Wellen Tauch ein!

Schulunterlagen für SEK I & II
im Fach Physik

ETH zürich

focusTerra
MINT-Lernzentrum

Inhalt

Trägheit	3
Periodische Bewegungen	6
Das Fadenpendel	7
Das Federpendel	11
Harmonische Schwingungen	12
Bewegungsdiagramme	14
Tonhöhe und Frequenz	16
Wellenausbreitung	17
Längs- und Querwellen	20
Überlagerung von Wellen	27
Wellentheorie von Christian Huygens (1629-1695)	30
Die Wellennatur des Lichts	33
Doppler-Effekt	37
Stehende Wellen	39

Bevor wir uns ausführlich mit Schwingungen und der Ausbreitung von Wellen befassen, wollen wir uns eine grundlegende Eigenschaft materieller Körper in Erinnerung rufen: die Trägheit. Schon Galileo Galilei hat sich beim Betrachten der Pendelbewegung des Kronleuchters im Dom von Pisa gefragt, weshalb der Kronleuchter auf beiden Seiten immer gleich hoch schwingt, und weshalb er im tiefsten Punkt nicht stehen bleibt.

Trägheit

Alle Körper sind träge. Weder geraten sie von selbst in Bewegung, noch bleiben sie von selbst wieder stehen. Um einen Körper in Bewegung zu versetzen oder ihn wieder abzubremsen, ist eine äussere Kraft erforderlich.

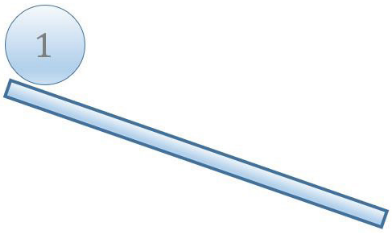
Ein einfaches Experiment

Eine Stahlkugel oder eine Glasmurmel wird auf einer horizontalen, festen und glatten Unterlage angestossen. Was geschieht anschliessend mit dieser Kugel?

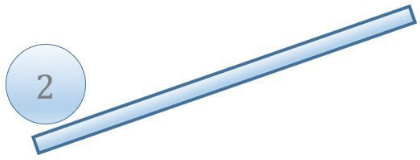
Antwort:

Ein Gedankenexperiment

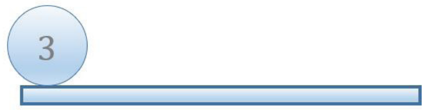
Ein Gedankenexperiment ist ein Experiment, das man nur in Gedanken durchführt. Wir betrachten dazu die folgenden drei Situationen mit der schon oben betrachteten Kugel.



Die Kugel wird an das obere Ende einer schiefen Bahn gesetzt.



Die Kugel wird am unteren Ende der schiefen Ebene nach oben angestossen.



Die Kugel wird auf einer horizontalen Ebene angestossen.

Frage:
Erkläre, was jeweils in den drei Situationen 1 und 2 mit der Kugel geschieht. Welche Schlussfolgerung ist deshalb für die Situation 3 zu ziehen?

Antwort:

Dieses Gedankenexperiment wurde bereits von Galileo Galilei im Jahr 1632 in seinem Werk *Dialog über das ptolemäische und das kopernikanische Weltbild* beschrieben. Falls dich der Originaltext von Galilei interessiert, findest du ihn auf der nächsten Seite.

Auszug aus dem Originaltext von Galileo Galilei:

SALVIATI: Sagt mir also: Wenn ihr eine ebene, völlig glatte, spiegelähnliche Fläche habt, von stahlhartem Stoffe, die nicht horizontal, sondern etwas geneigt ist, und Ihr legt einen vollkommen kugelförmigen Ball darauf aus schwerem, sehr hartem Stoffe, etwa aus Bronze, was würde er, sich selbst überlassen, Euerer Ansicht nach tun? Meint Ihr nicht auch wie ich, er würde ruhig liegen bleiben?

SIMPLICIO: Und die Fläche soll geneiget sein?

SALVIATI: Freilich, diese Voraussetzung habe ich ja gemacht.

SIMPLICIO: Keineswegs glaube ich, dass er liegen bleibt. Im Gegenteil. Ich bin völlig gewiss, dass er sich von selbst nach der geneigten Seite bewegen würde. (...)

SALVIATI: So ist´s. Wie lange und mit welcher Geschwindigkeit würde nun die Kugel fortfahren sich zu bewegen? Beachtet, dass ich von einer vollkommen runden Kugel und einer ausgezeichnet glatten Ebene gesprochen habe, um damit alle äusseren und zufälligen Hindernisse auszuschliessen. Ebenso möchte ich denn auch, dass Ihr von der Luft abseht, welche insofern ein Hindernis bildet, als sie dem Durchschneiden einen Widerstand entgegen setzt desgleichen von allen anderen zufälligen Hemmnissen, wenn etwa solche vorhanden sein sollten.

SIMPLICIO: Ich habe das alles ganz gut verstanden. Euere Frage anlangend antworte ich: Sie würde ins Unendliche fortfahren sich zu bewegen, wenn die Neigung der Ebene so lange vorhielte und zwar in stetig beschleunigter Bewegung.

SALVIATI: Wenn man aber wollte, dass die Kugel auf der nämlichen Ebene sich nach oben bewegte, würde sie das Euerer Meinung nach tun?

SIMPLICIO: Freiwillig nicht, wohl aber, wenn man sie gewaltsam hinausschiebt oder stösst.

SALVIATI: Und wenn sie nun vermöge eines gewaltsam ihr mitgeteilten Anstosses hinaufgetrieben würde, wie beschaffen und von wie langer Dauer würde ihre Bewegung dann sein?

SIMPLICIO: Die Bewegung würde immer mehr ermatten und sich verzögern, weil sie naturwidrig ist. Sie würde ferner länger oder kürzer andauern, je nach der Stärke des Impulses und nach dem Grade der Steilheit.

SALVIATI: Nun sagt mir, was mit dem nämlichen Körper (der also durch einen Stoss in Bewegung gesetzt wurde) auf einer Fläche geschähe, die weder abschüssig ist noch ansteigt. (...)

SIMPLICIO: Ich kann weder einen Grund für eine Beschleunigung noch für eine Verzögerung entdecken, da weder ein Ab- noch ein Ansteigen stattfindet.

SALVIATI: Gut, wenn aber kein Grund für eine Verzögerung vorliegt, so kann umso weniger ein solcher für ein völliges Stillestehen vorliegen. Wie lange muss demnach der Körper fortfahren sich zu bewegen?

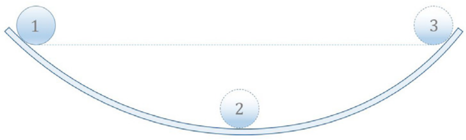
SIMPLICIO: So lange als die Ausdehnung dieser weder steilen noch geneigten Fläche vorhält.

Aus: Galileo Galilei, Dialog über das ptolemäische und das kopernikanische Weltbild. 1632

Aufgabe:
Vergleiche Galileis Argumentation mit deiner Erklärung des Gedankenexperiments von vorheriger Seite.

