Schatten schwingt hin und her. Eine Schwingung mit dieser Gesetzmässigkeit heisst «harmonisch».



Harmonische Schwingungen entstehen, wenn die Rückstellkraft proportional zur Auslenkung des schwingenden Körpers aus der Ruhelage, also proportional zur Elongation ist. Für solche Systeme gilt das lineare Kraftgesetz. Im Zusammenhang mit elastischen Körpern handelt es sich dabei um das Gesetz von Hooke. Wenn z.B. ein Körper durch eine konstante ortsunabhängige Kraft in die Ruhelage zurückgezogen wird, schwingt er nicht harmonisch, wenn er losgelassen wird.



Die Kugel bewegt sich nicht harmonisch, da die Hangabtriebskraft immer den gleichen Betrag hat.

Wird für eine harmonische Schwingung die Elongation versus die Zeit grafisch dargestellt, entsteht eine Sinuskurve. Ebenfalls eine Sinuskurve entsteht, wenn die  $y$ -Koordinate eines auf einer Kreisbahn um den Koordinatenursprung rotierenden Punktes versus Phasenwinkel abgetragen wird. Der Phasenwinkel ist der Winkel zwischen der  $x$ -Achse und dem zum rotierenden Punkt gehörigen Radiusvektor der Kreisbahn.

Wenn im Unterricht das Gesetz von Hooke schon behandelt worden ist, kann darauf hingewiesen werden, dass elastische Körper, deren Auslenkung aus der Ruhelage proportional zur Rückstellkraft ist, harmonisch schwingen. Das ist so bei Blattfedern und Schraubenfedern oder einer Flüssigkeit in einem U-Rohr. Beim Fadenpendel gilt das lineare Kraftgesetz nur für kleine Amplitude hinreichend genau.

**Schallerzeugende Körper schwingen harmonisch. Sie heissen deshalb auch harmonische Oszillatoren.**

#### Bezug zur Wissenschaft und Forschung

Schwingungen sind wichtig in fast allen physikalischen Gebieten. Der harmonische Oszillator ist eines der wichtigsten Modelle in der Physik. Mit ihm können z.B. auch Probleme aus der Quantenwelt (Atome, Moleküle) angegangen werden.

### 4.1.3. Einige wichtige Begriffe

#### Frequenz $f$ :

Anzahl Schwingungen pro Sekunde gemessen in Hertz (1 Hertz = 1 pro Sekunde =  $1/s = s^{-1}$ ).

#### Schwingungsdauer $T$ (auch Periode genannt):

Zeit für eine Schwingung (einmal hin **und** her).  $T$  wird in Sekunden (s) gemessen.

Es gilt  $f = 1/T$ .

*Das Verständnis des Zusammenhangs zwischen  $f$  und  $T$  verlangt etwas Abstraktionsvermögen. Schwierigkeiten treten meistens dann auf, wenn  $T > 1$  s ist.*

**Amplitude  $a$ :** Weg eines schwingenden Körpers von der Nulllage (Lage, als er noch ruhte) bis zu seiner grössten Abweichung von dieser Lage.

Hinweis: Es geht hier um die Länge des zurückgelegten Weges und nicht um die Distanz des oszillierenden Körpers (Schwinger) zur Nulllage. In vielen Fällen genügt es aber, diese Distanz zu messen (z.B. bei Fadenpendeln mit kleiner Amplitude).

Die Frequenz  $f$  und die Amplitude  $a$  sind bei harmonischen Schwingungen unabhängig von einander. Das ist auch der Grund dafür, dass sich die Frequenz bei schwach gedämpften Schwingungen nur wenig ändert.

Im Unterricht auf Stufe Sek I kann auf Begriffe wie «Phasenwinkel», «Phasenverschiebung», «Elongation» verzichtet werden.

## 4.1.4. Schallerzeugung und Eigenschwingungen

Schall entsteht, wenn ein schwingender Körper in einem elastischen (fest, flüssig oder gasförmig) Medium wellenartige sich ausbreitende Störungen erzeugt, die durch ein Messinstrument oder im Falle von Hörschall über ein biologisches Organ wahrgenommen werden können.

### Anregung schwingfähiger Systeme

Schall ist mit mechanischen Schwingungen von Schallerzeugern verbunden. Diese werden angeregt, wenn die Moleküle eines Schallerzeugers, durch eine äussere Kraft aus ihrer Gleichgewichtslage herausbewegt und dann sich selbst überlassen werden. Die dabei entstehenden Druckschwankungen durchlaufen den Schallerzeuger, werden an seiner Grenze reflektiert und können sich durch gegenseitige Überlagerung zu einer stehenden Welle ausbilden. Der Schallerzeuger schwingt dann «im Takte» dieser Welle mit einer von seiner Geometrie abhängigen «Eigenschwingung». Weil dabei Energie an die Umgebung abgegeben wird, sind die Schwingungen gedämpft und müssen dauernd neu angeregt werden, damit der Körper weiter schwingt.

In solche «Eigenschwingung» versetzen lassen sich feste Körper, Flüssigkeiten und Gase mit begrenztem Volumen.

### Eigenschwingung eines schwingenden Systems

Die Frequenzen eines schwingenden Systems sind durch die Anordnung und Beschaffenheit seiner einzelnen Teile bestimmt. Jedes System hat seine charakteristischen Schwingungsfrequenzen, wenn es frei und ungezwungen schwingen kann. In der Regel besitzt eine solche Anordnung mehrere diskrete Eigenschwingungsfrequenzen.

Wenn Pendel oder andere schwingfähige Körper kurz angestossen werden, beginnen sie in ihrem eigenen «Takt» zu schwingen. Solche freie, nicht erzwungene Schwingungen heissen **Eigenschwingungen**. Die Eigenschwingungsfrequenz entspricht der Anzahl Schwingungen pro Sekunde, die eine Eigenschwingung besitzt.

Die Eigenschwingungsfrequenz eines **Fadenpendels** ist durch die Fadenlänge, nicht aber durch die Amplitude (sofern diese hinreichend klein ist) und auch nicht durch die Masse des Pendelkörpers (Schwinger) bestimmt. Streng genommen muss auch die Geometrie und Masse des Fadens oder der Aufhängung berücksichtigt werden

Die Eigenschwingungsfrequenz einer **Schraubenfeder** wechselt je nach Federhärte und Masse des Schwingers, der durch die Feder bewegt wird. Auch hier muss die Masse der Feder und die Art ihrer Befestigung berücksichtigt werden.

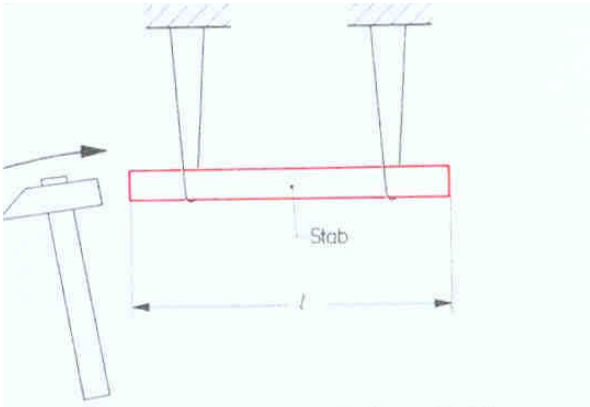
Schraubenfedern können

- longitudinal (längs),
- transversal (quer) und
- torsal (drehend) schwingen.

Bei **Stäben** (Blattfedern, Zungen) hängt die Grund-Eigenschwingungsfrequenz der Biegeschwingung vom Material und der Länge des schwingenden Teils des Stabes ab. Eine wichtige Rolle spielt die Art der Einspannung (einseitig, beidseitig oder in einem Schwingungsknoten zwischen den Enden).

Stäbe können angeregt werden zu:

- Biegeschwingungen (Transversalschwingung),
- Dehnschwingungen (in Längsrichtung, also Longitudinalschwingung)
- Drehschwingungen (Torsionsschwingung).



Anregung eines an Fäden aufgehängten Stabes zu Dehnschwingungen



Anregung eines einseitig eingespannten Stabes zu einer Torsionsschwingung durch Ausüben eines Drehmomentes um die Stabachse.



Biegeschwingung einer Blattfeder

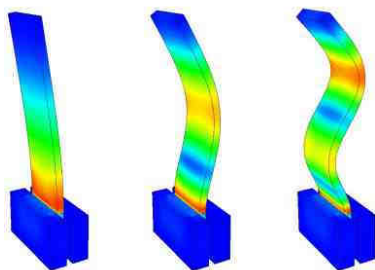
Bild oben:  
*leifi.physik.uni-muenchen.de*

Bilder Links:  
*Technische Akustik, Ivar Veit, Vogel-Verlag*

Bei **Saiten** hängt die Grundschwingungsfrequenz (die kleinste existierende Eigenschwingungsfrequenz) von der Länge, der Zugspannung und der Dichte ab. Die Frequenz ist indirekt proportional zur Länge und proportional zur Wurzel des Quotienten aus Zugspannung und Dichte des Saitenmaterials.

### Oberschwingungen

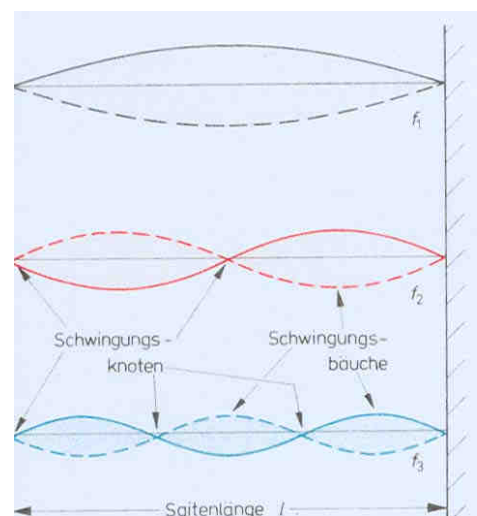
Bei der Biegeschwingung von Stäben und bei Saiten können neben der Grundschwingung auch **Oberschwingungen** auftreten. Diese sind ebenfalls Eigenschwingungen, weisen aber eine höhere Frequenz auf als die Grundschwingung.



Schwingungsformen einer einseitig eingespannten Blattfeder

Bild oben:  
[http://www.kip.uni-heidelberg.de/ungeordnete\\_fk/Bilder/reed\\_modes1-3.gif](http://www.kip.uni-heidelberg.de/ungeordnete_fk/Bilder/reed_modes1-3.gif)

Bild rechts:  
*Technische Akustik, Ivar Veit, Vogel-Verlag*



Seitenansicht einer transversal schwingenden Saite. oben: Grundschwingung  
Mitte: erste Oberschwingung  
unten: zweite Oberschwingung

### Stimmgabelschwingung

Physikalisch gesehen ist die Stimmgabel ein auf beiden Seiten offener Biegeschwinger, der in einem Schwingungsbauch aufgestützt ist. Die Grundschwingung (rechts im Bild) ist sehr frequenzstabil. Oberschwingungen (wie links im Bild) werden sehr rasch gedämpft. Mit Stimmgabeln kann deshalb ein fast reiner Sinuston erzeugt werden.

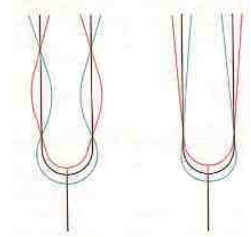


Bild: Technische Akustik, Ivar Veit, Vogel-Verlag

### Einige Formeln

Fadenpendel der Länge  $l$  und mit  $g = 9.81 \text{ m/s}$ :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

Schraubenfeder der Masse  $m$  und Federkonstante  $D$ :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}}$$

Blattfeder der Länge  $l$  einseitig fest:

$$T \propto l^2$$

Stabpendel der Länge  $l$  (fester Stab an einem Ende aufgehängt):

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{2l}{3g}}$$

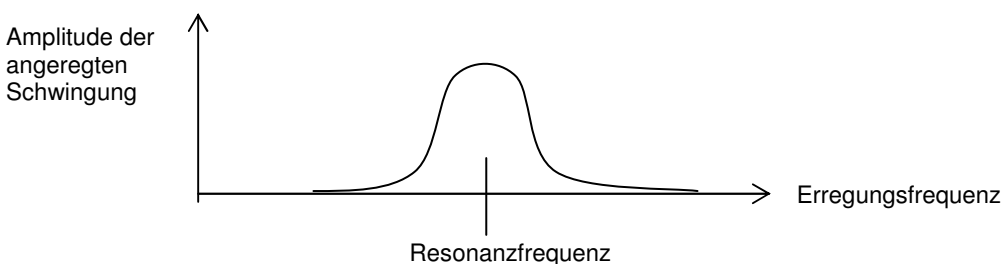
### Anregung von Schwingungen

Durch periodische Energiezufuhr im Takte der Eigenfrequenz kann eine Schwingung angeregt werden. Eine Kinderschaukel wird durch Anstossen im richtigen Takt aufgeschaukelt. Stimmt die Anregungsfrequenz mit der Eigenfrequenz überein, wird von **Resonanz** gesprochen: «Der angeregte schwingende Körper resoniert.» Im Resonanzfall wird die Amplitude der Schwingung immer grösser, bis zur Resonanzkatastrophe. Die Resonanzkatastrophe tritt ein, wenn die zugeführte Energie so gross wird, dass das ursprüngliche Schwingungssystem zerstört wird, ausser es werde durch die Energiezufuhr so verändert, dass es «aus dem Takt fällt». Diese mildere Form der «Zerstörung» ist natürlich nicht so spektakulär wie der Einsturz der Tacoma-Hängebrücke, die wegen regelmässiger Windstösse in der Resonanzkatastrophe endete. Siehe:

[http://www.bernd-nebel.de/bruecken/4\\_desaster/tacoma/tacoma.html](http://www.bernd-nebel.de/bruecken/4_desaster/tacoma/tacoma.html)  
und <http://www.youtube.com/watch?v=j-zczjXSxnw>

Resonanz spielt in Technik und Umwelt eine grosse Rolle: Fahrende Lastwagen oder Züge lassen Häuser resonieren. Motoren, insbesondere wenn sie schlecht ausgewuchtet sind, erzeugen Erschütterungen. Dabei spielen auch Kreiselp Probleme eine Rolle. Sturmböen versetzen Masten und Bäume in Schwingungen. Eine starke Windböe kann eine durch Schwingung aus der Vertikalen stark ausgelenkte Baumspitze bei maximaler Amplitude erfassen und den Baumstamm ausdrehen, wenn nicht schon vorher eine Resonanzkatastrophe durch Bruch des Stammes eingetreten ist. Stimmt die Anregungsfrequenz nicht mit der Eigenfrequenz überein, handelt es sich um eine erzwungene Schwingung. Ihre Amplitude ist umso schwächer, je weniger die Anregungsfrequenz mit der Eigenfrequenz übereinstimmt.

Grafisch lässt sich das mit einer Resonanzkurve darstellen:





## Chladnifiguren

Eigenschwingungen treten auch auf Flächen und bei Körpern auf. Bekannt sind die Chladnifiguren auf Metallplatten, die durch einen Geigenbogen oder mit einem an einen Tonfrequenzgenerator angeschlossenen Lautsprecher angeregt werden können.



Quelle:

[http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web\\_ph12/versuche/10chladni/chladni.htm](http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/versuche/10chladni/chladni.htm)



Quelle:

[http://www.weltderphysik.de/\\_img/article\\_large/20081102\\_ChladnischeKlangfiguren\\_Stoeckmann\\_rdx\\_240x300\\_80.jpg](http://www.weltderphysik.de/_img/article_large/20081102_ChladnischeKlangfiguren_Stoeckmann_rdx_240x300_80.jpg)

**Ernst Florenz Friedrich Chladni** wurde 1756 in Wittenberg geboren. Nach dem Schulbesuch in Grimma studierte er auf Drängen des Vaters Philosophie und Rechtswissenschaften in Wittenberg und Leipzig. Nach dem Tode des Vaters wandte er sich den Naturwissenschaften zu und strebte eine Mathematik-Professur in Wittenberg an. Dieses Ziel erreichte er nicht. In der Folge machte er sich durch selbständige wissenschaftliche Leistungen einen Namen. Er begründete die experimentelle Akustik und entdeckte die nach ihm benannten chladnischen Klangfiguren. Auf Vortragsreisen erzeugte er Töne mit dem von ihm entwickelten Musikinstrument Euphon (Glasstäbe unterschiedlicher Länge). Außerdem erkannte Chladni, dass Meteoriten keine irdischen atmosphärischen Erscheinungen, sondern Himmelskörper sind. 1819 erschien sein Buch «Über Feuermeteor». Er gilt als Begründer der Meteoritik. Er starb am 1827 in Breslau.

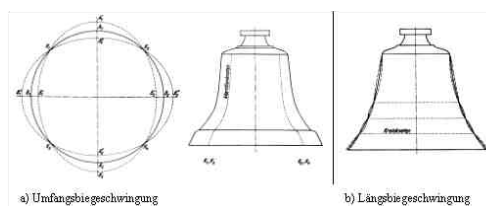
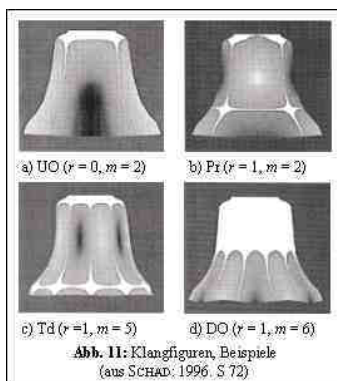
### Die Bedeutung für die Atomphysik:

Mit Chladnifiguren kann das Verhalten von Wellen in einem abgegrenzten mehr als eindimensionalen Raum gezeigt werden. Die Klangbilder lassen sich mit sich überlagernden zweidimensionalen Wellen erklären. In Analogie zu akustischen Eigenschwingungen besitzen Atome und andere Quantenobjekte Energie-Eigenwerte, die ebenfalls von den räumlichen Randbedingungen abhängig sind.

Auch Glocken können zu Schwingungen angeregt werden, die nur Teile ihres Volumens in Bewegung versetzen.

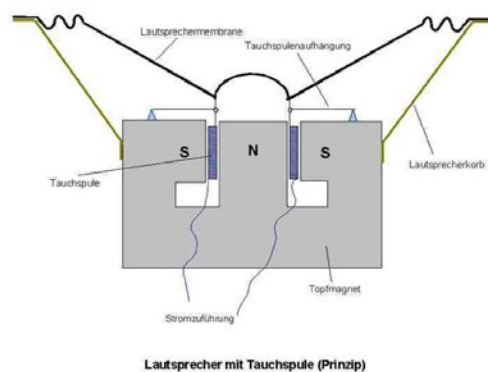
Bilder aus und weitere Erklärungen unter:

[http://www.kirchenglocken.de/Kirchenglocken\\_de/Glocken/Grundlagen/Schwingung/schwingung.html](http://www.kirchenglocken.de/Kirchenglocken_de/Glocken/Grundlagen/Schwingung/schwingung.html)

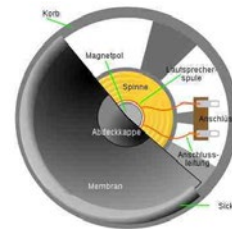


## Lautsprechermembrane

Im iLab wird Schall von 17000 Hz mit Piezokristallen erzeugt. Schall kann auch mit dynamischen Lautsprechern erzeugt werden. Ein Lautsprecher wandelt niederfrequente elektrische Signale in Schall um. Dazu wird eine Spule beweglich über einen Magnetpol gelegt. An ihr wird eine Membran (meistens ein trichterförmiger, konzentrisch zulaufender dünner Karton oder ein weiches Polymer mit ringförmigem Wulst am äusseren Rand und nach aussen gewölbtem Zentrum) befestigt. Der Rand der Membran wird an der Lautsprecherbox befestigt. Die elektrischen Wechselstromsignale aus dem Verstärker bewegen die «Tauchspule» mit der «Musikfrequenz» (hier im Bild) auf und ab. Dadurch wird die Membran in Schwingungen versetzt. Die Membran sollte möglichst bei jeder Frequenz so in Schwingung versetzt werden können, dass nicht einzelne Töne bevorzugt oder benachteiligt werden. Es sollten also keine frequenzabhängigen Teilschwingungen (Schwingungsmuster) auf der Membran entstehen. Der abgestrahlte Schall ist hauptsächlich von der Membranschnelle abhängig, der Schnelligkeit, mit der die Membran (oder Teile davon) schwingen und Luftdruckschwankungen hervorrufen.



Suchbegriffe: wikipedia  
Datei dynamischer Lautsprecher



Suchbegriffe: wikipedia  
Lautsprecher Schema Front

## 4.1.5. Gedämpfte Schwingungen

Schwingende Körper können ihre Energie an die Umgebung abgeben. Sie schwingen dann immer schwächer, ohne dass sich die Frequenz der einzelnen Eigenschwingungen dabei stark ändert. Wir nennen das **Dämpfung der Schwingung**. Oberschwingungen «verklingen» in der Regel rascher als die Grundschiwingung. Wenn die Dämpfung nicht zu stark ist, ändert sich die Tonhöhe beim «Verklingen» nicht merklich.

Die mathematische Behandlung gedämpfter Schwingungen setzt Kenntnisse im Umgang mit Differenzialgleichungen voraus. Am einfachsten zu behandeln ist der Fall, wenn sich die Reibungskraft proportional zur Geschwindigkeit des oszillierenden Körpers verhält. Die Amplitude der Schwingung nimmt dann exponentiell mit der Zeit ab, d.h. die Amplitude halbiert sich immer nach gleich langen Zeiträumen. Bei der so genannten **kritischen Dämpfung** kehrt das System ohne Schwingungen in den Ruhezustand zurück.

In sehr hohen Gebäuden werden zur kritischen Schwingungsdämpfung riesige Tilgerpendel eingebaut.

### Mitteilung im Handelsblatt vom 31.12.04:

Höchster Wolkenkratzer der Welt eingeweiht. In dem 1,8 Milliarden US-Dollar teuren Wolkenkratzer soll ein 660 Tonnen schweres Pendel, das an armdicken Stahlseilen zwischen dem 87. und 91. Stock aufgehängt ist, starke Schwankungen dämpfen. Wie Bambus im Wind soll «Taipeh 101» mit dem größten Schwingungsdämpfer der Welt Naturgewalten trotzen und dabei mehr als einen Meter schwanken können. Die Insel, deren Erde rund 200 Mal im Jahr bebt, liegt an der Nahtstelle der eurasischen und philippinischen Kontinentalplatten. 1999 kamen bei einem schweren Erdbeben in Taiwan 2400 Menschen ums Leben.

Siehe auch:

<http://www.abenteuerwissen.zdf.de/ZDFde/inhalt/15/0,1872,3986447,00.html>

## 4.2 Schallausbreitung – vom Schallerzeuger zum Schallempfänger

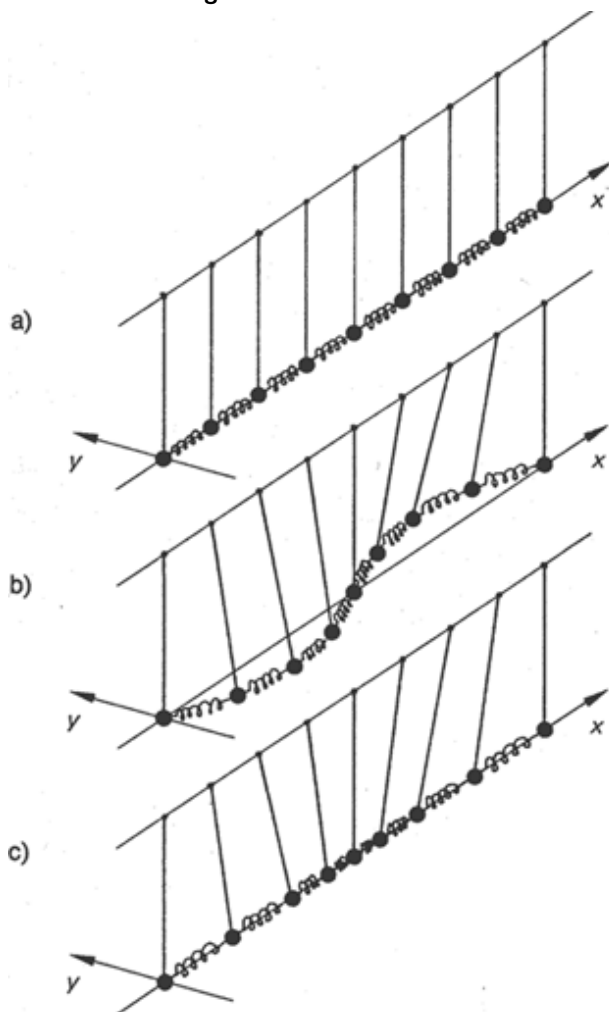
### 4.2.1 Zur Wellenlehre in einem Trägermedium

Eine lokale «Störung», d.h. die zeitliche Veränderung physikalischer Größen an einem Ort kann sich im Raum fortpflanzen. Handelt es sich dabei um eine periodische Veränderung, entsteht eine Welle, deren Front sich mit einer charakteristischen Geschwindigkeit vom Entstehungsgebiet weg bewegt.

Das gilt sowohl für elektromagnetische Schwingungen, die sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, als auch für mechanische Schwingungen, die auf ein Trägermedium angewiesen sind. In einem solchen Medium (Kontinuum) sind mehrere (harmonisch) schwingende Systeme (Materieteilchen) elastisch miteinander gekoppelt. Wird eines davon aus der Ruhelage ausgelenkt und losgelassen, überträgt sich seine Schwingung verzögert auf die angekoppelten Systeme. Je weiter ein Materieteilchen vom Erreger entfernt ist, desto später wird es von dieser Bewegung erfasst. Dabei wird Energie, aber keine Materie transportiert.

Wellen können sich als **Längswellen (Longitudinalwellen)** und als **Querwellen (Transversalwellen)** ausbreiten. Siehe dazu die Animation unter <http://www.schulphysik.de/java/physlet/applets/welle01.html>, sowie die folgende Abbildung. In Festkörpern können sich Längswellen auch als Torsionswellen ausbilden.

#### Modellvorstellung



a) Ruhelage

b) Querschwingung (Transversalwelle):  
Die Teilchen schwingen quer zur Ausbreitungsrichtung  $x$ .

c) Längsschwingung (Longitudinalwelle):  
Die Teilchen schwingen vor und zurück in der Ausbreitungsrichtung  $x$ .

Bei einer Querwelle entsteht aufgrund der Schwingung der Teilchen quer zur Ausbreitungsrichtung eine Wellenlinie mit **Bergen und Tälern** (in y-Richtung), bei einer Längswelle kommt es aufgrund der Schwingung der Teilchen in Längsrichtung (in x-Richtung) zu **Dichteschwankungen**.

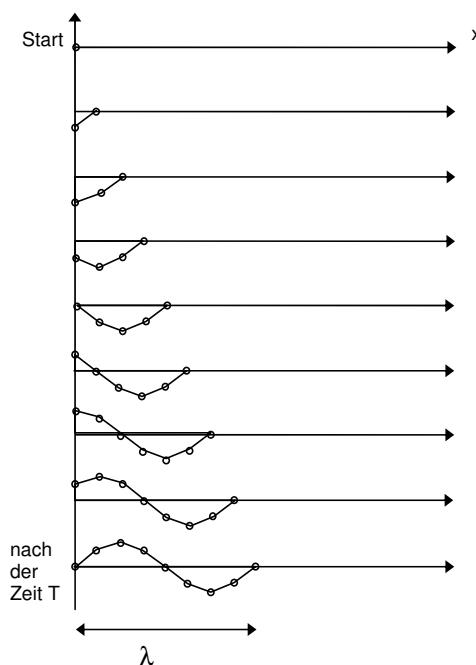
Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass beide Wellenarten weitgehend mit den gleichen Begriffen charakterisiert werden können. Die *Ausbreitungsgeschwindigkeit*  $c$  ist die Geschwindigkeit, mit welcher sich die Wellenfront in Richtung der x-Achse fortbewegt.

**Die Wellenlänge  $\lambda$**  entspricht dem Abstand benachbarter Orte mit gleicher Phase (Elongation oder Auslenkung aus der Ruhelage).

**Frequenz  $f$**  heisst die Anzahl Schwingungen pro Sekunde an einem Ort, den die Welle durchläuft. Sie wird durch die Erregerfrequenz bestimmt.

Nach jeder Schwingung des Erregers hat sich die Welle um eine Wellenlänge weiter bewegt. Schwingt der Erreger mit der Frequenz  $f$  bewegt sich die Welle (pro Sekunde) um  $f \cdot \lambda$ , also mit der Geschwindigkeit  $c = f \cdot \lambda$  oder wegen  $f = 1/T$  mit der Geschwindigkeit  $c = \lambda/T$ .

**T** heisst **Schwingungsdauer (auch Periode)** des Erregers einer Welle.



Die durch eine einmalige harmonische Schwingung erzeugte Störung des schwingenden Teilchens bei  $x=0$  wandert in der Zeit  $T$  um die Strecke  $\lambda$  weiter.

Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit**  $c$  der Welle beträgt also  $\lambda/T$

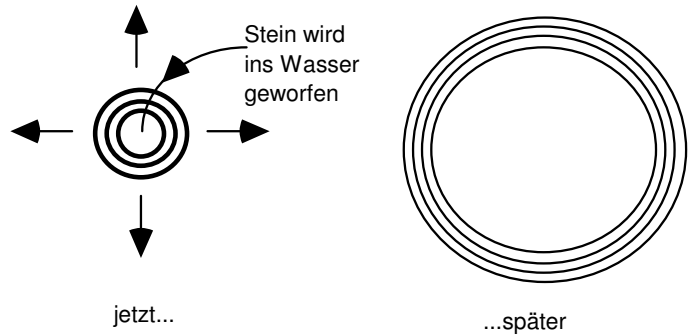
$$c = \lambda/T = \lambda f$$

### Beispiele für Schwingungen

Trägermedium	Kopplung	schwingendes System	Wellenart
unelastisches Seil	Molekularkräfte	Moleküle	transversal
elastische Saite	Molekularkräfte	Moleküle	transversal und longitudinal
Luft	Molekularkräfte	Moleküle	longitudinal (Druckwelle, Schall)
Flüssigkeiten	Kohäsion Oberflächenspannung	Moleküle	Im Innern longitudinal transversal nur als Oberflächenwellen
Festkörper (Stab, Platte ...)	Gitterkräfte	Atome und Moleküle des Kristallgitters	transversal und longitudinal
Vakuum	elektromagnetische Kräfte	Felder	transversal (Licht, Radiowellen...)

Mechanische Wellen entstehen also, wenn ein «Kontinuum» (Wasser, Luft oder Festkörper) an einer Stelle während einer gewissen Zeit periodisch gestört wird, und sich diese Störungen in ihm oder auf ihm ausbreiten.

Beispiel: Das Kontinuum kann Wasser sein, auf dessen Oberfläche wir einen Stein werfen. Die kurze Störung erzeugt einige Kreiswellen, die sich ausbreiten. Natürlich «verdünnt» sich dabei die ursprüngliche Energie immer mehr.

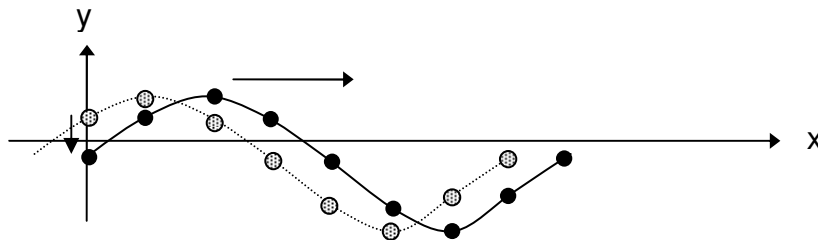


Die Störung (z.B. von einem ins Wasser geworfenen Stein) breitet sich auf der Wasseroberfläche aus.