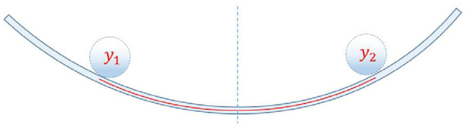
Periodische Bewegungen

Nun setzen wir unsere Kugel – entweder in einem realen Experiment oder in Gedanken – auf eine kreisförmig gebogene Bahn auf Position 1:

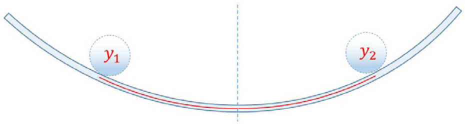


Aufgabe 1:
Beschreibe den weiteren Verlauf der Bewegung der Kugel, insbesondere im Punkt 2 und im Punkt 3. In welchen Punkten ist die resultierende Kraft auf die Kugel am grössten und wo ist sie *Null*?

Aufgabe 2:
Was kann jeweils über die resultierende Kraft bei den beliebig gewählten Auslenkungen y_1 und y_2 ausgesagt werden?



Aufgabe 3:
Wie kann jeweils der Kraftpfeil der resultierenden Kraft bei den beiden gezeichneten Auslenkungen y_1 und y_2 eingezeichnet werden?



Das Fadenpendel

Ganz ähnlich wie die Kugel in der kreisförmig gebogenen Rinne bewegt sich der Pendelkörper eines Fadenpendels. Die Masse des Fadens soll vernachlässigbar klein sein.

Die Abbildung rechts zeigt den schematischen Aufbau eines Fadenpendels. Eingezeichnet sind die wichtigsten Kenngrössen:

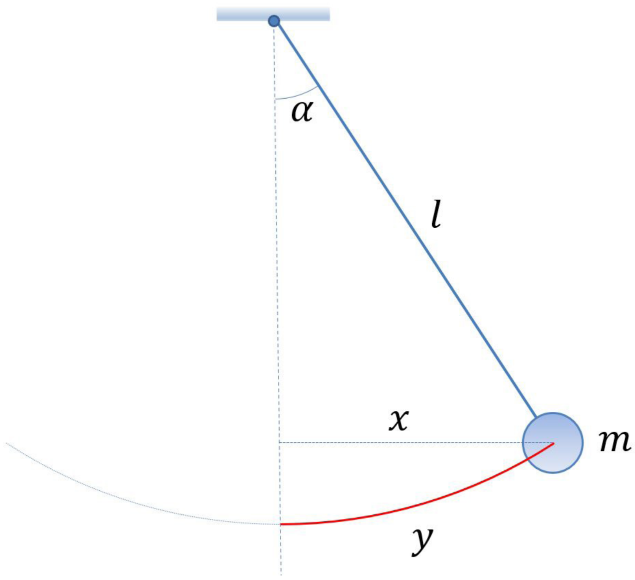
› Auslenkungswinkel α

› Pendellänge *l*

› Masse des Pendelkörpers *m*

› Horizontale Auslenkung *x*

› Effektive Auslenkung *y*



Fragen
Von welchen Grössen hängt die Schwingungsdauer *T* eines Fadenpendels ab und von welchen nicht? Wie verhalten sich die Abhängigkeiten zueinander? Dies wollen wir durch einfache Experimente selber herausfinden. Vorher wollen wir aber unsere Vermutungen zu diesen Abhängigkeiten formulieren. Kreuze dazu die deiner Meinung nach richtigen Aussagen unten an.

Vermutungen:

› Wenn man den **Auslenkungswinkel** vergrössert, dann:

☐ wird die Schwingungsdauer grösser

☐ bleibt die Schwingungsdauer gleich

☐ wird die Schwingungsdauer kleiner

› Wenn **die Masse des Pendelkörpers** verkleinert wird:

☐ wird die Schwingungsdauer grösser

☐ bleibt die Schwingungsdauer gleich

☐ wird die Schwingungsdauer kleiner

› Wird die **Pendellänge** vergrössert, dann:

☐ wird die Schwingungsdauer kleiner

☐ bleibt die Schwingungsdauer gleich

☐ wird die Schwingungsdauer grösser

Experimente

Um nun unsere Vermutungen zu überprüfen, müssen wir selber praktische Versuche durchführen. Die Pendeldauer kann von mehreren Faktoren abhängig sein. Deshalb ist es sehr wichtig, immer nur eine Grösse zu verändern und alle anderen konstant zu halten (Variablenkontrolle).

Um die Pendeldauer möglichst genau zu bestimmen, empfiehlt es sich, jeweils die Zeit *t* für z.B. zehn Schwingungen zu messen und diesen Wert dann durch Zehn zu teilen.

Auslenkung α
Wähle für ein Pendel mit einem beliebig gewählten Pendelkörper und einer beliebig eingestellten Länge verschiedene Auslenkungswinkel α und misst jeweils die Schwingungsdauer *T*. Die Auslenkung α wird dabei klein gehalten ($\alpha < 30°$), um Rotationseffekte und Zentripetalkräfte vernachlässigen zu können.

Feststellung:

Masse *m*
Nimm mindestens zwei verschiedene Pendelkörper (am besten Gewichtskörper) mit unterschiedlichen Massen. Die Pendellänge *l* ist dabei vom Aufhängepunkt bis zum Schwerpunkt des Pendelkörpers zu messen.

Feststellung:

Pendellänge *l*
Wähle einen nicht zu leichten Pendelkörper und lenke das Pendel jeweils etwa um $\alpha \approx 15°$ aus. Wähle die Pendellängen $l = 10\text{cm}, 20\text{cm}, \dots, 100\text{cm}$ und trage die Messwerte für *T* in eine Tabelle ein.

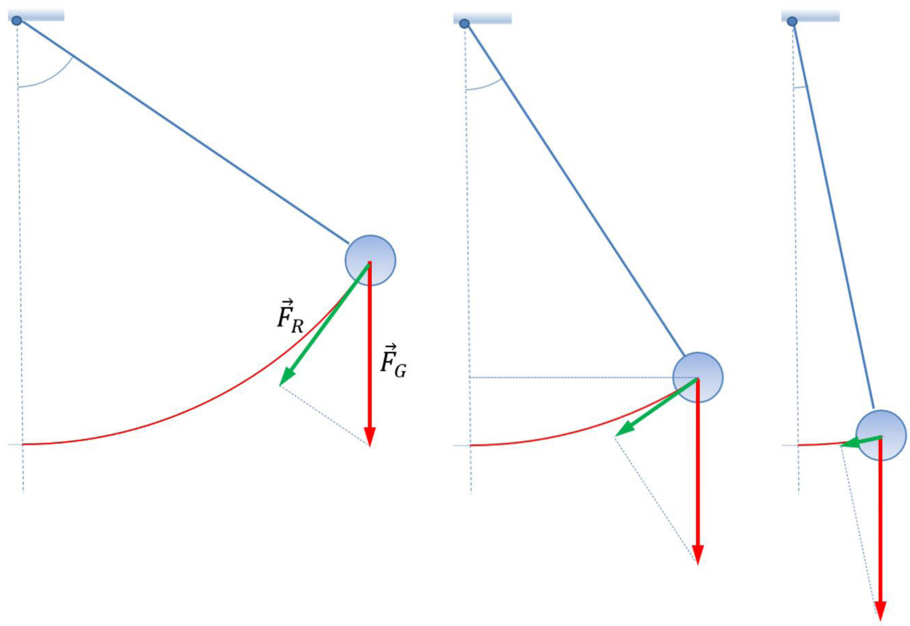
l in cm										
T in Sek										

Welche Gesetzmässigkeit kann aus den Zahlen herausgelesen werden?