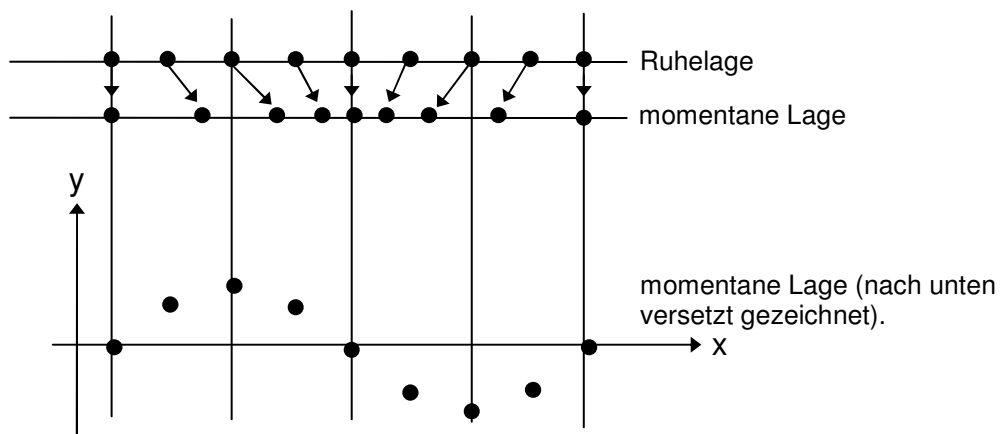
## 4.2.2 Darstellung von Wellen

### Darstellung von Transversalwellen

Wir wählen in regelmässigen Abständen auf der x-Achse je einen der schwingenden Körper des Kontinuums und zwar zum exakt gleichen Zeitpunkt. Auf der y-Achse tragen wir ein, wie weit er in diesem Augenblick von seiner Ruhelage entfernt ist (Elongation). Wir erhalten dadurch ein Momentanbild der Welle. Dieses Bild sieht normalerweise in jedem Augenblick anders aus. Zeigen wir solche Momentanbilder rasch nacheinander, «wandert die Welle».



### Darstellung von Longitudinalwellen



Der momentane Abstand von der Ruhelage wird für jede schwingende Masse als x-Koordinate über ihrer Ruhelage eingezeichnet. Longitudinale Wellen können also wie die transversalen Wellen dargestellt werden.

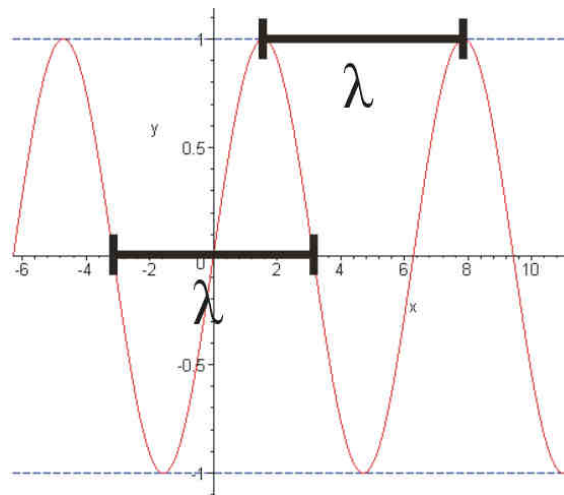
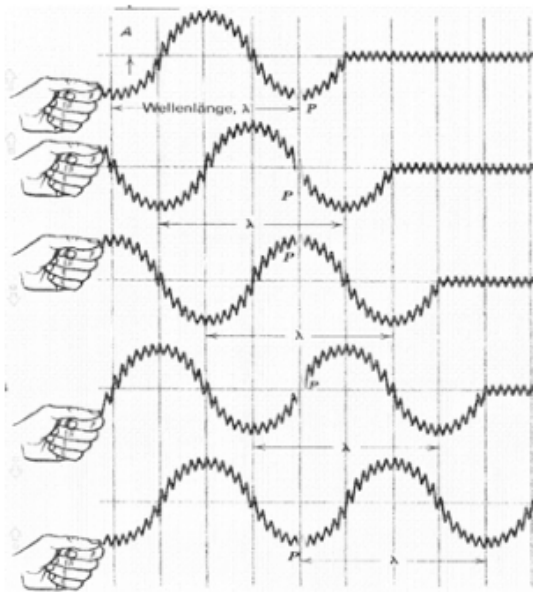
Wenn die einzelnen Teilchen harmonisch schwingen und die Kopplung elastisch ist, sind die Momentanbilder von Wellen sinusförmig.

In der Umgebung nicht ausgelenkter Teilchen entsteht abwechselnd eine «Verdichtung» oder eine «Verdünnung». Verdichtung heisst Druckerhöhung, Verdünnung bedeutet Unterdruck im Vergleich zur ungestörten Situation. Der Druck ist da am kleinsten, wo sich die schwingenden Teilchen am schnellsten bewegen, nämlich dort, wo sie sich durch die Ruhelage bewegen.

### 4.2.3 Stehende Wellen

Wird ein Kontinuum dauernd und periodisch an der gleichen Stelle gestört, entsteht eine sich von diesem Ort immer weiter ausbreitende Welle.

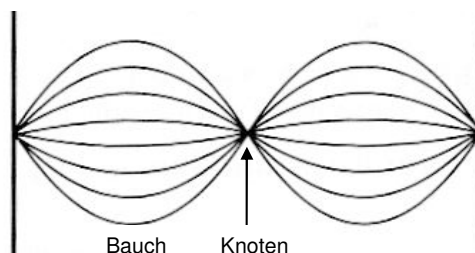
**Beispiel:** Das Ende eines Seils wird an einer Mauer befestigt. An einem Handgriff wird das freie Ende nun rasch hin und her bewegt. Dabei entstehen «Berge und Täler», die vom Erreger weglaufen. Die Welle wird am festen Ende gespiegelt und läuft auf dem Seil zurück. Die weg- und rücklaufenden Wellen überlagern sich (linkes Bild).



Die Länge eines vollständigen Wellenzuges heisst Wellenlänge und wird vielfach mit  $\lambda$  bezeichnet (rechtes Bild).

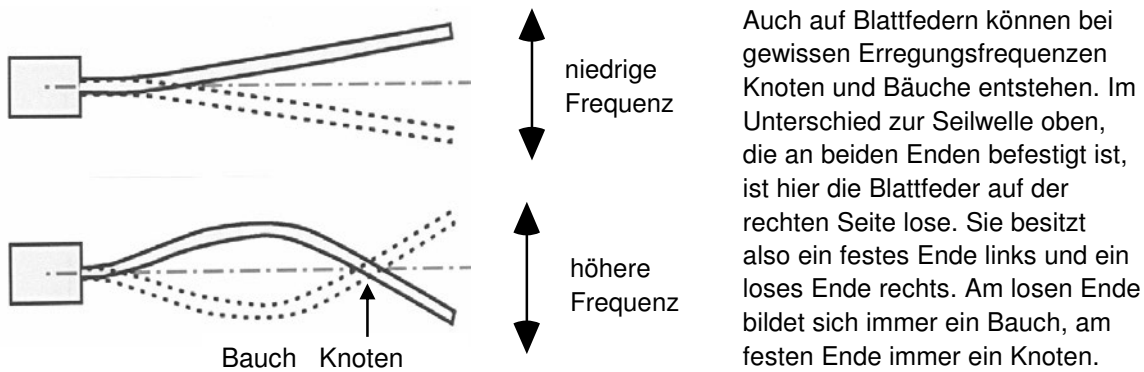
Stehende Wellen gibt es nur, wenn die Wellenfrequenz so gewählt wird, dass der Abstand zwischen einem Knoten und einem Bauch der Welle auf dem Wellenträger (Seil, Blattfeder,...) mehrmals genau hineinpasst.

Stehende Welle eines an beiden Enden befestigten Seils:



### Oberschwingungen (vgl. auch Kapitel 4.1.4)

Wellen, welche sich auf einem Körper (wie auf dem Seil oder auf der unten skizzierten Blattfeder) ausbreiten, sind auf ihm wie gefangen. Sie bewegen sich von einem Ende zum anderen. Bei der «richtigen» Frequenz bildet sich eine Welle mit still stehenden «Knoten» und «Bäuchen», also eine stehende Welle. Der Körper schwingt dann gerade mit einer seiner Eigenfrequenzen. Im Folgenden werden zwei Eigenschwingungen einer Blattfeder beschrieben, die Grundschiwingung und die erste Oberschwingung:

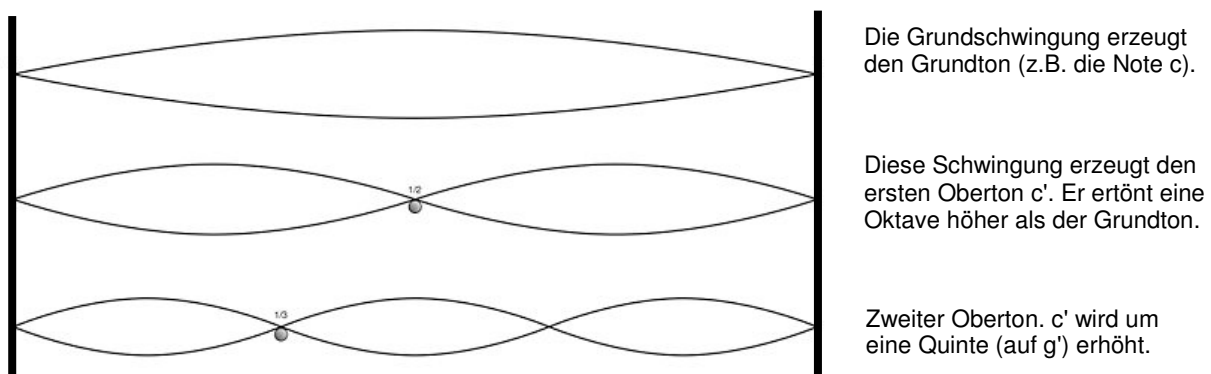


Im unteren Bild schwingt die Blattfeder schneller als im oberen Bild. Auf dieser Blattfeder können sich ohne weiteres auch mehrere stehende Knoten und Bäuche bilden, wenn sie stark genug oder mit einer noch höheren Frequenz zum Schwingen angeregt wird.



**Hinweis:** In der Akustik heisst der Ton, der mit der langsamsten Eigenfrequenz eines Schallerzeugers erzeugt wird, Grundton (entspricht der Grundschiwingung). Die schnelleren Eigenschwingungen produzieren Obertöne (entsprechen Oberschwingungen).

Auch eine auf beiden Seiten eingespannte Saite kann zu «höheren» Eigenschwingungen angeregt werden:

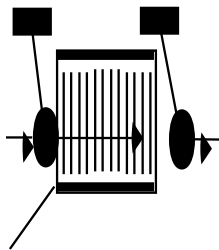


## 4.2.4 Schallwellen in der Luft

Mit einem Paukenschlag lässt sich eine kurze Folge von periodischen Druckstößen erzeugen. Diese breiten sich in der Luft aus und können mit dem Gehör wahrgenommen werden. Auf eine ähnliche Art und Weise breitet sich ein Knall in der Luft aus. Im Gegensatz zum Paukenschlag handelt es sich bei einem Knall um ein Gemisch aus sehr vielen Schwingungen unterschiedlicher Frequenzen und Amplituden.

**Hinweis:** Die Membran einer Pauke erzeugt beim kräftigen Anschlagen neben der sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreitenden Druckstörung auch einen Luftstrom mit kreisförmigen Luftwirbeln («Zigarettenringe»). Experimentell lassen sich solche Wirbel zeigen, wenn auf den Boden einer mit Rauch gefüllten offenen Petflasche ein Hammerschlag geführt wird. Mit diesem Luftstrom, der viel langsamer ist als die Schallgeschwindigkeit, kann tatsächlich eine weit entfernte Kerze gelöscht werden oder dort ein kurzer Luftstoss auf der Haut erzeugt werden.

### Modellversuch zur Schallübertragung durch Luft



Das Pendel stößt auf die Folie  
 Der ankommende Schall bewegt das Pendel  
 Die Störung bewegt sich von links nach rechts durch die Luft.

Störungen in der Luft breiten sich bei Zimmertemperatur mit etwa 340 m/s aus.  
 (vgl. Kapitel 4.2.6)

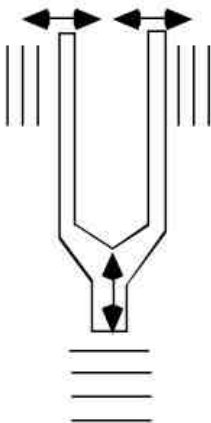
beidseitig mit Folie bespannte Böhse ohne Boden und Deckel

Wir können durch rasches Hin- und Herbewegen eines Gegenstandes mehr oder weniger rasche periodische Druckschwankungen in der Luft erzeugen (z.B. durch Anschlagen der Zinken einer Stimmgabel, durch Schlagen auf eine aufgespannte Haushaltsfolie oder eine Trommel, durch Zupfen einer eingespannten Saite). Solche in rascher Folge erzeugte Druckschwankungen können sich in der Luft in allen Richtungen ausbreiten und eine Druckwelle bilden. Hörbare Druckwellen heissen Schallwellen.

## 4.2.5 Resonanz durch Schallübertragung in Luft

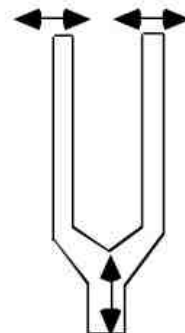
Schallwellen lassen sich in allen Gasen, in festen Körpern oder in Flüssigkeiten erzeugen. Im Vakuum kann sich der Schall hingegen nicht ausbreiten.

Schallenergie abstrahlende Stimmgabel



Die Stimmgabel erzeugt Schallwellen in der Luft, die je nach Raumrichtung verschieden stark sind.

Schallenergie aufnehmende, resonierende Stimmgabel



Wenn die rechte Stimmgabel die gleichen Eigenfrequenzen hat wie die linke, wird sie durch die ankommenden Schallwellen zum Schwingen angeregt.

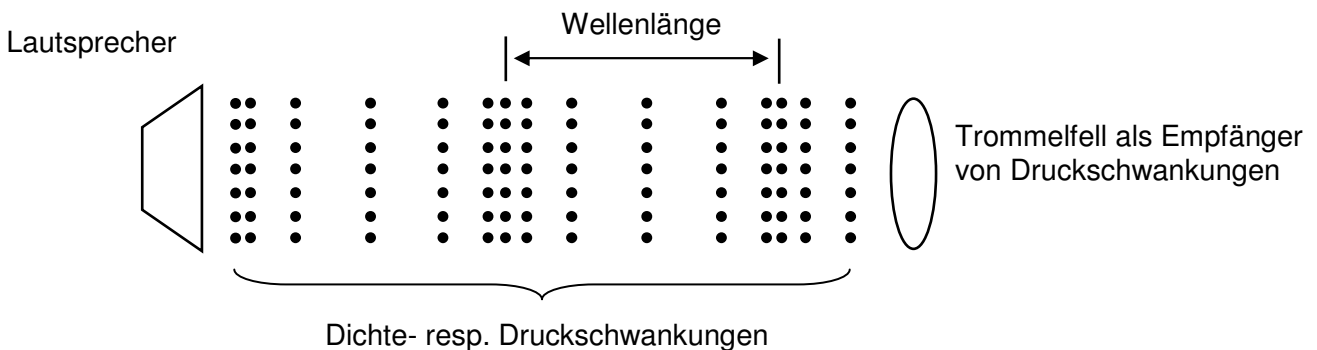


## 4.2.6 Schallgeschwindigkeit

Schallwellen laufen unterschiedlich schnell in unterschiedlichen Kontinua. In Wasser beträgt die Schallgeschwindigkeit ca. 1500 m/s, in Stahl etwa 6000 m/s, in Helium 1000 m/s, in trockener Luft bei 20 Grad Celsius 344 m/s. Pro Grad nimmt die Schallgeschwindigkeit in der Luft um 0,6 m/s zu.

## 4.2.7 Bemerkungen zum Hören

Das menschliche Ohr reagiert nur auf Schall im Bereich der Hörfrequenzen, der mit Longitudinalwellen übertragen wird.



Das Gehirn interpretiert die über die Luft (oder unsere Knochen) im Ohr eintreffenden Schallwellen als Schallergebnisse, wir «hören etwas» (Für eine ausführliche Beschreibung siehe Kapitel 4.3.).

## 4.2.8 Einteilungsmöglichkeiten für die Schallwahrnehmungen

### Schallformen in Bezug auf Musik und Kommunikation

#### a) Musik

Es handelt sich dabei um beabsichtigte Kombinationen von Schallereignissen zur Befriedigung fremder oder eigener ästhetischer Hörbedürfnisse.

#### b) Sprache

Schallereignisse, welche der mündlichen Kommunikation dienen (Definition variiert je nach Wissenschaftsdisziplin).

#### c) Geräusche

Vage, ungeordnete, angenehme oder unerwünschte Schallereignisse.