Analyse

Auslenkung

Um zu verstehen, weshalb die Schwingungsdauer T nicht von der Auslenkung α des Pendelkörpers abhängt, müssen wir uns überlegen, welche Kräfte den Pendelkörper bewegen. Die folgende Abbildung zeigt ein Pendel in drei Positionen. Das Gewicht verändert sich während der Pendelbewegung nicht, deshalb ist der Gewichtspfeil in den drei Abbildungen jeweils gleich lang. Die Bewegung des Pendelkörpers ist jedoch einer Zwangsbedingung unterworfen. Er muss sich auf einem Kreisbogen bewegen. Deshalb wirkt jeweils nur die tangentiale Komponente der Gewichtskraft an den Kreisbogen (grüne Kraftpfeile).



Aufgabe 1:
Wie lässt sich aus den Kraftpfeilen für die rücktreibende Kraft bei den verschiedenen Auslenkungen in der Abbildung oben plausibel machen, dass die Schwingungsdauer T nicht von der Auslenkung α abhängt?

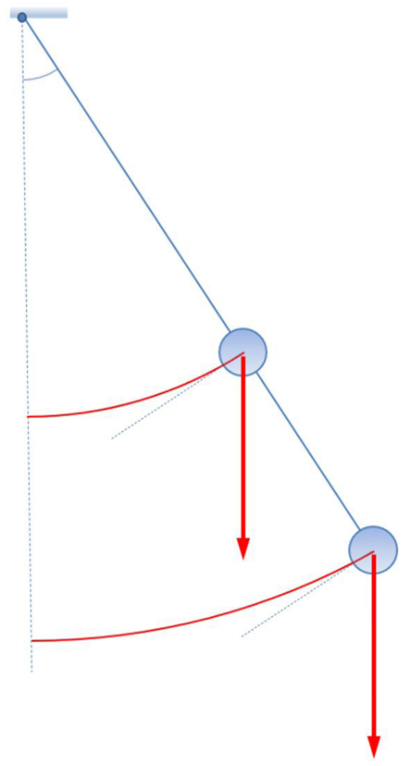
Aufgabe 2:
Wie lässt sich begründen, dass die Schwingungsdauer auch nicht von der Masse des Pendelkörpers abhängt? Vergleiche dazu die Pendelbewegung mit einem frei fallenden Körper.

Pendellänge

Bei deinen Untersuchungen hast du sicher festgestellt, dass die Schwingungsdauer mit zunehmender Länge des Pendels zunimmt.

Wir wollen uns hier überlegen, weshalb das so ist.

Um dies einzusehen, betrachten wir zwei unterschiedlich lange Pendel mit derselben Auslenkung. Beide Pendelkörper haben dieselbe Masse, deshalb sind die Gewichtspfeile gleich lang gezeichnet.

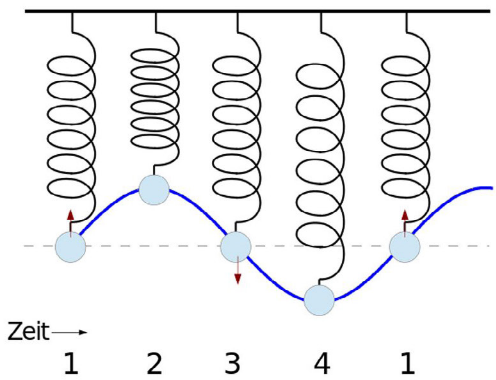


Aufgabe 3:
Zeichne die rücktreibenden Kräfte bei den beiden rechts abgebildeten Pendeln ein. Wie unterscheiden sich diese Kräfte und was lässt sich daraus auf die Schwingungsdauern der beiden Pendel schliessen?

Das Federpendel

Nun wollen wir das Schwingungsverhalten eines Federpendels untersuchen. Dazu benötigt Ihr verschiedene Schraubenfedern und diverse Gewichtskörper.

In der Abbildung oben siehst du fünf verschiedene Momentaufnahmen eines Federpendels.



Die Zeit, die der Pendelkörper braucht, um einmal nach oben und unten zu schwingen, wird Schwingungsdauer *T* genannt.
Am Ende einer solchen Bewegung befindet sich der Pendelkörper wieder in der Ausgangsposition.

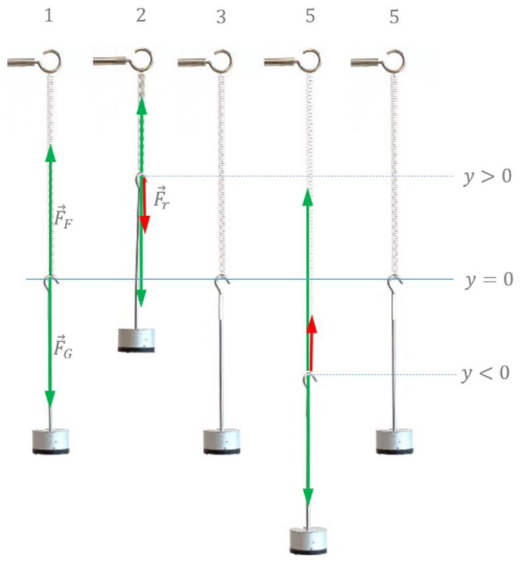
Von welchen Faktoren hängt die Schwingungsdauer ab?
Wie verändert sich die Schwingungsdauer, wenn du einen schwereren Körper an deine Feder hängst?

Wie verändert sich die Schwingungsdauer, wenn du eine stärkere bzw. eine schwächere Feder bei konstant gehaltenem Gewicht verwendest?

Wie hängt die Schwingungsdauer von der Auslenkung ab?

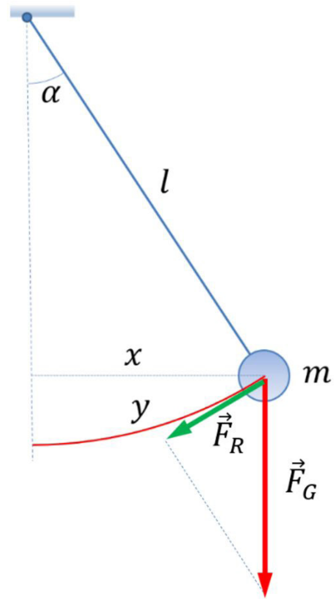
Harmonische Schwingungen

Wir haben nun das Schwingungsverhalten eines Fadenpendels und eines Federpendels untersucht. Nun wollen wir uns auf die Gemeinsamkeiten der beiden Pendel konzentrieren. Dazu betrachten wir die Kräfte, die jeweils auf den Pendelkörper wirken.



Die Kraft, mit der man eine Feder auseinanderzieht, nimmt gemäss dem Federgesetz linear mit der Ausdehnung der Feder zu. Es gilt

$$F_r = F_F - F_G = -D \cdot y$$



Aus der Geometrie am Fadenpendel liest man durch Vergleich von ähnlichen Dreiecken die Beziehung $\frac{x}{l} = \frac{F_R}{m \cdot g}$ ab. Daraus folgt

$$F_R = -\frac{m \cdot g}{l} \cdot x \approx -\frac{m \cdot g}{l} \cdot y$$

In beiden Fällen ist die rücktreibende Kraft proportional zur momentanen Auslenkung y. Beim Fadenpendel gilt das allerdings nur näherungsweise, weil $y \approx x$ nur für kleine Auslenkungen gilt.

Eine Schwingung, bei der ein solches lineares Kraftgesetz gilt, heisst harmonische Schwingung. Als Proportionalitätskonstante schreibt man in der Regel ein k und nennt das allgemein die Rückstellgrösse.

$$F_R = -k \cdot y$$

Das Minuszeichen schreibt man, weil das Vorzeichen der Rücktreibende Kraft immer entgegengesetzt zum Vorzeichen der Auslenkung ist. Ist $y > 0$ zeigt der Pfeil für die rücktreibende Kraft in negativer Richtung. Ist umgekehrt Ist $y < 0$ zeigt der Pfeil für die rücktreibende Kraft in positiver Richtung.

Viele schwingende Systeme erfüllen das obige lineare Kraftgesetz. Auch bei der Ausbreitung von Wellen schwingen die Teilchen der Welle oft harmonisch oder zumindest annähernd harmonisch. Deshalb sind harmonische Schwingungen eine wichtige Grundlage zum Verständnis von Wellen.

Falls das oben genannte lineare Kraftgesetz erfüllt ist und die Schwingung deshalb harmonisch ist, gibt es einen Zusammenhang zwischen der Rückstellgrösse k und der Schwingungsdauer T.

$$k = m \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2$$

Diese Formel gilt für alle harmonisch schwingenden Systeme und für alle harmonischen Wellen. Wir wollen diese Formel hier nicht herleiten. Die Herleitung kann aber in jedem Physikbuch nachgelesen werden. Die Verwendung dieser Formel soll hier nur an unseren beiden Beispielen, dem Fadenpendel und dem Federpendel gezeigt werden.

Berechnung der Schwingungsdauer

Beim Federpendel ist die Rückstellgrösse *k* gleich der Federkonstanten *D*. Es gilt also *k* = *D*. Beim Fadenpendel gilt hingegen $k = \frac{m \cdot g}{l}$. Damit lassen sich für beide Pendel Formeln für die Schwingungsdauer ableiten.

Aufgabe 1:
Bestimme die Formeln für die Schwingungsdauer eines Federpendels und eines Fadenpendels.

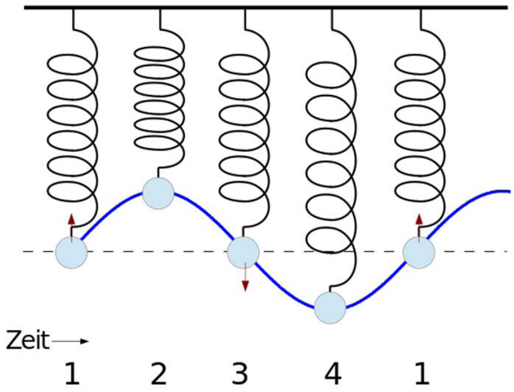
Aufgabe 2:
Ein Fadenpendel, das für eine Halbschwingung eine Sekunde benötigt, nennt man **Sekundenpendel**. Das weisst du vielleicht noch aus der Pfadi. Wie lang muss ein solches Pendel sein? Überprüfe dein Ergebnis an einem Fadenpendel mit deiner berechneten Länge.

Bewegungsdiagramme

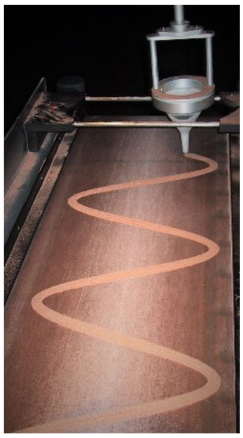
Sehen wir uns noch einmal die Bewegung eines Federpendels in der Abbildung rechts an.

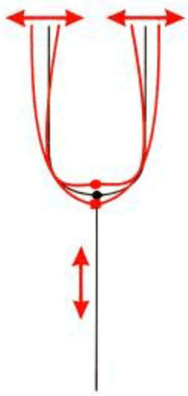
Markieren wir die Position des Pendelkörpers für mehrere Zeitpunkte, stellen wir fest, dass sich diese Punkte zu einer glatten Kurve ergänzen.

Diese Kurve sagt uns, wo sich der Pendelkörper jeweils zu einem bestimmten Zeitpunkt befindet.



Ein ähnliches Bild ergibt sich bei dem nebenstehend abgebildeten Experiment aus dem Technorama in Winterthur. Der Pendelkörper besteht aus einem Trichter, der mit feinem Sand gefüllt ist. Der Sand rieselt auf ein Laufband. Stösst man das Pendel an, markieren die Sandkörner die jeweiligen Positionen des Pendelkörpers.





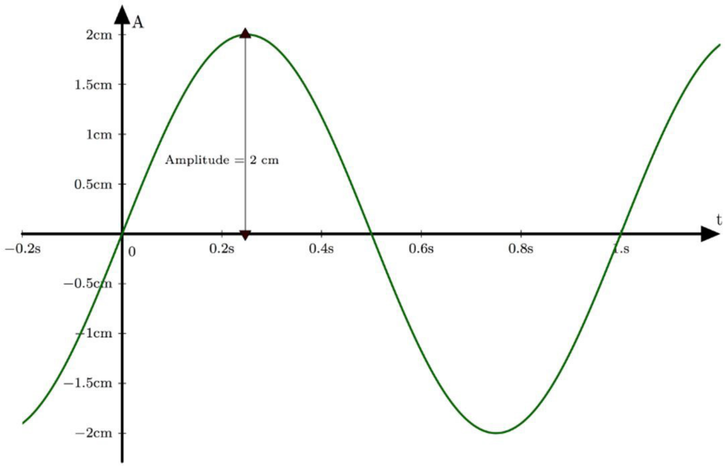
Experiment

Auch die Bewegung der Zinken einer Stimmgabel kann man auf ähnliche Weise aufzeichnen:
Bemale dazu mit Wachsmalfarben eine farbige Fläche. Übermale diese Fläche anschliessend dicht mit schwarzer Wachsmalfarbe. Nimm nun die Stimmgabel, an der ein Schreibaufsatz montiert ist. Schlage die Stimmgabel an, und ziehe sie schnell über das Papier. Übe gerade so viel Druck aus, dass der Schreibaufsatz die schwarze Schicht aufritzt.

Diese Muster können wir als Diagramme interpretieren, welche die Auslenkung eines Pendelkörpers in Abhängigkeit von der Zeit darstellen.