Laute Geräusche bezeichnen wir als Lärm, explosionsartige als Knall, andere als Klang.

## Schallformen im Hinblick auf schallerzeugende Objekte (Schallerreger, Klangkörper)

### a) Sinustöne

Ein Sinuston entsteht durch einen Klangkörper, der exakt harmonisch (siehe harmonische Schwingung Kap. 4.1.2.) und ohne Obertöne schwingt. Das macht z.B. eine Stimmgabel, wenn sie nur leicht angeschlagen wird. Die dabei in der Luft entstehende Schallwelle ist ganz regelmässig. Das Ohr empfindet diesen Ton als eher langweilig oder gar als leicht schmerzhaft.

### b) Klänge

Wenn ein einzelner Klangkörper, der zum Schwingen angeregt wurde, gleichzeitig mehrere Eigenschwingungen ausführt (z.B. eine Trommel oder eine Saite mit angeregten Grund- und Obertönen), gibt er ein Gemisch von reinen Tönen ab. Ein solches Gemisch heisst Klang. Nicht jeder Klang wird als angenehm empfunden (z.B. Quietschen). Jeder Klang lässt sich als Gemisch unterschiedlicher Sinustöne analysieren.

Der Knall ist ein sehr rasch abnehmender «Klang», der aus unzähligen Sinustönen unterschiedlicher Lautstärke und Frequenz besteht.

Ein Klanggemisch entsteht aus mehreren gleichzeitig ertönenden Klängen. Alle Geräusche sind gemäss dieser Definition Klänge oder Klanggemische.

## Schallformen in der Musik

a) Ein einzelner Klang heisst «Ton».

b) Ein Gemisch aus mehreren Tönen wird als «Klang» bezeichnet.

## Klangfarbe

Wenn zwei unterschiedliche Instrumente die gleiche Musiknote spielen, empfinden wir die beiden Klänge in der Regel zwar als gleich hoch. Da aber die beiden Klänge aus einer unterschiedlichen Mischung von Sinustönen bestehen, tönen sie nicht gleich in unseren Ohren. Die beiden Klänge haben eine andere «Klangfarbe». Die Klangfarbe wird auch wesentlich mitgeprägt durch das Ein- und Ausklingen der einzelnen Klänge, die ein Instrument produziert.

## Tonhöhe (Höhen oder Bass) in der Musik

Sie wird in der Regel bestimmt durch die Frequenz der am intensivsten abgestrahlten Schwingung eines Klangkörpers, wobei hohe Frequenzen in der Regel als «hohe Töne» empfunden werden. Der Zusammenhang zwischen der auf das Ohr treffenden Schallfrequenz und der von uns wahrgenommenen Tonhöhe ist nicht linear und kann ausserdem von der Lautstärke, von der Klangfarbe und vom hörenden Individuum abhängen. Das menschliche Ohr kann ein breites Spektrum an Frequenzen wahrnehmen – von ungefähr 20 Hz bis 20'000 Hz. Im Alter sinkt die obere Hörschwelle beträchtlich.

## 4.2.9 Schalldruck und Lautstärke

Als Schalldruck werden die bei der Schallausbreitung auftretenden Druckschwankungen/Dichteschwankungen (siehe Kapitel 4.2.1 und 4.2.4) bezeichnet. Diese Druckschwankungen werden via Trommelfell und Gehirn in Hörempfindungen (siehe Kapitel 4.3) oder vom Mikrofon in elektrische Signale umgesetzt.

Der auf eine Fläche  $A$  auftreffende Schall übt eine Kraft  $F$  auf sie aus. Der Quotient  $p = F/A$  heisst Schalldruck und wird in  $N/m^2$  d.h. in Pascal (Pa) angegeben. Der Schalldruck ist verglichen mit dem Luftdruck meistens um viele Grössenordnungen kleiner. Bei reinen Sinustönen bestimmt die Amplitude der Schwingung den Schalldruck. Er

ist proportional zur Schwingungsamplitude und dann am grössten, wenn die Amplitude der sich ausbreitenden Schallwelle maximal ist. Der Schalldruck nimmt proportional zur Entfernung der Schallquelle ab.

Der Schalldruck – und damit die Schwingungsamplitude – bestimmt weitgehend die **Lautstärke**. Ihr Wert nimmt proportional zur Entfernung von der Schallquelle ab.

Die Lautstärke wird also bei gleicher Frequenz stark durch die Amplitude der Schallwelle bestimmt. Je grösser sie ist, desto lauter empfinden wir in der Regel das Schallereignis. Einfacher gesagt: Je grösser die Amplitude ist, desto lauter tönt es. Die Wahrnehmung der Lautstärke hängt aber auch von der Schalleistung ab und wird ausserdem von der Tonhöhe, der Klangfarbe, vom hörenden Individuum und von seinem Umfeld bestimmt.

### Dämpfung von Wellen

Je weiter sich eine Schallwelle in der Luft vom Entstehungsort entfernt, desto mehr «Raum» nimmt sie ein. Ihre räumliche Energiedichte nimmt mit dem Quadrat ihrer Entfernung von der Schallquelle ab. Für die Lautstärke ist aber in erster Linie der Schalldruck (Amplitude) massgebend, nicht die (zum Quadrat der Amplitude proportionale) Energie.

Situation bzw. Schallquelle	Entfernung von Schallquelle bzw. Messort	Schalldruck p in Pascal	unbewerteter Schalldruckpegel $L_p$ in Dezibel
Düsenflugzeug	30 m	630 Pa	150 dB
Gewehrschuss	1 m	200 Pa	140 dB
Schmerzschwelle	am Ohr	100 Pa	134 dB
Gehörschäden bei kurzfristiger Einwirkung	am Ohr	ab 20 Pa	120 dB
Kampfflugzeug	100 m	6,3–200 Pa	110–140 dB
Presslufthammer/ Diskothek	1 m / am Ohr	2 Pa	100 dB
Gehörschäden bei langfristiger Einwirkung	am Ohr	ab 0,36 Pa	85 dB
Hauptverkehrsstrasse	10 m	0,2–0,63 Pa	80–90 dB
Pkw	10 m	0,02–0,2 Pa	60–80 dB
Fernseher auf Zimmerlautstärke	1 m	0,02 Pa	ca. 60 dB
Sprechender Mensch (normale Unterhaltung)	1 m	$2 \cdot 10^{-3} - 6,3 \cdot 10^{-3}$ Pa	40–60 dB
Sehr ruhiges Zimmer	am Ohr	$2 \cdot 10^{-4} - 6,3 \cdot 10^{-4}$ Pa	20–30 dB
Blätterrauschen, ruhiges Atmen	am Ohr	$6,32 \cdot 10^{-5}$ Pa	10 dB
Hörschwelle bei 2 kHz	am Ohr	$2 \cdot 10^{-5}$ Pa (20µPa)	0 dB

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Schalldruckpegel>

Bei der **Überlagerung unabhängiger Schallquellen** ergibt sich der korrekte Summenpegel durch energetische Addition der beteiligten Schallquellen. Pegelwerte in Dezibel können deshalb nicht einfach addiert werden. Beispiel: Wird zu einer Schallquelle eine zweite genau gleiche hinzugefügt (doppelte Leistung), wächst der Schalldruckpegel um 3 dB.

Die subjektive **Lautstärkewahrnehmung** oder «Lautheit» ist eine **psychoakustische** Empfindungsgrösse.

Über den Zusammenhang zwischen Schallpegel und Lautheit gibt es verschiedene Theorien. Nach der Theorie des Psychoakustikers Stanley Smith Stevens entspricht der Verdopplung oder Halbierung der Lautheit eine Pegeldifferenz von 10 dB.

Untersuchungen von Richard M. Warren («Elimination of Biases in Loudness Judgments for Tones») kommen zu einer Pegeldifferenz von nur 6 dB. Das heisst, dass doppelter Schalldruck als doppelt so laut empfunden wird. Der Psychologe John G. Neuhoff fand heraus, dass das Gehör für ansteigende Pegel empfindlicher ist als für abfallende Pegel. Bei gleicher Pegeldifferenz ist die Lautheitsänderung von leise nach laut stärker als von laut nach leise.

Kurz: Die Verdopplung der Lautstärke entspricht einer Pegeländerung zwischen 6 und 10 dB.

## 4.2.10 Schwebung

Mit der Stimmgabel A erzeugen wir einen Ton der Frequenz 440 Hertz.

Mit der Stimmgabel B erzeugen wir gleichzeitig einen Ton der Frequenz 445 Hertz.

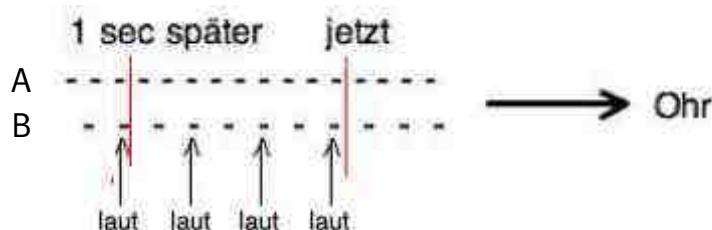
Gehört wird jetzt ein Klang, der aus zwei Tönen zusammengesetzt ist. Dabei stellen wir fest, dass sich die Lautstärke dieses Klanges fünf Mal in der Sekunde von laut zu leise ändert (das tönt etwa wie wou-wou-wou-wou-...).

Genauere Untersuchungen zeigen: Wenn A mit der Frequenz  $f_1$  und B mit der Frequenz  $f_2$  erklingt, erhalten wir für die Lautstärkeänderung eine Frequenz von  $f_2 - f_1$ . Im obigen Beispiel finden wir:  $445 \text{ Hz} - 440 \text{ Hz} = 5 \text{ Hz}$ .

Diese Erscheinung heisst Schwebung.

### Erklärung

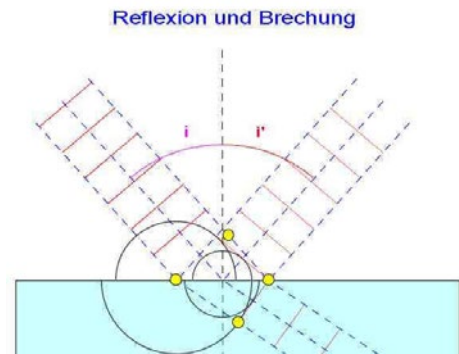
Auf das Trommelfell des Ohres kommen von A und von B periodische Luftdruckstörungen (in Form von Schallwellen). Da B die Druckstörungen in rascherer Folge (z.B. wie - - - -) sendet, A hingegen in langsamerer Folge (z.B. wie - - - -), kommt es in regelmässigen Abständen zum gleichzeitigen Eintreffen einer Störung von A und B auf das Ohr. Das Gehirn nimmt das als periodische Zunahme (respektive dazwischen als Abnahme) der Lautstärke war.



Ans Ohr gelangen von A in einer Sekunde neun Schwingungsmaxima, von B nur sechs. Das Ohr hört eine Schwebungsfrequenz von 9 minus 6 Hertz, also 3 Hz. Das heisst die Lautstärke nimmt pro Sekunde drei Mal zu und ab.

## 4.2.11 Übergang einer Welle von einem Medium ins andere

Wenn eine Welle an eine Grenzfläche stösst, an welcher sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit verändert, wird die Welle ganz oder teilweise zurückgeworfen. Dieses Phänomen heisst **Reflexion**. Für Schallwellen oder auch Lichtwellen verändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit, wenn die Welle von einem Material (Medium) auf ein anderes trifft. Bei Oberflächenwellen von Flüssigkeiten hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Höhe der Oberfläche über dem Grund ab. Viele dieser Phänomene sind aus dem Alltag bekannt. Eine Schallwelle wird von einer Wand als Echo zurückgeworfen. Das Licht einer Lampe wird von einem Spiegel oder einem Fenster reflektiert. Trifft eine Welle in einem beliebigen Winkel auf die Grenzfläche zwischen zwei Medien, wird ein Teil der Welle im gleichen Winkel zurückgeworfen mit welchem sie auf die Grenzfläche getroffen ist, ein Teil dringt meistens ins neue Medium ein.



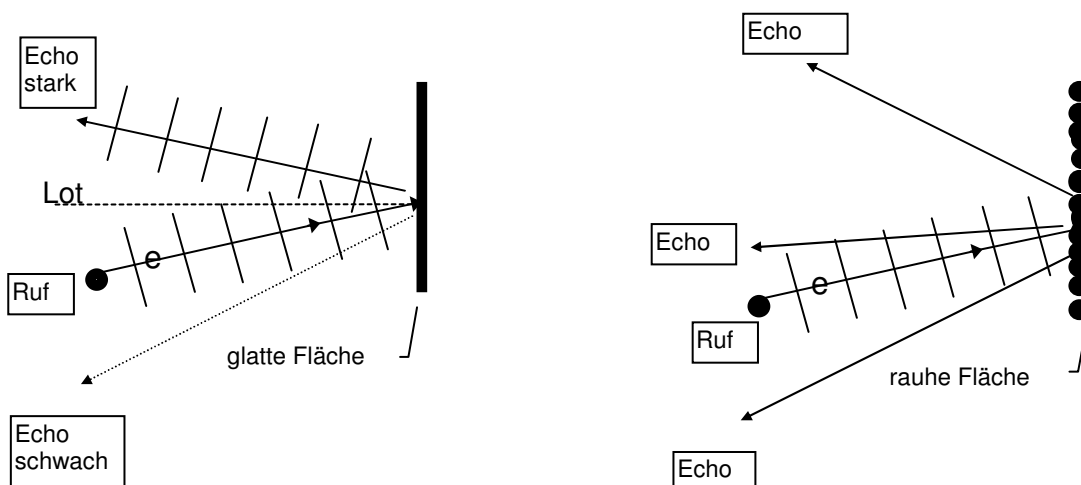
Quelle: Suchbegriff in Google Bilder:  
 Reflexion und Brechung  
<http://www.chemgapedia.de/>

Beispiel: Die roten Linien stehen für die Wellenfronten (Zonen erhöhter Dichte) der einfallenden Welle. Der Einfallswinkel  $i$  beträgt  $45^\circ$  (zum Lot gemessen). Nach der Reflexion verlässt die Welle (schwarze Linien = Wellenfronten der zurückgeworfenen Welle) in einem Ausgangswinkel  $i'$  von  $45^\circ$  (vom Lot gemessen) die Grenzfläche.

Je nach Eigenschaften der beteiligten Medien, kann ein Teil der Welle ins neue Medium eindringen. Dieses Phänomen heisst **Brechung**.

## 4.2.12 Schallreflexion

Schall kann wie andere Wellen beim Übergang in ein neues Medium zum Teil reflektiert oder vom neuen Medium verschluckt (absorbiert) werden. Wie gross der Anteil der Übertragung auf das neue Medium ist hängt von den Stoffeigenschaften und vom Aggregatzustand ab. Dies ist im Zusammenhang mit Schalldämmung und Schalldämpfung wichtig. Wenn der Schall aus einem gasförmigen Medium auf eine Flüssigkeit oder einen Feststoff trifft, findet praktisch vollständige Reflexion statt.



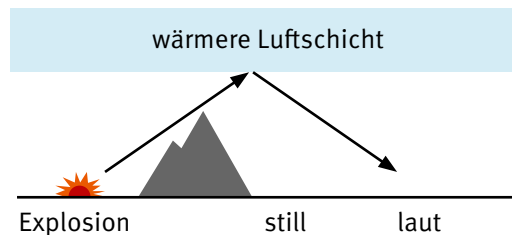
Das Echo von glatten Wänden ist am stärksten dort hörbar, wo der auf die Wand einfallende «Schallstrahl» e am Lot gespiegelt wird. An rauen Flächen wird der auf die Wand einfallende Schall in alle Richtungen zurückgeworfen.

**Flüstergalerien** verwenden ebenfalls das Prinzip der Schallreflexion.

Trifft eine Schallwelle von einem Feststoff auf eine Flüssigkeit oder ein Gas, kommt es sowohl zu Reflexion als auch zur Übertragung des Schalls auf das neue Medium.

### Totalreflexion von Schall

Schall kann an unterschiedlich warmen Luftschichten sogar total reflektiert werden. Eine Explosion kann deshalb in nahen Gebieten sogar weniger gut («Zone des Schweigens») gehört werden als in entfernten (siehe auch unter 4.2.19 Brechung).