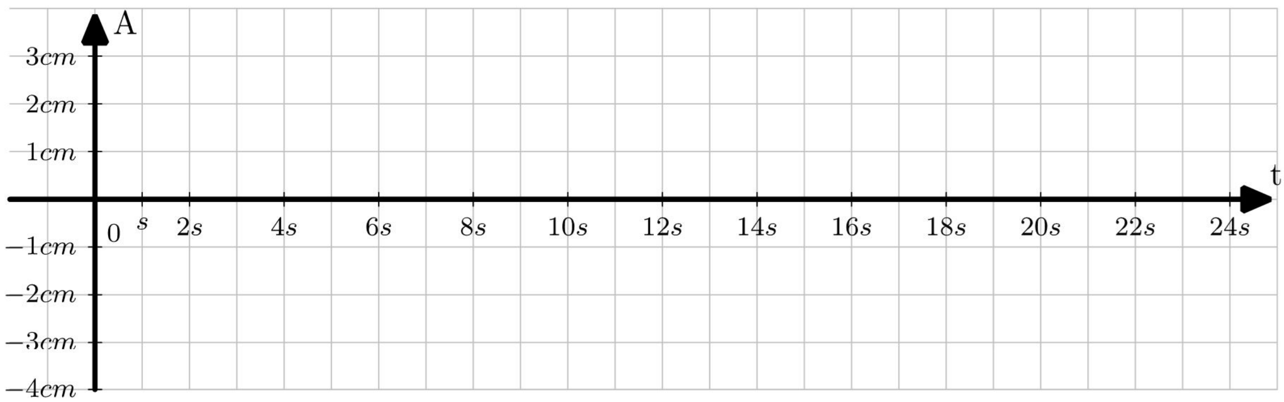
Um für ein beliebiges Pendel die Auslenkung in Abhängigkeit von der Zeit zu beschreiben, reicht es, nur ein solches Diagramm zu zeichnen. Im Unterschied zu den einfachen Mustern zeichnen wir zusätzlich Achsen ein, damit wir die Werte für die Auslenkung *A* und die Zeit *t* konkret angeben können.

Aus solchen Diagrammen können alle relevanten Grössen abgelesen werden. Die maximale Auslenkung heisst **Amplitude *A***. Sie beträgt im oben gezeigten Beispiel *A* = 2 cm.



Aufgabe 1:
Lies im Diagramm oben die Schwingungsdauer *T* sowie die Positionen des Pendelkörpers zu den Zeiten *t* = 0.4 s sowie *t* = 0.6 s ab.

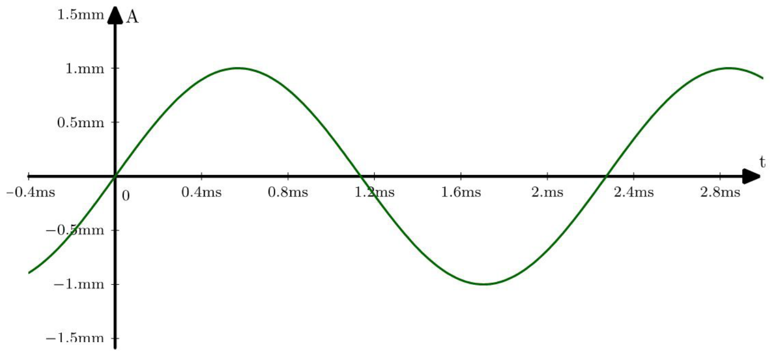
Aufgabe 2:
Zeichne unten das Auslenkungs-Zeit-Diagramm eines Pendels ein, das eine Schwingungsdauer von *T* = 8 s und eine Amplitude von *A* = 3 cm hat.



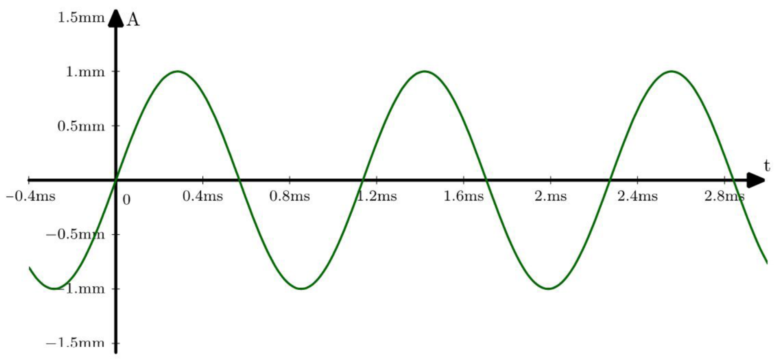
Tonhöhe und Frequenz

Die Schwingungsdauer ist nur bei langsamen Schwingungen eine nützliche Grösse. Bei einem Ton geben wir die Tonhöhe nicht durch die Dauer einer Schallschwingung an. Diese Zahlen wären einerseits sehr klein und andererseits müsste ein hoher Ton mit einer kleinen Zahl und ein tiefer Ton mit einer grossen Zahl beschrieben werden.

Wahrscheinlich weisst du auch, dass die Tonhöhe in Hertz (Hz) angegeben wird. So hat der normierte Kammerton *a'* eine Frequenz von $f = 440$ Hz. Das Diagramm unten zeigt den zeitlichen Verlauf der Auslenkung eines Schallkörpers (z.B. Lautsprechermembran).



Aufgabe 1:
Lies die Schwingungsdauer *T* des Kammertons *a'* möglichst genau aus dem Diagramm links ab und überlege dir, wie diese mit der Frequenz *f* zusammenhängt.



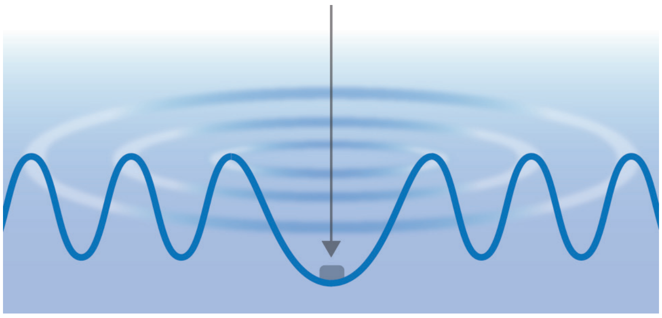
Aufgabe 2:
Das nächste Diagramm beschreibt den um eine Oktave höher liegenden Ton *a''*. Lies auch hier die Schwingungsdauer dieses Tons aus dem Diagramm ab und bestimme die Frequenz dieses Tons. Wie lässt sich die Frequenz demnach anschaulich beschreiben?

Bestimmt hast du schon von verschiedenen Wellen gehört. Es gibt Wasserwellen, Erdbebenwellen, La-Ola-Wellen im Stadion und viele weitere Wellen wie eben auch die Schallwellen. Aber was haben alle diese Wellen gemeinsam? Und was genau ist eigentlich eine Welle? Schauen wir uns als Beispiel Wasserwellen an.

Wellenausbreitung

Was ist eine Welle?

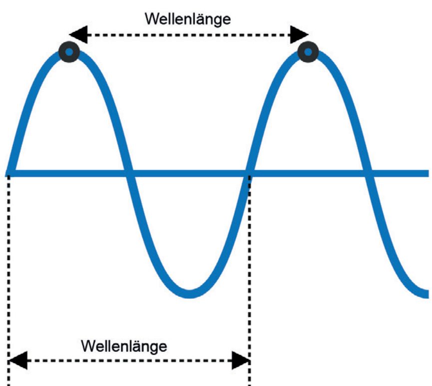
Bestimmt hast du schon einmal einen Stein in einen Teich geworfen und gesehen, wie sich Wellen auf der Wasseroberfläche bilden. Durchbricht der Stein die Wasseroberfläche, bildet sich um die Einschlagsstelle ein Wasserring. Der Wasserring läuft scheinbar nach aussen und weitere Ringe folgen ihm. Wenn wir uns den Querschnitt dieser Wasseroberfläche anschauen, erkennen wir die Form einer Welle:



Sie hat Berge und Täler. Wir sprechen deshalb auch vom **Wellenberg** und vom **Wellental**. Den Wellenberg können wir auch als Wellenfront bezeichnen.