Schall kann durch gebogene Röhren geleitet werden, weil er an den Rohrwänden total reflektiert wird. Mit «Sprech-tüten» (Megaphon) kann der Schall durch Reflexion «gebündelt» werden.

**Luftschallwellen in Röhren (Pfeifen)** können an einem offenen Rohrende reflektiert werden und sich beim Zurücklaufen mit der auslaufenden Welle überlagern. Bei der «richtigen» Frequenz bleiben die dabei entstehenden Wellenknoten und -bäuche stehen (siehe Kapitel 4.2.3). Die schwingende Luft resoniert dann mit der Erregungsfrequenz und bildet eine stehende Welle.

Beispiel: Durch eine sehr starke punktförmige Wärmequelle kann – z.B. mit einem von unten in das vertikal gestellte Rohr eingeführten Gasbrenner mit langem Brennerhals – in einem dünnen Papp- oder Glasrohr (mindestens 1 m lang) eine sehr laute, gut tönende stehende Schallwelle (sogar mit Oberschwingungen) angeregt werden.

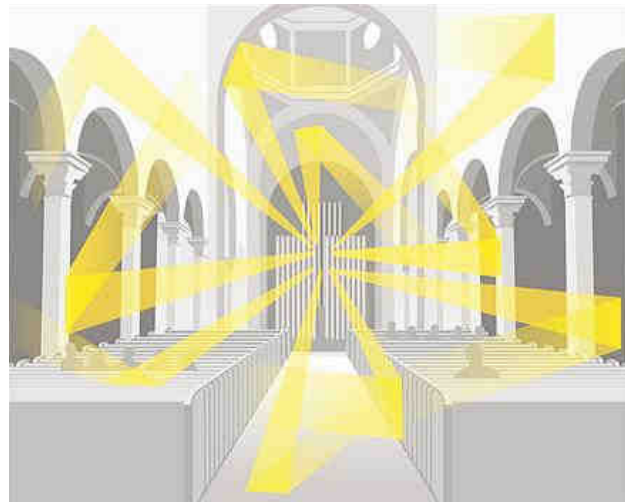


## 4.2.13 Raumakustik

Begibt man sich in einen Raum, sorgen unsere Sinne dafür, dass wir sofort eine Vorstellung von diesem Raum gewinnen. Natürlich spielt dabei der Sehsinn eine zentrale Rolle. Wir könnten uns aber auch mit verbundenen Augen in einen uns völlig unbekanntem Raum führen lassen und trotzdem gewisse Aussagen über diesen Raum machen – dank des Hörsinns, respektive der Wahrnehmung der Raumakustik. Achten Sie sich mal, wenn Sie einen stillen Raum betreten, wie Sie ihn durch Ihr Gehör wahrnehmen. Sie werden grosse Unterschiede feststellen. Eine Kirche oder eine Turnhalle «tönen» anders als das Schulzimmer, Ihre Stube oder das Badzimmer.

Wird in einem Raum ein Ton, Klang oder Geräusch erzeugt, breitet sich dieser mit Schallgeschwindigkeit von der Quelle aus und wird, je nach Raumgrösse, etwas früher oder später an eine Wand treffen und dort reflektiert. Das heisst: Personen, die sich in diesem Raum befinden, werden nicht nur den **Direktschall** wahrnehmen, sondern zusätzlich auch den Schall, der von den Wänden (Decke, Boden) zum Teil sogar mehrfach reflektiert worden ist (**Nachhall**). In einem grossen Raum kann der Zeitunterschied zwischen dem Eintreffen des Direktschalls und dem letzten wahrnehmbaren Nachhall einige Sekunden betragen.

Die Raumgrösse ist aber nicht der einzige Faktor, welcher für den Nachhall, respektive die Akustik eines Raumes entscheidend ist. Die Raumausstattung und die Beschaffenheit der Wände (Decke, Boden) sind ebenfalls von grosser Bedeutung. Bei jeder Schallreflexion geht nämlich Schallimpuls auf die Wände über und auch ein Teil der Energie. Der Grad dieser **Schallabsorption (Schalldämpfung)** hängt sehr stark von den Materialien ab. Die zu Grunde liegenden physikalischen Prozesse sind relativ kompliziert und werden hier nicht weiter erläutert. Besonders geeignet zur Schalldämpfung sind poröse Materialien, mit offenen Poren, die eine große innere Oberfläche aufweisen. So weisen zwei gleich grosse, gleich ausgestattete, Räume schon einen deutlichen Unterschied in der Raumakustik auf, wenn der eine einen Plattenboden, der andere einen Teppichboden aufweist. Der Teppichboden absorbiert Schall ziemlich stark, was den Nachhall einschränkt. Auf gleiche Weise ist der Nachhall in einem Raum deutlich geringer, wenn der Raum nicht leer, sondern durch viele Personen gut besetzt ist.



Schallreflexion an Wänden führt zu Nachhall.

Quelle: [www.ecophon.ch/templates/webpuffpage\\_107044.aspx](http://www.ecophon.ch/templates/webpuffpage_107044.aspx)

Es ist wichtig zwischen **Schalldämpfung** und **Schalldämmung** zu unterscheiden. Schalldämmung ist eine Massnahme zur akustischen Trennung von Räumen. Wenn man also verhindern will, dass störende Geräusche von einer Wohnung in die andere gelangen, oder von aussen in ein Tonstudio gelangen, muss man Massnahmen zur Schalldämmung ergreifen. Bei der Schalldämpfung hingegen, geht es um die Abschwächung der Schallausbreitung im Raum.

### Anwendungen

Um konzentriert arbeiten zu können, braucht es in einem **Grossraumbüro** Massnahmen zur Schalldämpfung, also zur Verhinderung der ungehinderten Ausbreitung von störenden Geräuschen.



Massnahmen zur Schallabsorption im Grossraumbüro: Deckenelemente mit vielen kleinen Löchern, ebenso die Wände zwischen den Pulten. Teppichboden.

Quelle: [www.riempp.eu/seite142\\_31.htm](http://www.riempp.eu/seite142_31.htm)

Um in einem **Tonstudio** perfekte Aufnahmen machen zu können, muss das Tonstudio gegen aussen perfekt schallisoliert sein (Schalldämmung). Gleichzeitig versucht man – etwas vereinfacht gesagt – den Nachhall möglichst zu minimieren. Aus diesem Grund sind die Wände meistens mit schallabsorbierenden Materialien eingekleidet (Schalldämpfung).



Die grössten Ansprüche an die Akustik werden wohl an einen **Konzertsaal** gestellt. Wie im Tonstudio sollten auch hier keine störenden Geräusche (Lärm) von aussen nach innen gelangen. Im Gegensatz zu einem Tonstudio ist hier aber ein gewisses Mass an Nachhall erwünscht. Im Idealfall kann dieser durch bewegliche Wände sogar beeinflusst werden. Besonders wichtig ist auch, dass möglichst jeder Zuhörer gleich perfekte akustische Bedingungen vorfindet. Im Konzertsaal des «KKL Luzern» hat man zu diesem Zweck ganz besondere Wände eingebaut. Diese bestehen aus einem besonderen Material mit speziellen Öffnungen und Poren. Darüber hinaus lassen sie sich nach den Wünschen und Bedürfnissen des Orchesters bewegen um genau die richtige Akustik zu erzielen.



Konzertsaal des KKL Luzern. Bewegliche Wände mit spezieller Oberflächenbeschaffenheit und dahinter liegende Echokammern.

Quelle: KKL.  
Copyright © KKL Luzern.

### **Akustik und Hören**

Die Begriffe und Masseinheiten, die im Zusammenhang mit Akustik und Lärmschutz eine Rolle spielen, werden in der Literatur nicht immer einheitlich verwendet. Eine verständliche, gute Übersicht mit Anwendungsbeispielen findet sich in [www.laermorama.ch/](http://www.laermorama.ch/) unter *Akustik* → *Schallpegel* → *Wissen* der Fachstelle Lärmschutz des Kantons Zürich. Daraus zitieren wir den folgenden Text:

#### **Das Wichtigste in Kürze**

Das Gehör kann einen riesigen Schalldruckbereich verarbeiten; allerdings entspricht dies nicht direkt dem Lautstärkeindruck. Das Gehör hat nämlich eine variable Empfindlichkeit. Die logarithmische Dezibel-Skala bildet von 0 dB (Hörschwelle) bis ca. 130 dB (Schmerzgrenze) den gesamten Lautstärkebereich in überschaubaren Schritten ab.

#### **Schalldruckpegel resp. Schallpegel**

Beim Rechnen mit Schallpegeln muss berücksichtigt werden, dass die Schallintensitäten miteinander verrechnet werden müssen und nicht die Dezibel-Werte. Eine Verdoppelung der Schallleistung entspricht einer Schallpegelerhöhung um 3 dB.

#### **Rechnen mit Schallpegeln**

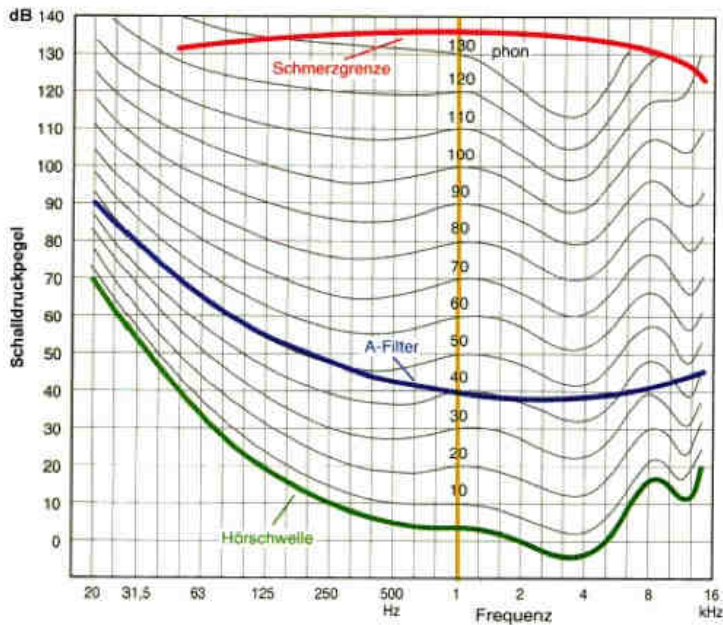
Ein gesundes Gehör kann bei guten Bedingungen im direkten Vergleich Pegel von 1 dB unterscheiden. Das Gehör ist nicht in allen Frequenzbereichen gleich sensitiv. Generell werden tiefe Töne bei gleichem Schallpegel als weniger laut empfunden. Daher weicht das Gehör auch von der Dezibelskala ab.

#### **Lautstärke in phon**

Zwei Töne mit gleichem Schallpegel, aber unterschiedlicher Frequenz, werden oft auch als unterschiedlich laut wahrgenommen. Neben der physikalisch messbaren Grösse (Schalldruck, Schalldruckpegel) wurde daher auch



eine rein subjektive Grösse, die Lautstärke, definiert. Die Lautstärke wird in [phon] angegeben, und deren Definition beruht auf dem subjektiven Vergleich zweier Schallvorgänge. Für diesen Vergleich wurde der 1-kHz-Ton als Referenzton gewählt. Die Lautstärkeskala entspricht daher bei 1 kHz genau der Dezibelskala. Um die Lautstärke eines bestimmten Schallvorganges (Signals) zu bestimmen, vergleicht man das vorhandene Signal mit dem 1000-Hz-Referenzton. Die Intensität des Referenztons wird nun solange verändert, bis er als gleich laut empfunden wird wie das vorhandene Signal. Der beim Referenzton ablesbare Schallpegel entspricht dann der Lautstärke des erzeugten Schallvorganges in phon.



Quelle: ISO-Norm 226 (ergänzt)  
International genormte Kurven  
gleicher Lautstärke reiner Töne.

Die orange Linie kennzeichnet die Referenzfrequenz von 1000 Hz, wo Dezibel und phon gleich gross sind. Ein 20-Hz-Ton mit 110 dB wird als gleich laut empfunden wie ein 4-kHz-Ton mit 70 dB, beidesmal sind es 80 phon.

Die Kurven gleich empfundener Lautstärke von reinen Tönen wurden anhand zahlreicher Untersuchungen mit normal hörenden Personen im Alter zwischen 18 und 25 Jahren bestimmt.

#### Lautheitsskala in sone

Die Lautheitsskala angegeben in «sone» beruht darauf, dass 0.5 sone halb so laut sind wie 1 sone und 9 sone dreimal so laut sind wie 3 sone. Diese subjektive Skala bildet das Hörempfinden also linear ab.

### 4.2.14 Lärmschutz

Wikipedia liefert folgende **Definition von Lärm**: Als Lärm werden Geräusche (Schalle) bezeichnet, die durch ihre Lautstärke und Struktur für den Menschen und die Umwelt gesundheitsschädigend oder störend bzw. belastend wirken. Dabei hängt es von der Verfassung, den Vorlieben und der Stimmung eines Menschen ab, ob Geräusche als Lärm wahrgenommen werden. Es ist also nicht nur die Lautstärke entscheidend, sondern auch die Struktur (rhythmisch oder anhaltend oder unregelmässig, etc.). Zudem ist die Einordnung subjektiv und von der Stimmung abhängig.

Grundsätzlich gibt es 3 Möglichkeiten, sich vor Lärm zu schützen:

- Verringerung des Lärms am Entstehungsort
- Behinderung der Schallausbreitung
- Persönlicher Lärmschutz

Natürlich ist es die beste Methode, den Lärm bereits **am Entstehungsort** zu minimieren. Gerade im Strassen- und Schienenverkehr sind in den letzten Jahrzehnten auch deutliche Verbesserungen erreicht worden. So ist etwa der Schallpegel von modernen Eisenbahnlokomotiven («Lok 2000») etwa 10 dB geringer (80 statt 90 dB) als bei älteren Lokomotiven (Re 4/4). Neue Eisenbahnwagen sind sogar ca. 20 dB «leiser» (unter 80 dB im Vergleich zu ca. 100 dB). Zur Einordnung dieser Zahlenwerte vergleiche mit der Tabelle im Kapitel 4.2.9. Auch im Strassenverkehr werden Anstrengungen unternommen um den Lärm am Entstehungsort zu verringern. So sind moderne Fahrzeuge «leiser» als ältere. Von Bedeutung sind auch sogenannte Flüsterbeläge. Dies sind spezielle Asphaltbeläge, die den Lärm um ca. 5 dB verringern (Beachte, dies entspricht deutlich mehr als einer Halbierung!).

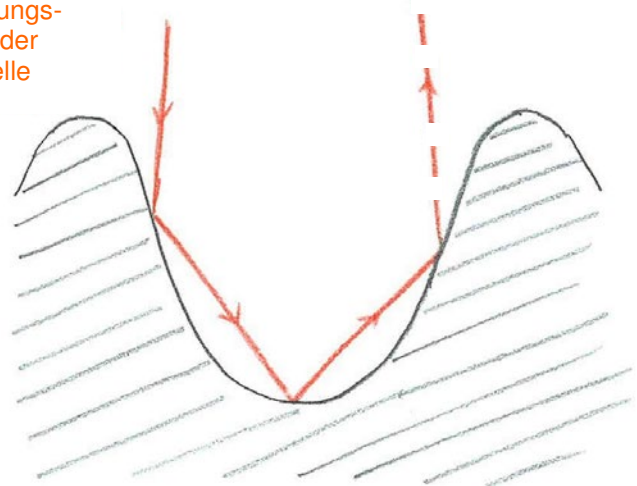
Trotz dieser Verbesserungen bleibt die Lärmbelastung unvermindert gross (nimmt sogar eher noch zu), denn die Zunahme des Verkehrs macht sehr oft die angesprochenen Verbesserungen wieder zunichte. Aus diesem Grund ist die **Behinderung der Schallausbreitung** ein ganz wesentlicher Bestandteil von Lärmschutzmassnahmen. In den letzten Jahren ist gerade im Strassen- und Schienenverkehr viel Geld in solche Lärmschutzmassnahmen investiert worden.

Verbindet man das Wissen über Schallreflexion (Kap.4.2.12), Schallabsorption (Kap. 4.2.13) und Lautstärke (Kap. 4.2.9) kann man leicht verstehen wie Lärmschutz funktioniert.