Die Distanz zwischen zwei Wellenbergen ist die **Wellenlänge** λ.

Weil Wellen sich in ihrer Wellenlänge unterscheiden können, ist sie eine wichtige Grösse, um Wellen zu beschreiben.



Befindet sich ein Blatt auf dem Teich, kannst du beobachten, wie das Blatt sowohl hoch und runter und auch etwas seitwärts hin und her schaukelt. Es scheint zwar, als würde seitlich das Wasser in den Wasserringen von der Einschlagsstelle wegströmen. Aber an dem Blatt erkennen wir, dass die Wasserteilchen nur um ihre Gleichgewichtslage schwingen.

Das ist typisch für alle Formen von Wellen. In einer Welle wird nur die Bewegung von einem Teilchen auf das nächste übertragen. Wellen transportieren also keine Materie, sondern übertragen nur Energie.

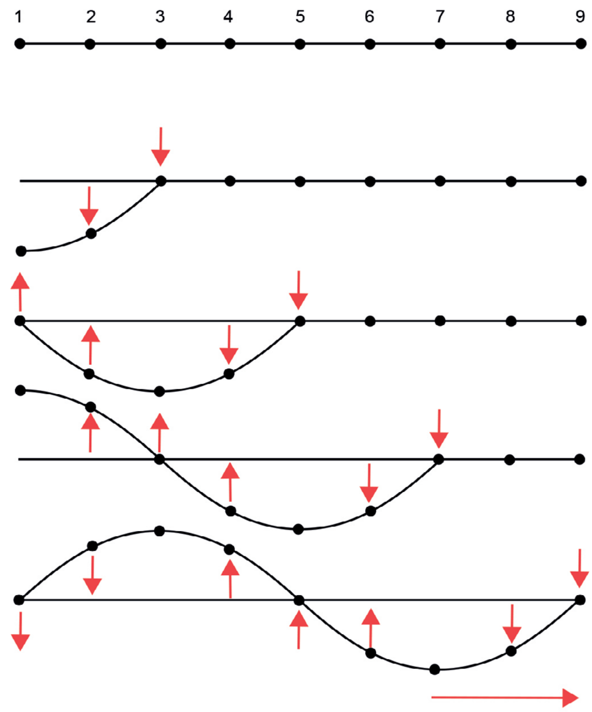
Von der Schwingung zur Welle

Das Wasser schaukelt hoch und runter. Es handelt sich dabei um eine Schwingung, wie du sie in den vorangegangenen Abschnitten kennengelernt hast. Das Wasser bewegt sich bei dieser Schwingung in der Vertikalen – aber weshalb sehen wir dann, dass sich die Wasserwelle seitlich ausbreitet? Wie kommt aus einer Schwingung eine Welle zustande?

In der Abbildung rechts betrachten wir neun verschiedene Positionen auf der Wasseroberfläche.

Ein Stein fällt bei Position 1 ins Wasser. Würden die Wassertröpfchen sich nicht gegenseitig anziehen, würde das Wasser nur bei der Position 1 hoch und runter schwingen. Weil aber Wassertröpfchen sich gegenseitig anziehen und sie deshalb miteinander verbunden sind, geschieht etwas Besonderes: Das Wasser bei den Positionen 2 und 3 wird zeitlich etwas verzögert nach unten mitgezogen. Eine kleine Delle entsteht. Diese Delle bewegt sich von der Ausschlagstelle weg.

Nun schwingt das Wasser an den Positionen 1, 2 und 3, während es bei den weiter entfernten Positionen noch in Ruhe ist. Bei Position 1 schwingt es bereits wieder hoch, während es sich bei Position 2 und 3 noch nach unten bewegt. Wieder kommt die gegenseitige Beeinflussung der Wasserteilchen zum Zuge: Weil sich das Wasser bei Position 3 nach unten bewegt, beginnt auch das Wasser bei Position 4 etwas später sich nach unten zu bewegen. Dieses Spiel setzt sich fort und mit der Zeit beginnen auch weiter entfernte Positionen zu schwingen. Betrachtet man die kleine Delle zu verschiedenen Zeitpunkten, sehen wir, wie die Delle nach rechts wandert. Wir sprechen davon, dass sich **eine Welle ausbreitet**.



Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle

Wie schnell sich eine Welle ausbreitet, kannst du messen. Bei der Wasserwelle kannst du z.B. die Distanz messen, wie weit ein Wellenberg in einer Sekunde gewandert ist. Wie die Wellenlänge und die Frequenz ist auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit eine wichtige Grösse, um eine Welle zu beschreiben. Die drei Grössen sind nicht unabhängig voneinander. Zum Beispiel könntest du die Ausbreitungsgeschwindigkeit auch auf andere Weise bestimmen. Kennst du nämlich die Wellenlänge der Wasserwelle, kannst du bei der Wasserwelle auch an einer bestimmten Stelle zählen, wie viele Wellenberge pro Sekunde vorbeiziehen. Hat die Welle eine Wellenlänge von 10 cm und du zählst zehn Wellenberge pro Sekunde – das entspricht einer Frequenz von 10 Hertz – dann ist ein einzelner Wellenberg in einer Sekunde zehn Wellenlängen, also einen Meter weitgekommen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist also gleich dem Produkt von Wellenlänge und Frequenz.

Aufgabe 1:
Studiere die Abbildung oben und überlege dir, wie weit die Welle gekommen ist, bis sich das erste Teilchen wieder an seiner Ausgangsposition befindet.

Wir können somit sagen, dass sich die Welle während einer Periode *T* genau um eine Wellenlänge λ weiterbewegt. Analog zur Formel für die Geschwindigkeit bei gleichförmiger Bewegung ***v*** **=** ***s*** **/** ***t*** können wir hier die Geschwindigkeit der Welle schreiben als

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

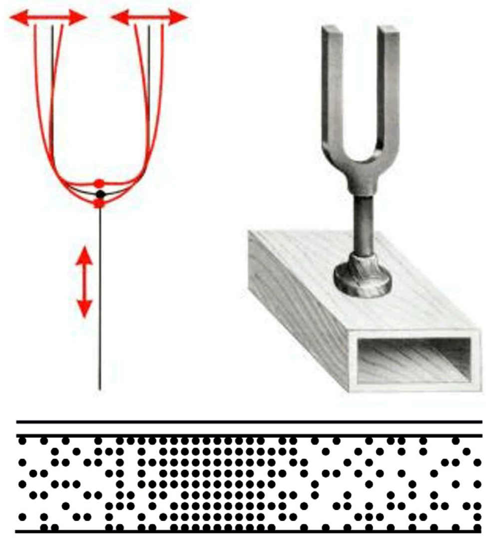
Bei Wellen ist es üblich die Wellengeschwindigkeit mit einem ***c*** zu bezeichnen anstelle von ***v***. Das ***c*** kommt vom lateinischen Wort *celeritas*, was etwa so viel wie Schnelligkeit bedeutet.

Auch Schall ist eine Welle

Im Vergleich zu den Wasserwellen können wir den Schall in der Luft nicht sehen. Wie können wir uns den Schall anschaulich vorstellen?

Schwingt eine Stimmgabel, dann wackeln die Zinken hin und her. Dieses Wackeln bewirkt, dass die Luft um die Zinken periodisch zusammengedrückt wird. Eine Verdichtung entsteht, die sich ähnlich wie der Wasserberg bei den Wasserwellen ausbreitet.

Allerdings besteht ein wesentlicher Unterschied zwischen Schall- und Wasserwellen, dem wir im nächsten Abschnitt nachgehen.



Längs- und Querwellen

Bei den Wellen, die wir bisher betrachtet haben, lag die Schwingungsrichtung der Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle.

Das ist nicht bei allen Wellen so. Eine Welle kann sich auch entlang der Schwingungsrichtung der Teilchen ausbreiten, wie wir in Abbildung 1 bei den gekoppelten Pendeln sehen können.

In Abbildung 1 sehen wir in der unteren Skizze nicht einen Wellenberg wandern, sondern hier breitet sich eine Verdichtung als Wellenfront aus.

Wellen, deren Schwingungsrichtung, senkrecht zur Ausbreitungsrichtung steht, nennen wir **Querwellen**. Wellen, bei denen die schwingenden Teilchen in Ausbreitungsrichtung schwingen, heissen **Längswellen**.

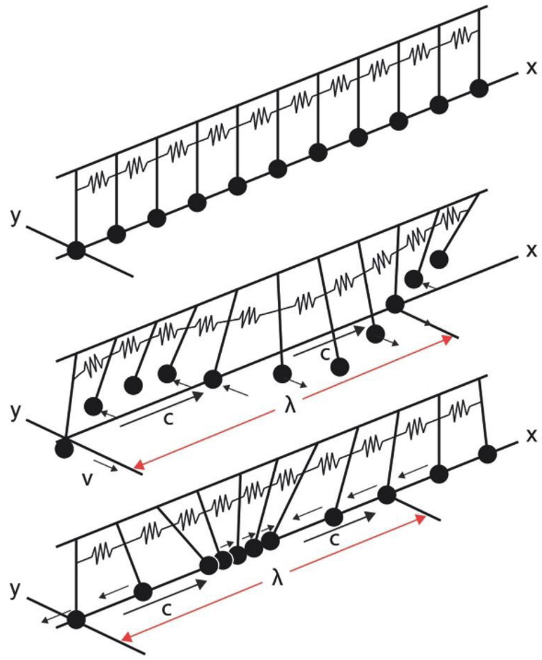


Abbildung 1: Gekoppelte Pendel. Oben: in Ruhe. Mitte: Schwingungsrichtung quer zur Ausbreitungsrichtung. Unten: Schwingungsrichtung in Ausbreitungsrichtung.

Federwellen

Auch bei der Schraubenfeder können wir Längswellen beobachten.

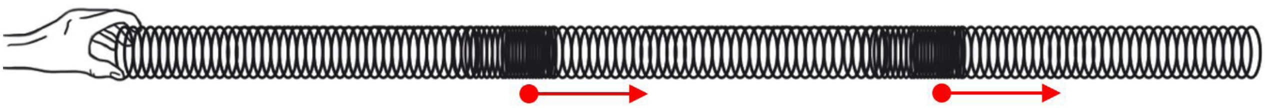


Abbildung 2: Längswellen bei einer Schraubenfeder.

Wir platzieren die Schraubenfeder zuerst so, dass sie gerade ausgerichtet und etwas vorgespannt vor uns liegt, wie in der Abbildung 2 dargestellt. Wir können der Schraubenfeder mit der Hand einen Stoss versetzen. Die Feder wird dadurch an einer Stelle gestaucht. An der gestauchten Stelle liegen die Windungen dichter. Diese Windungsverdichtung wandert als Welle durch die Schraubenfeder nach rechts. Man sieht hier besonders deutlich, dass sich bei der Federwelle nur die Verdichtung der Windungen, nicht aber die Windungen der Feder selbst, ausbreiten. Die ganze Feder bleibt ja an Ort und Stelle.

Schall- und Federwellen

Schall wird durch die Schwingung eines Körpers wie zum Beispiel einer Stimmgabel oder einer Saite verursacht. Durch diese Bewegung wird die Luft periodisch zusammengepresst, also etwas verdichtet. Diese Verdichtung breitet sich als Welle aus. Luft verhält sich im Prinzip wie eine elastische Feder. Wenn man sie zusammenpresst, dehnt sie sich beim Loslassen wieder aus. Das kann man selber erfahren, wenn man einen Luftballon zusammendrückt oder wenn man bei einer Plastikspritze die Öffnung vorne mit dem Daumen zuhält und die Luft in der Spritze zusammendrückt. Wie bei der Feder sich die Verdichtungen der Windungen ausbreiten, so breiten sich in der Luft die Verdichtungen der Luft aus. Mit Hilfe des Modells der Schraubenfeder können wir uns deshalb Schallwellen gut veranschaulichen.

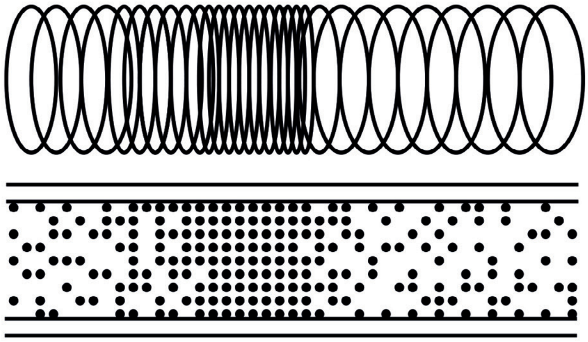
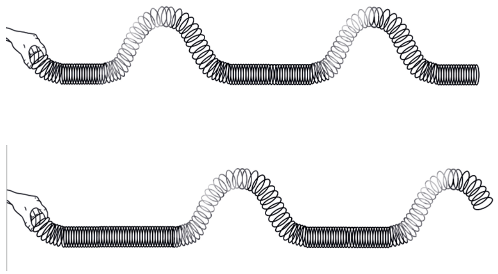
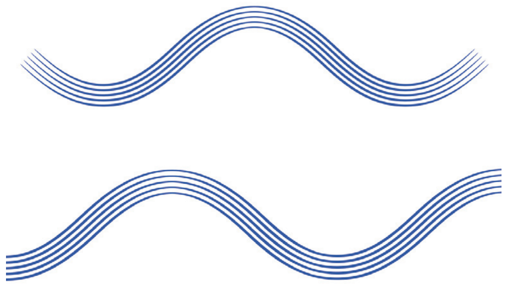
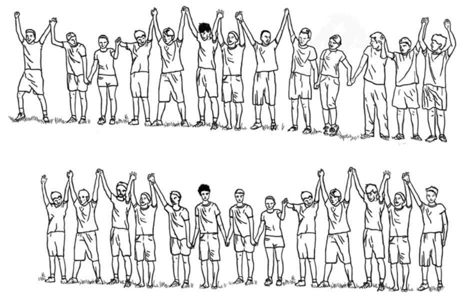
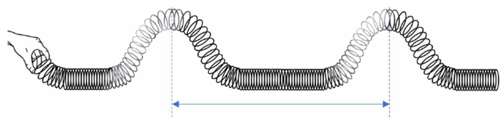
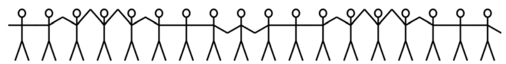