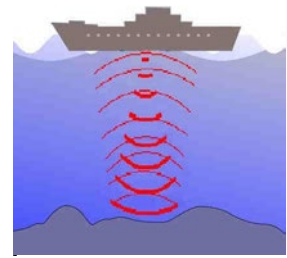
Die porösen Betonelemente die dazu sehr oft verwendet werden, kennen heute alle von Autobahnen und Eisenbahnlinien. Die strukturierte Oberfläche und das poröse Gefüge der Lavabetonelemente führen dazu, dass Schallwellen an der Oberfläche (inkl. den grösseren und kleineren Poren) mehrfach reflektiert werden. Da bei jeder Reflexion Energie verloren geht, wird ein beträchtlicher Teil des auftretenden Schalls absorbiert, also verschluckt wird. Dies führt zu einem direkten (für Regionen hinter der Schallschutzmauer) als auch indirekten (für Regionen auf der anderen Strassenseite) Schallschutz.

Ausbreitungsrichtung der Schallwelle



## 4.2.15 Echolot

Mit Hilfe des Echolot-Verfahrens kann die Tiefe von Gewässern ermittelt werden. Ein Schallimpuls (üblicherweise Ultraschall mit einer Frequenz von ~100 kHz) wird z.B. von einem Schiff senkrecht nach unten ausgesendet. Die Schallwellen werden am Boden reflektiert und gelangen zurück zum Schiff, wo sie registriert werden. Aus der Laufzeitmessung und der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit kann die Tiefe ermittelt werden.



Quelle: Wikipedia,  
Suchbegriff Echolot

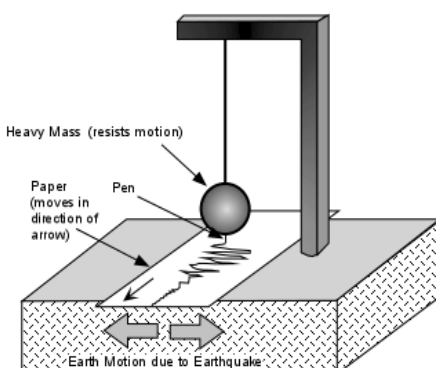
Durch wiederholte Schallimpulse, von unterschiedlichen Positionen ausgesendet, kann die Topografie ganzer Gebiete des Meeresbodens kartografiert werden. Weiterentwicklungen des Echolot-Verfahrens (Einsatz mehrerer Frequenzen gleichzeitig oder so genannte Fächerlotsysteme) sind heute für die Schifffahrt unerlässlich (zum Beispiel bei der Navigation durch Untiefen). In der Fischerei werden damit Fischschwärme aufgespürt, mit ein Grund für die Ausfischung der Meere.

## 4.2.16 Materialkontrollen mit Schall

Bauteile oder Schweissnähte in Autos, Flugzeugen, Seilbahnen, Kraftwerken, Produktionsanlagen, etc. sind über Jahre hinweg grossen Belastungen ausgesetzt. Kommt es zu einem Riss oder Bruch, eines solchen Bauelementes, kann dies gravierende Konsequenzen (Flugzeugabsturz, Absturz einer Seilbahnkabine) haben. Mit Ultraschall können viele solche Schäden gefunden werden. Heute gehören Ultraschallprüfungen solcher Objekte und Bauteile zu den Standarduntersuchungen bei der Qualitätskontrolle und Wartung. Dazu wird ein Prüfkopf, der Ultraschallwellen aussenden und gleichzeitig empfangen kann, über die Oberfläche des Werkstückes gefahren. Die Ultraschallwellen (100 kHz bis 50 MHz) dringen ins Werkstück ein und werden an Grenzflächen – also auch an «Materialdefekten» – reflektiert. So können Materialfehler und «Haarrisse» bis  $10^{-7}$ m Grösse, die sich von Auge oder durch andere Tests nicht identifizieren lassen, entdeckt werden. Das Werkstück wird durch diese Prüfung nicht verändert.

(Seilbahnunglück: [www.swissinfo.ch/ger/archive.html?siteSect=883&sid=815100&ty=st](http://www.swissinfo.ch/ger/archive.html?siteSect=883&sid=815100&ty=st))

## 4.2.17 Erdbebenwellen



Bei einem Erdbeben verschieben sich Teile der Erdkruste. Dabei werden oft gewaltige, spür- und hörbare Energiemengen freigesetzt, die bei starken Beben zur Zerstörung von Häusern, Brücken und Strassen im Erdbebengebiet führen. Die Erdbeben-Schockwellen breiten sich in Form von längs- und querschwingenden Schallwellen durch die Erdkruste aus. Diese werden von **Seismographen** (weltweit ca. 500 Stationen) empfangen.

Bild: Aufbau eines Seismographen (schematisch).

Wichtig ist die grosse (träge) Masse der Kugel!

Quelle: <http://earthsci.org/education/teacher/basicgeol/earthq/earthq.html>

Da Längswellen (Werden im Kontext von Erdbeben P-Wellen genannt) und Querwellen (Im Kontext von Erdbeben: S-Wellen) sich unterschiedlich schnell bewegen, kann das Epizentrum des Bebens aus dem zeitlichen Abstand ihres Eintreffens und aus dem Vergleich der an verschiedenen Stationen gemessenen Wellenamplituden ermittelt werden.

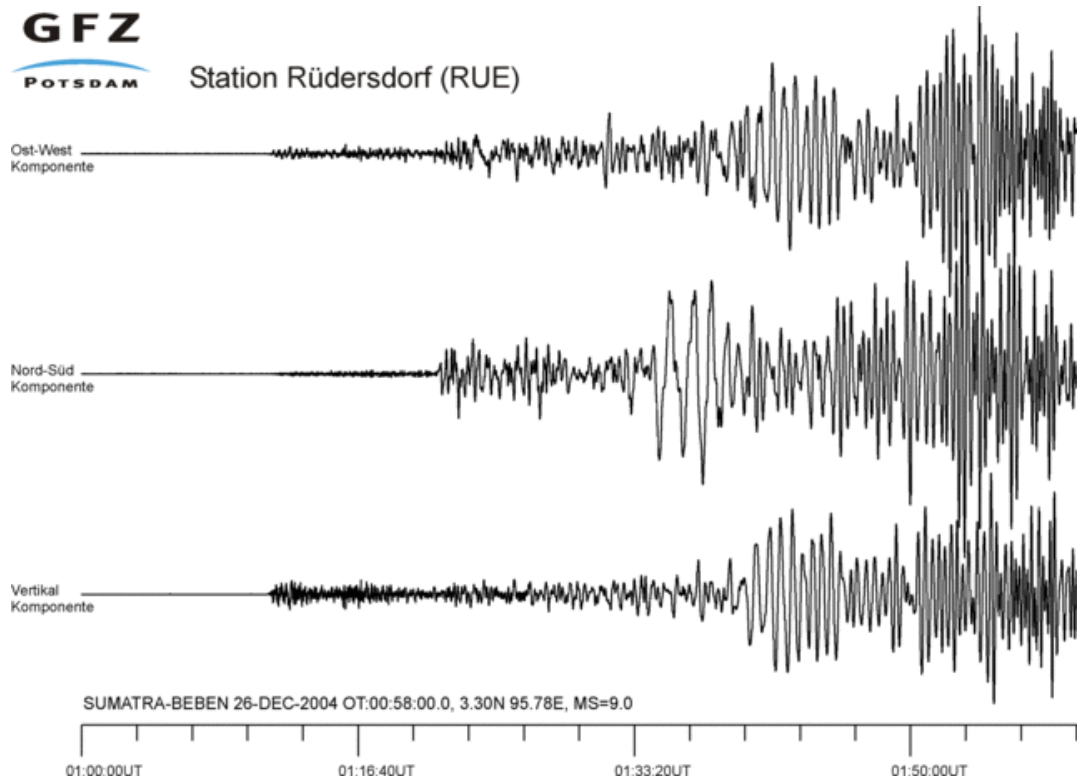
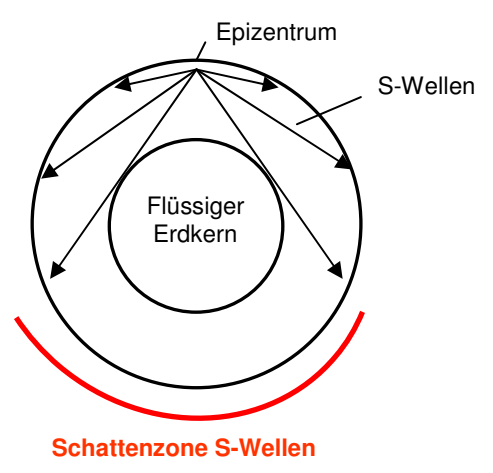


Bild: Seismogramm des verheerenden Erdbebens vom 26.12.2004 vor Sumatra, welches den verheerenden Tsunami mit über 200'000 Toten ausgelöst hat. Das Seismogramm wurde in Deutschland aufgezeichnet.

Quelle: [www.weltderphysik.de/de/3431.php?i=3432](http://www.weltderphysik.de/de/3431.php?i=3432)

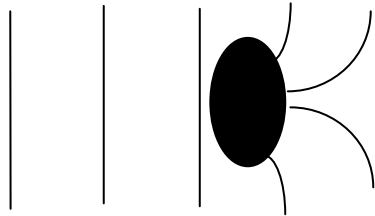
Bei der Analyse seismologischer Daten wird übrigens festgestellt, dass auf der dem Beben gegenüberliegenden Erdoberfläche fast nur P-Wellen (Längswellen) eines Bebens registriert werden. Das beweist, dass die Erde einen flüssigen Kern besitzt, denn S-Wellen (Querwellen) können sich nicht durch eine Flüssigkeit ausbreiten.

Mit ähnlichen Verfahren können auch **Aussagen über den Aufbau des Erdinneren** (z.B. Erdöllager) gemacht werden. Oft werden dafür kleine künstliche Beben erzeugt (Explosionen oder Hammerschläge auf Metallplatten). Bei den Analysen werden auch Beugungs- und Brechungsphänomene berücksichtigt.

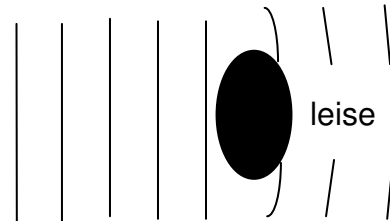


## 4.2.18 Wellenbeugung (Diffraktion)

Schallwellen können um Hindernisse herum gehen oder sich hinter einer Öffnung in einer schallisierenden Wand wieder im ganzen Raum ausbreiten, wenn die Wellenlänge im Vergleich zur Dicke des Hindernisses oder der Breite der Wandöffnung gross ist.

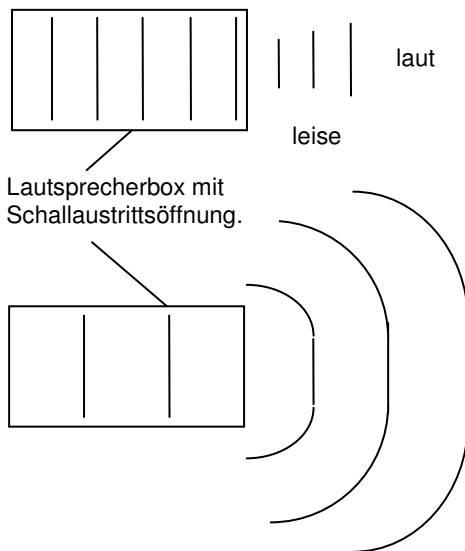


Langwelliger Schall "umspült" das Hindernis.



Kurzwelliger Schall gelangt nur schwach hinter das Hindernis.

Tiefe Töne, die auf das linke Ohr fallen, können um den Kopf herum in das rechte Ohr gelangen, hohe Töne weniger. Das Gehirn benützt das unter anderem zur Feststellung der Richtung, aus der ein Schallsignal kommt.



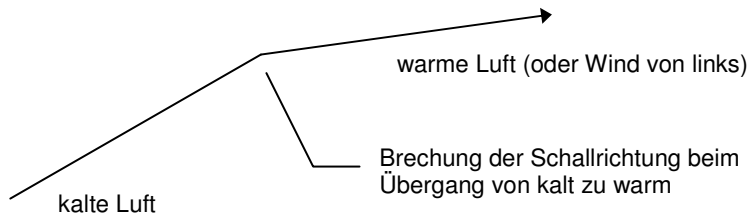
Kurzwellige Schallwellen (hohe Töne) werden durch eine grosse Austrittsöffnung nur wenig gebeugt. Aus diesem Grund haben Hochtonlautsprecher kleine Austrittsöffnungen für den Schall.

Langwellige Schallwellen (also tiefe Töne) werden von einem Lautsprecher mit kleiner Öffnung in den ganzen Raum abgestrahlt.

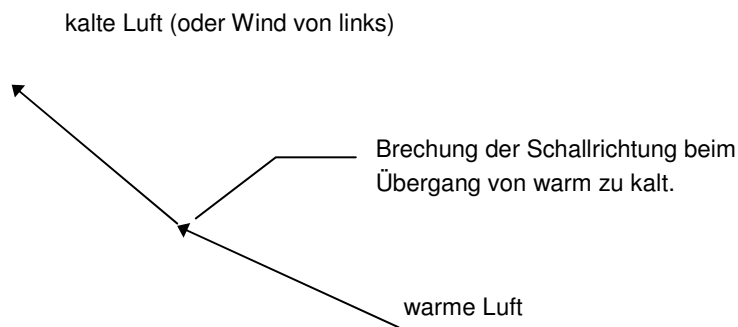
Männerstimmen verbreiten Nachrichten im Nebenraum, auch wenn nur ein kleiner Türspalt offen steht. Frauenstimmen sind da diskreter.

## 4.2.19 Brechung von Schallwellen

Wenn Schall aus kalten Luftschichten in warme Schichten eindringt, ändert sich seine Geschwindigkeit. Das bewirkt eine Richtungsänderung, die Richtung wird «gebrochen».

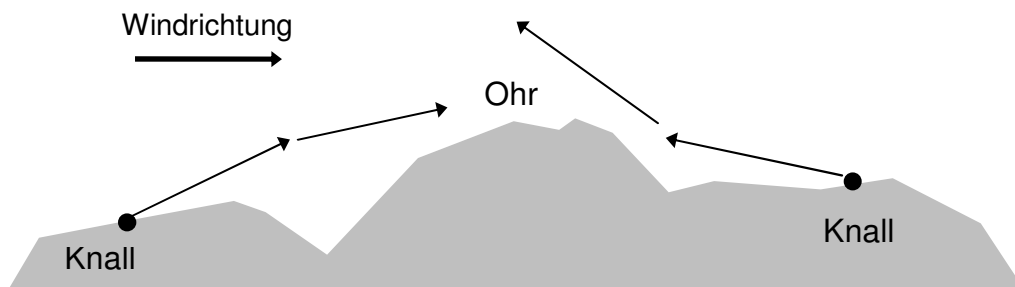


Bei extremen Verhältnissen kann sogar Totalreflexion entstehen. In diesem Fall kann der Schall (beim Grenzwinkel der Totalreflexion, siehe Optik) überhaupt nicht mehr in die andere Luftschicht eindringen und wird deshalb vollständig gespiegelt.



Die Schallrichtung wird auch durch die Windrichtung beeinflusst.

Die Brechung der Schallwellen(-richtung) beim Übertritt von stiller in bewegte Luft ist der Grund, warum wir meinen, dass uns der Wind den Schall zu trägt!

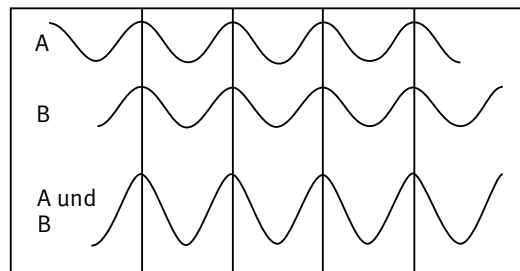
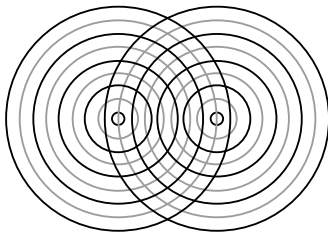


Der Wind «trägt» aber den Schall nicht, denn der Unterschied zwischen Wind und Schallgeschwindigkeit (ungefähr 340 m/s) ist sehr gross.

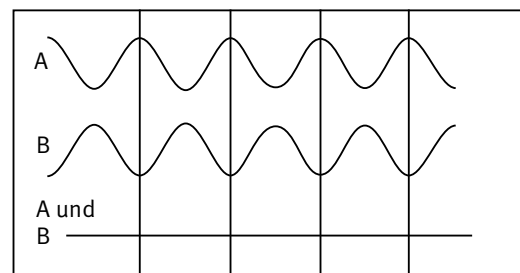
Die bessere oder schlechtere Hörbarkeit von Schall bei Wind ist zudem auch eine Folge der Wirbelbildungen um das Ohr.

## 4.2.20 Interferenz von Schallwellen

Wie alle Wellen können sich auch Schallwellen überlagern und dabei interferieren. Modellhaft kann die Interferenz von Schallwellen mit der Überlappung konzentrischer Kreise gezeigt werden. Dazu werden die Zentren zweier identischer Folien mit konzentrischen Kreisen auf dem Hellaumprojektor nahe nebeneinander gelegt. Da, wo sich die Kreise (Wellenberge) treffen «verstärken» sie sich, da wo Berg auf Tal trifft, «schwächen» sie sich. Es entstehen dabei helle und dunkle «Radialzonen».

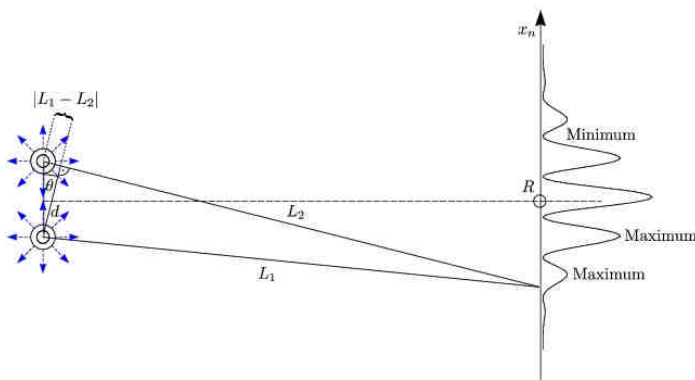


Die Wellen A und B verstärken sich (konstruktive Interferenz).

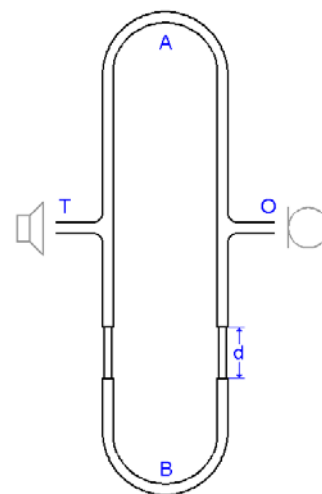


Die Wellen A und B löschen sich gegenseitig aus (destruktive Interferenz).

Zwei Lautsprecher – mit dem gleichen Sinuston eines Sinusgenerators gespeist – werden ungefähr in der Entfernung von einer bis zwei Wellenlängen des gespielten Tones nebeneinander gestellt. Bewegen wir uns im Abstand von einigen Metern vor diesen Lautsprechern, hören wir abwechselnd «laut» und «leise», da  $L_1$  und  $L_2$  sich an einigen Stellen um eine halbe, an anderen Stellen um eine ganze Wellenlänge unterscheiden.



<http://uni-ka.the-jens.de/html/exphys1/ex1613x.gif>



<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/Quincke-Rohr.gif>

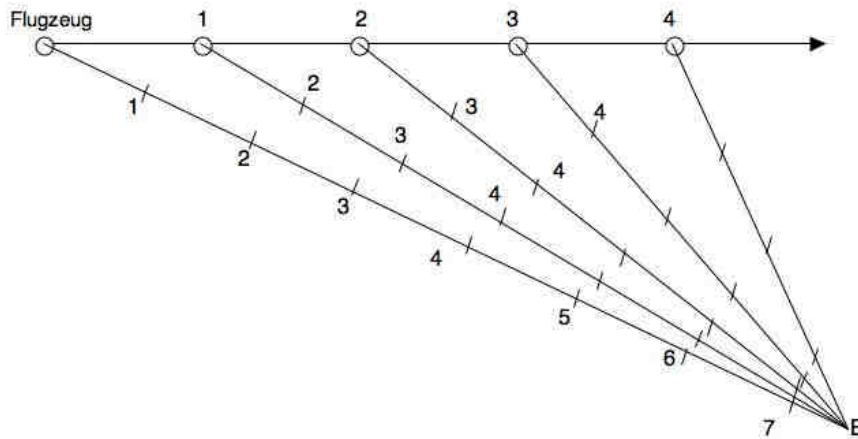






### Gedankenmodell zum Überschallknall:

Skizziere ein Flugzeug, das sich auf einer geraden, horizontalen Linie dem Beobachter B entgegen bewegt. Nimm an, dass der Schall in jeder Sekunde 2 cm auf deinem Blatt zurücklegt. Immer nach einer Sekunde erzeuge das Flugzeug einen «Knall». Wenn das Flugzeug mit Schallgeschwindigkeit (oder schneller) fliegt, folgen sich die Knallpunkte in einem Abstand von 2 cm (oder mehr).



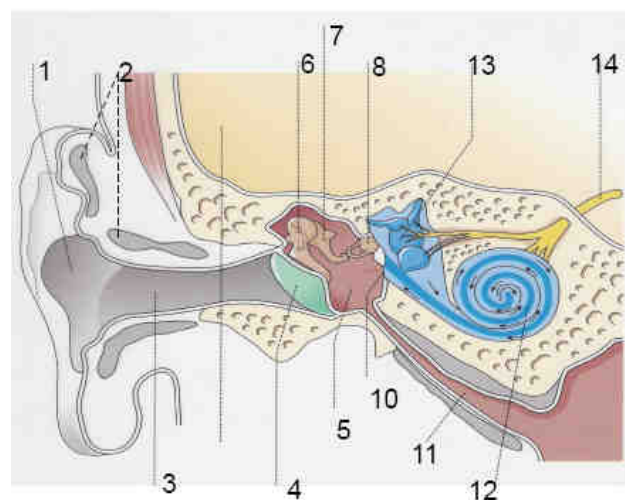
Zeichne nun von jedem dieser «Knallpunkte» aus eine Gerade zu B. Trage auf jeder Geraden 2 cm-Marken (so schnell bewegt sich der Knallschall) ein und nummeriere diese nach Sekunden. Du stellst fest, dass sich alle zeitgleichen Marken bei B häufen. B hört alle «Knalle» gleichzeitig.

## 4.3. Schall und Biologie

### 4.3.1 Das menschliche Ohr

Beim Menschen wird das Ohr in die drei Bereiche **Außenohr, Mittelohr und Innenohr** eingeteilt:

Das **Außenohr** umfasst die Ohrmuschel (1), den **Ohrknorpel** (2), das **Ohrläppchen** und den äußeren Gehörgang oder auch **Ohrkanal** (3). Es dient nicht nur dem Einfangen des Schalls, sondern auch, um eine bestimmte Einfallsrichtung des Schalls durch spektrale Minima und Maxima zu codieren. Die zahlreichen Erhebungen und Vertiefungen der Ohrmuschel bilden jeweils akustische Resonatoren, die jeweils bei Schalleinfall aus einer bestimmten Richtung angeregt werden. Hierdurch entstehen richtungsabhängige Minima und Maxima im Frequenzspektrum des Ohrsignals, die vom Gehör zur Bestimmung der Einfallsrichtungen oben, unten, vorn oder hinten genutzt werden (richtungsbestimmende Bänder).



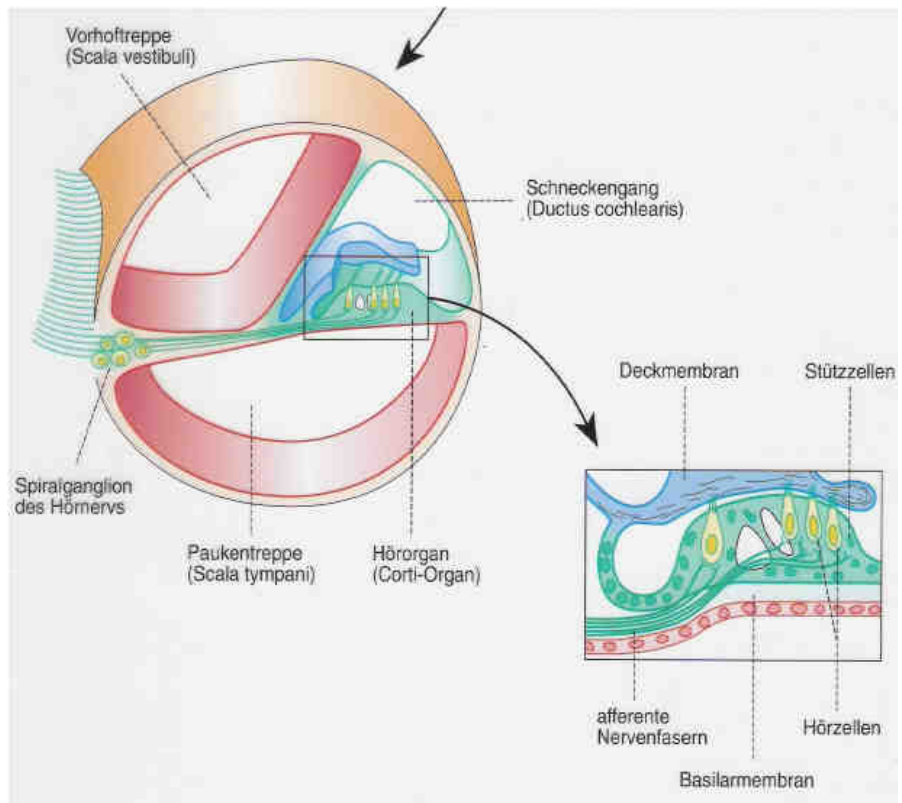
Anatomie des Menschlichen Ohrs.

Quelle: Urban & Schwarzenberg aus «Foliendner Humanbiologie (Speckmann/Wittkowski)»

Zum **Mittelohr** (5) gehören das **Trommelfell** (4) und die **Gehörknöchelchen** (**Hammer** (6), **Amboss** (7) und **Steigbügel** (8)). Der Steigbügel sitzt auf der Membran des **ovalen Fensters**, welches Mittelohr und Innenohr trennt. Die Schallenergie wird von einer grösseren Fläche (Trommelfell) durch die Gehörknöchelchen auf eine kleinere Fläche (ovales Fenster) übertragen. Dadurch findet auch eine Signalverstärkung statt. Unterhalb des ovalen Fensters, über welches der Schall ins Innenohr geleitet wird, liegt das **runde Fenster** (10). Es ist ebenfalls mit einer Membran verschlossen, und dient zum Ausgleich der Druckschwankungen im Innenohr. Die **Eustachische Röhre** (11), auch Ohrtrumpete genannt, verbindet Mittelohr und Nasenrachenraum und dient zum Druckausgleich im luftgefüllten Mittelohr.

Das **Innenohr** liegt in einem kleinen, flüssigkeitsgefüllten Hohlraumssystem (knöchernes Labyrinth, lat. Labyrinthus osseus) innerhalb des Felsenbeines, eines Teils des Schläfenbeines. In diesem knöchernen Labyrinth befindet sich das membranöse oder häutige Labyrinth (lat. Labyrinthus membranaceus), bestehend aus der **Hörschnecke** (12) (lat. Labyrinthus cochlearis, kurz: Cochlea), in der Schall in Nervenimpulse umgesetzt wird, und dem **Gleichgewichtsorgan** (13) (lat. Labyrinthus vestibularis). Das Gleichgewichtsorgan besteht aus den **Bogengängen** und zwei bläschenförmigen Anteilen, dem Utriculus und dem Sacculus. Es dient dem Erkennen von Bewegungsänderungen und der Richtung der Erdanziehungskraft. Hörschnecke und Gleichgewichtsorgan sind ähnlich gebaut: Beide sind mit einer Flüssigkeit (Endolymphe) gefüllt und besitzen Haarzellen. Die Haarzellen sind zylinderförmig und haben ihren Namen von den etwa 30 bis 150 haarartigen Fortsätzen am oberen Ende der Zelle (Stereozilien). Die Haarzellen der Hörschnecke werden auch Hörzellen genannt.

Durch Bewegungen der Flüssigkeit werden die Härchen gebogen und lösen dabei Nervenimpulse aus. Am unteren Ende befindet sich eine Synapse mit einem sensorischen Neuron. Werden nun durch Schallschwingungen oder Bewegungsänderungen des Kopfes die Haarfortsätze ausgelenkt, schütten die Hörzellen einen Neurotransmitter aus, welcher die darunterliegende Nervenzelle stimuliert. Jede Nervenzelle steht nur mit wenigen Haarzellen im Kontakt. Von der Hörschnecke geht der **Hörnerv** (14) gemeinsam mit den Nervenbündeln des Gleichgewichtsorganes als Nervus vestibulocochlearis in Richtung Gehirn.



Querschnitt durch die Hörschnecke

Quelle: Urban & Schwarzenberg aus «Folienordner Humanbiologie (Speckmann/Wittkowski)»

## 4.3.2 Richtungshören

Ob Geräusche von links oder rechts kommen, können wir anhand der **Zeitverschiebung** leicht feststellen. Um die Richtung genauer zu bestimmen sind wir auf die Ohrmuscheln angewiesen. Die Vertiefungen und Erhebungen der **Ohrmuschel** bilden ein akustisches Filtersystem. Je nachdem, aus welcher Richtung der Schall auf das Ohr trifft, entstehen unterschiedliche Filtermuster. Somit erhält jede Richtung ihre individuelle Klangfärbung. Dieses wird vom menschlichen Gehör genutzt, um Geräusche von vorne, hinten, oben oder unten zu unterscheiden. Die Ohrmuscheln können den Schall also nicht nur sammeln und dadurch verstärken, sondern geben ihm auch noch Informationen über die Richtung mit, die dann im Innenohr und im Gehirn entschlüsselt wird.

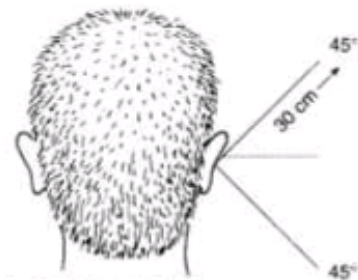
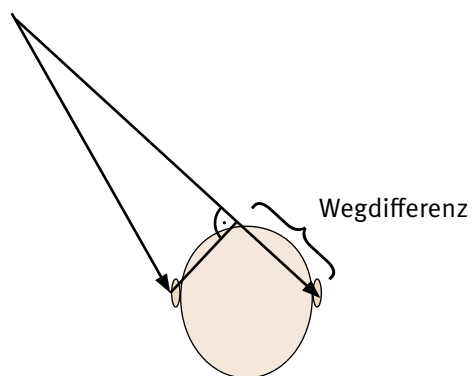
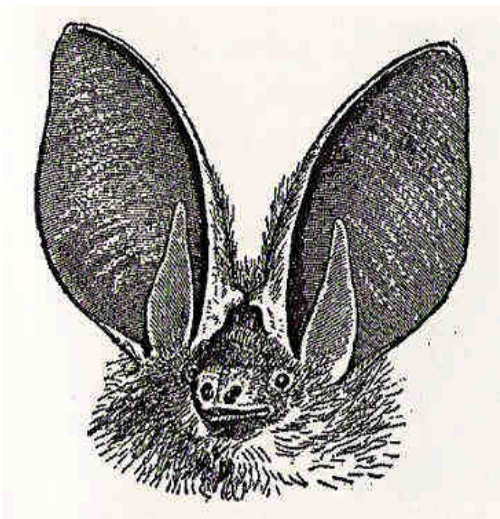


Abb. 1: Vertikale Schall-Lokalisation; Unterscheidung zwischen oben und unten.

Quelle: <http://www.schule-bw.de/unterricht/faecher/nwt/unterrichtseinheiten/einheiten/schall/ohr1.html>  
(Speckmann/Wittkowski)



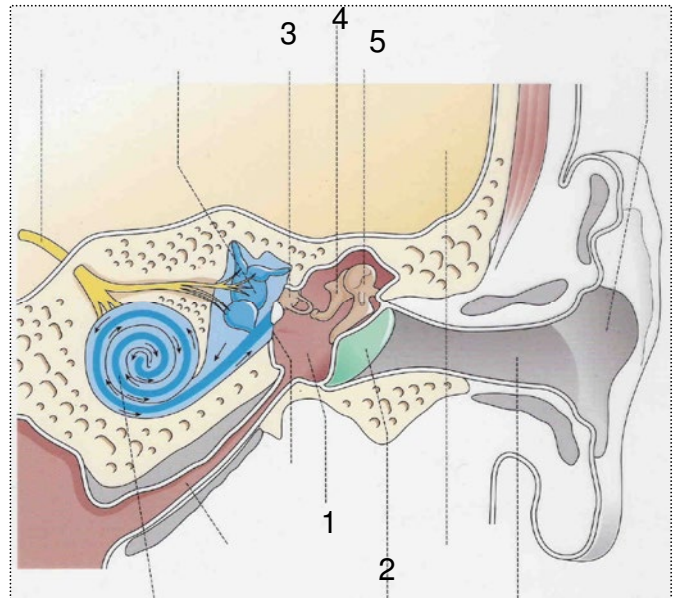
Der Gehörgang der Fledermäuse ist durch den Tragus abgedeckt.

Quelle: [www.studentenlabor.de/ws04\\_05b/SinneSeminar/Echoortung/Echoortung\\_Code/Echoortung\\_c.html](http://www.studentenlabor.de/ws04_05b/SinneSeminar/Echoortung/Echoortung_Code/Echoortung_c.html)

Die Ohrmuscheln der meisten anderen Säuger sind ausserdem noch viel beweglicher als unsere, so dass einzelne Geräusche gezielt verstärkt und geortet werden können. Bei den Fledermäusen, welche auf sehr präzises Richtungshören angewiesen sind, ist der Gehörgang durch den sogenannten Tragus abgedeckt, so dass Geräusche fast nur durch Reflexion an den Ohrmuscheln ins Ohr gelangt. Dadurch wird der Filtereffekt weniger mit dem direkten Klang überlagert und die Auflösung verbessert sich.

### 4.3.3 Verstärkung im Mittelohr

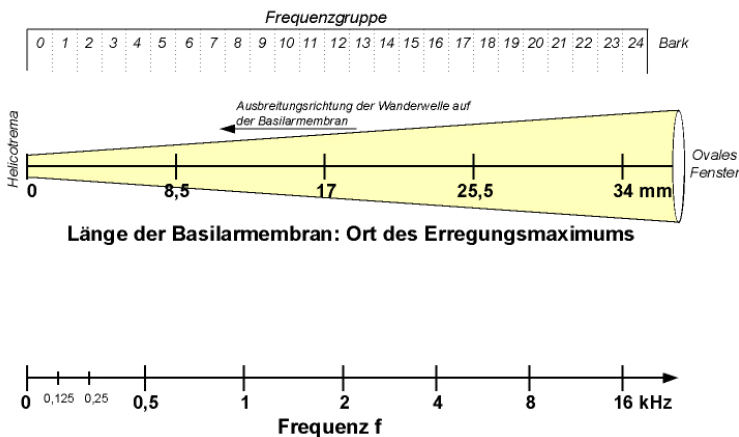
Das Mittelohr (1; auch Paukenhöhle genannt) dient zur Verstärkung des Schallsignals. Die Schallwelle, welche durch die Ohrmuschel und den äusseren Gehörgang auf das Trommelfell (2) geleitet wird, bringt dieses zum Schwingen. Durch die Gehörknöchelchen (3 Hammer, 4 Amboss und 5 Steigbügel) wird die Bewegung auf das ovale Fenster am Innenohr übertragen. Dabei wird durch die Anordnung der Hebelarme erreicht, dass die Energie der Schallwelle am Trommelfell auf das viel kleinere ovale Fenster übertragen wird, was eine Verstärkung des Schalldrucks zur Folge hat. Dies entspricht der Umkehrung einer hydraulischen Presse.



Menschliches Mittel- und Innenohr: Die Schallausbreitung in der Hörschnecke ist durch die Pfeile dargestellt.

Quelle: Urban & Schwarzenberg aus «Folienordner Humanbiologie (Speckmann/Wittkowski)

### 4.3.4 Unterscheiden von Tonhöhen



Menschen sind in der Lage Töne mit Frequenzen von 20 Hz bis etwa 20 kHz zu hören. Am empfindlichsten sind wir für Frequenzen von 2-4 kHz. Dabei können wir bereits Frequenzunterschiede von 3 Hz detektieren.

Die Schallwellen werden in der Hörschnecke durch die Basilarmembran auf die Haarzellen übertragen. Die Haarzellen selbst reagieren auf alle Frequenzen gleich. Erst die Geometrie der Hörschnecke und der Basilarmembran bewirkt, dass Schallwellen verschiedener Frequenzen verschiedene Haarzellen anregen. Durch die gegen innen dicker werdende Basilarmembran der Hörschnecke werden auf die inneren Haarzellen nur tiefere Töne übertragen, während die äusseren Haarzellen sowohl bei hohen als auch bei tiefen Tönen angeregt werden (im Hirn werden bei tiefen Tönen die entsprechenden

Reize der äusseren Haarzellen ignoriert.). Da die Haarzellen für hohe Töne häufiger und stärker angeregt werden, sind sie bei lärmbedingter Schwerhörigkeit auch stärker beeinträchtigt.

Quelle: [www.Wikipedia.com](http://www.Wikipedia.com)



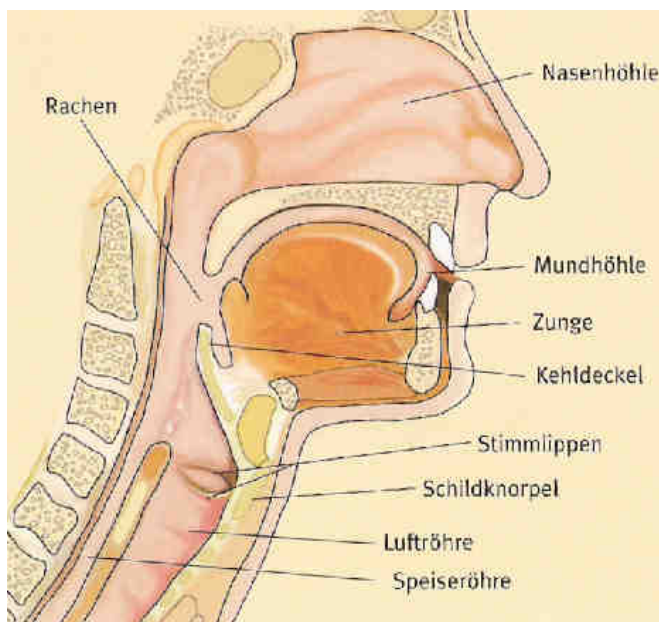
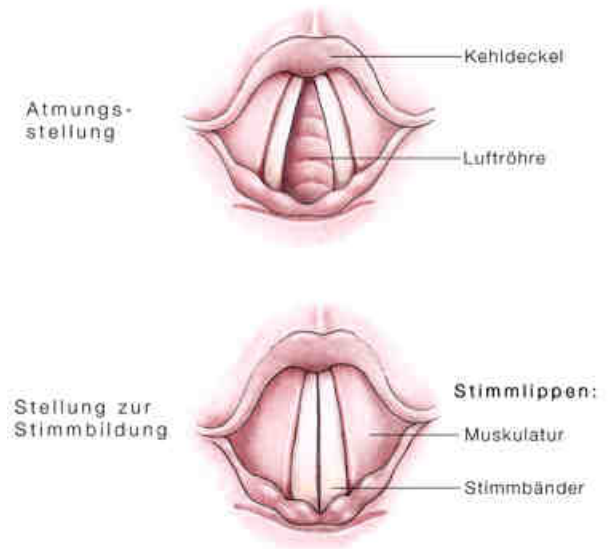
## 4.3.5 Stimmbildung

Die menschliche Stimme wird durch das Zusammenwirken der beiden Stimmbänder im **Kehlkopf** und den Ansatzräumen erzeugt.

Der Kehlkopf stellt den oberen Abschluss der Luftröhre dar, er liegt vorne im Hals und ist besonders bei Männern oft deutlich als Adamsapfel zu erkennen. Im Kehlkopf sind die beiden Stimmlippen gespannt, komplexe Muskel- und Gewebeschichten, deren Stellung durch Muskeln, Knorpel und Gelenke verändert werden kann. Die Stimmlippen können die Luftröhre bis auf einen kleinen Spalt verschließen. Diese engste Stelle im Kehlkopf bezeichnet man als Stimmritze (Glottis). Die Stimmritze wird zum Atmen durch Abduktion der entspannten Stimmlippen weit geöffnet, damit die Luft ungehindert ein- und ausströmen kann. Um stimmhafte Töne zu erzeugen, versetzt die aus der Lunge strömende Luft die Stimmbänder (die

Ränder der Stimmlippen) in Schwingung, ähnlich dem Rohrblatt eines Holzblasinstrumentes. Je entspannter die Stimmlippen sind, desto langsamer schwingen sie und der Grundton des Klanges wird tiefer. Sind sie angespannter, schwingen die Stimmbänder schneller und der Ton wird höher.

Die Ausgestaltung der Laute findet dann im **Vokaltrakt** statt. So werden die Hohlräume bei Menschen und Tieren bezeichnet, welche eine Filterung und Färbung der Töne bewirken. In Analogie zum Ansatzrohr bei Blasinstrumenten wird der Vokaltrakt wegen der Ähnlichkeiten bei der Lauterzeugung oft ebenfalls als Ansatzrohr bezeichnet.



Bei Säugetieren beginnt der Vokaltrakt am Kehlkopf und besteht aus dem Rachen, dem Mundraum und den Nasenhöhlen und endet mit den Lippen. Die Stimmritze erzeugt einen undifferenzierten Laut, der im Ansatzrohr durch die unterschiedliche Formung der Mundlippen und durch die unterschiedliche Zungen- und Kieferstellung zu einem Sprech- oder Singlaut verändert wird.

Die Vögel haben zwei Kehlköpfe, wobei der obere nur zur Trennung von Luft und Nahrungswegen dient, während der untere als Stimmorgan eingesetzt wird.

## 4.3.6 Echoortung der Fledermäuse

Eine der bekanntesten Anwendungen der Akustik in der Biologie ist die Echoortung der Fledermäuse. Fledermäuse nutzen nicht nur die Schallwellen, die von anderen Lebewesen ausgesandt werden, sondern senden selbst Schallwellen aus, um aus dem Echo Rückschlüsse auf ihre Umgebung zu ziehen. Auf die Optik übertragen könnte man sagen, dass Fledermäuse ihre Umgebung nicht nur anschauen, sondern sie auch aktiv ausleuchten. Dabei sind einige Fledermäuse in der Lage, kleine Objekte in der Grössenordnung von einem Millimeter zu lokalisieren.

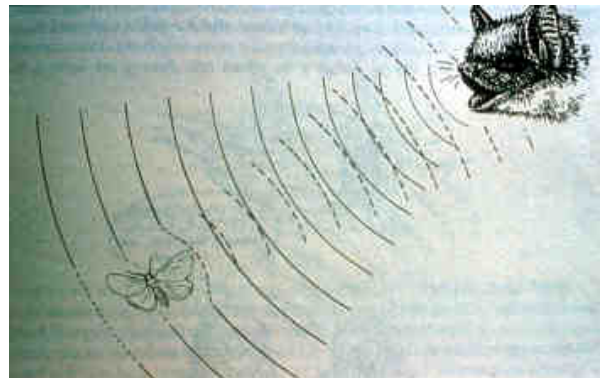
### Physikalische Parameter der Ortungsrufe

**Frequenz:** Je höher die Frequenz einer Welle, desto kleiner können die Flächen sein, welche ein Echo erzeugen. Eine brauchbare Reflexion findet nur statt, wenn das Hindernis grösser ist als die Wellenlänge des ausgesendeten Signals (vgl. Experiment 3 im iLab). Deshalb eignen sich hohe Töne besser, um feine Strukturen zu erkennen (Mücken, feine Äste, Drähte).

Hohe Töne sind allerdings einer stärkeren atmosphärischen Dämpfung unterworfen. Das heisst, sie breiten sich bei gleicher Anfangsenergie weniger weit aus. Fledermäuse die auf engem Raum kleine Insekten und Hindernisse erkennen müssen, stossen deshalb höhere Töne aus als Fledermäuse die in offenem Gelände grosse Insekten jagen.

**Bandbreite:** Viele Fledermäuse nutzen die Vorteile von hohen und tiefen Frequenzen, indem sie Rufe aussenden, welche sowohl hohe als auch tiefe Frequenzen enthalten. Je grösser die Bandbreite des Rufs, desto mehr Information kann darin enthalten sein. Die unterschiedliche Reflexion verschiedener Frequenzanteile gibt Aufschluss über Distanz, Grösse und Oberflächenbeschaffenheit von Objekten.

Andere Fledermäuse spezialisieren sich auf einen schmalen Frequenzbereich. Dabei kann das Gehör für diesen Bereich optimal ausgelegt sein. Auch viele störende Hintergrundgeräusche können dadurch ausgeblendet werden.



Fledermäuse können dank Echoortung auch nachts Insekten fangen.

Quelle: <http://www.tu-ilmenau.de/fakmb/Echoortung.4035.0.html>

### Fledermäuse und Dopplereffekt

Durch den Dopplereffekt können Fledermäuse Relativgeschwindigkeiten zwischen ihnen und dem reflektierenden Objekt bestimmen. Damit können sie Informationen zu Ihrer Geschwindigkeit und derjenigen von Beutetieren erhalten. Da die Flügel eines Insektes ihre Bewegungsrichtung bei jedem Flügelschlag wechseln, ändert sich auch die Verschiebungsrichtung des Dopplereffekts dauernd, so dass ein typisches Muster entsteht. Da der Dopplereffekt bei Reflexionen am stehenden Objekten vom Winkel zwischen Objekt, Fledermaus und Flugrichtung abhängt, kann die Fledermaus auch erfahren, ob sie mit dem Objekt kollidieren wird oder nicht. Einfach ausgedrückt: Wenn das Echo die maximal zu erwartende Frequenz hat und die Zeit zwischen Rufen und Hören gleichzeitig kurz ist, ist es Zeit, die Richtung zu ändern.

Bei Hufeisennasen hat man ausserdem zeigen können, dass sie teilweise in einer Frequenz rufen, die knapp zu tief für ihr Gehör ist. Durch den Dopplereffekt hören sie nur das Echo von sich ihnen nähernden Objekten und werden weder durch die direkten Rufe noch durch Echos von sich entfernenden Objekten gestört.

## 5. Literaturverzeichnis

Die Quellen zum Bildmaterial sind jeweils direkt bei den Abbildungen aufgeführt. Zudem finden sich auch einzelne Hinweise auf Webseiten mit Animationen oder anderem interaktivem Material. Natürlich kann es vorkommen, dass im Laufe der Zeit solche Links nicht mehr aktuell sind, oder ins «Leere» führen. Die Autoren haben darauf keinen Einfluss.

In der Folge sind einige Lehrbücher, Webseiten, Broschüren, usw. aufgeführt, welche die hier vorgestellte Theorie abdecken. Diese haben uns als Grundlage bei der Entwicklung des Dossiers gedient:

### Lehrmittel:

Broschüre: *Lärm und Gesundheit, Materialien für die Klassen 5-10*; BZgA, Köln (2008)  
Dorn, Bader; *Physik, Gymnasium Gesamtband*; Schoedel, Braunschweig (2007)  
Halliday; *Physik, WILEY-VCH* (2003)  
Litz; *Urknall*; Klett und Balmer, Zug (2007)  
Metzler; *Physik*; Schroedel (2008)  
*Physik Oberstufe, Gesamtband*; Cornelsen, Berlin (2005)  
Seiler, Hardmeier; *Lehrbuch der Physik*; Polygraphischer Verlag, Zürich (1975)  
Tipler; *Physik*; Spektrum akademischer Verlag, Heidelberg (1994)  
Veit, Ivar; *Technische Akustik*, Vogel-Verlag (1978)  
Walz; *Physik*, Schroedel (1974)

### Internet:

[www.laermorama.ch](http://www.laermorama.ch)  
[http://lernarchiv.bildung.hessen.de/sek\\_i/](http://lernarchiv.bildung.hessen.de/sek_i/)

Paul Scherrer Institut :: Schülerlabor iLab :: 5232 Villigen PSI :: Schweiz :: Tel. +41 56 310 55 40 :: [www.ilab-psi.ch](http://www.ilab-psi.ch)