Abbildung 3: Vergleich von Federwellen und Schallwellen

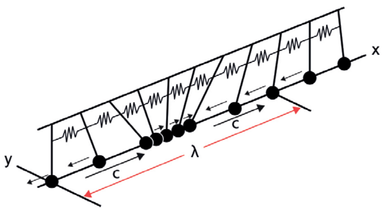
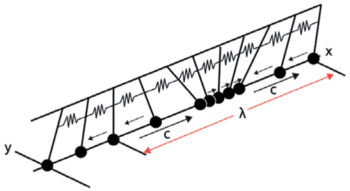
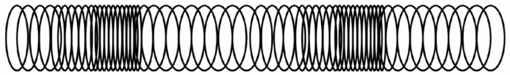
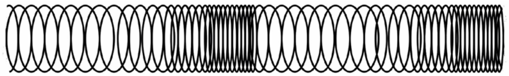
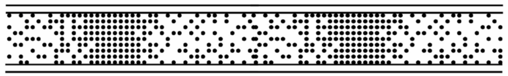
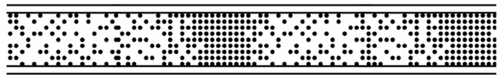
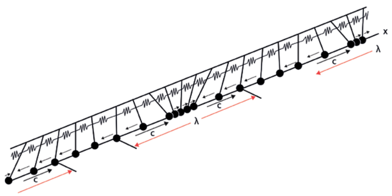
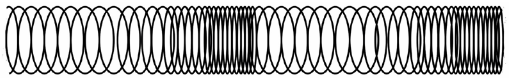
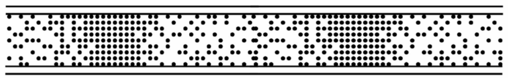
Weil die Luft in Ausbreitungsrichtung der Schallwelle schwingt, handelt es sich bei Schallwellen auch um Längswellen.

So wie sich bei der Federwelle nicht die gesamte Feder fortbewegt, so wird bei der Schallwelle auch keine Luft transportiert. Es besteht also ein wichtiger Unterschied zwischen Schallwellen und Wind, bei dem sich die Luft als Ganzes fortbewegt.

Experiment:
Bei einer Schraubenfeder lassen sich wie in einem Seil auch Querwellen erzeugen. Spannt eine etwa 2 m lange Schraubenfeder über das Lehrerpult. In dieser Feder könnt Ihr sowohl Längs- wie auch Querwellen erzeugen. Wie verändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen, wenn Ihr die Feder stärker bzw. weniger stark spannt?

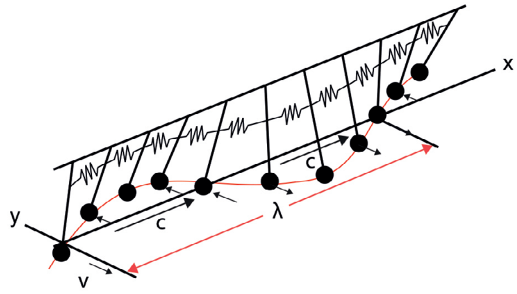
Wellenmodell	Schraubenfeder	Wasserwellen	La-Ola-Menschenkette
Zwei Moment-aufnahmen der Welle			
Art der Kopplung	Über Federkräfte		
Ausbreitungsrichtung	Nach rechts		
Zeichne die Wellenlänge ein			

Beispiele von Längswellen

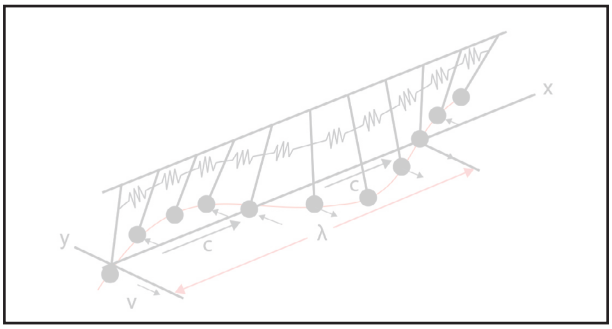
Wellenmodell	Gekoppelte Pendel	Schraubenfeder	Schallwellen
Zwei Moment- aufnahmen der Welle	 	 	 
Art der Kopplung	Über Federkräfte		
Ausbreitungsrichtung	Nach rechts		
Zeichne die Wellenlänge ein			

Aufgaben

Aufgabe 1:
In der Abbildung rechts siehst du mehrere Pendel, die miteinander verbunden sind. Wir sagen, dass die Pendel **gekoppelt** sind. Wird ein Pendel ausgelenkt, beginnen zeitlich verzögert auch die anderen Pendel zu schwingen. Eine Welle breitet sich aus.

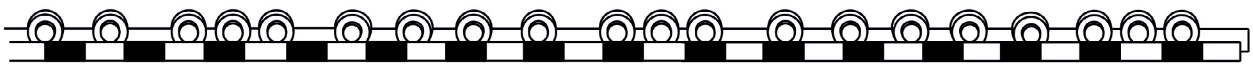


Nehmen wir an, dass sich die Welle nach rechts ausbreitet. Wie sieht eine zweite Momentaufnahme einen kurzen Moment später aus? Zeichne deine Abbildung in den Kasten rechts ein. Die Momentaufnahme kurz zuvor ist als Hilfe schwach eingezeichnet.



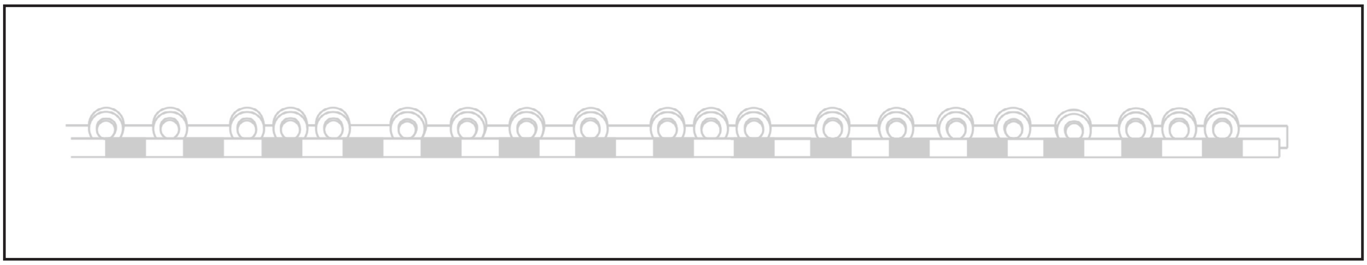
Handelt es sich hier um Längs- oder um Querwellen?

Aufgabe 2:
In der Abbildung unten siehst du mehrere Rollen in einer Schiene, die sich magnetisch abstossen.



Wird eine Rolle geschubst, beginnt sie zu schwingen. Nach und nach beginnen auch die anderen Rollen zu schwingen und eine Welle breitet sich aus.

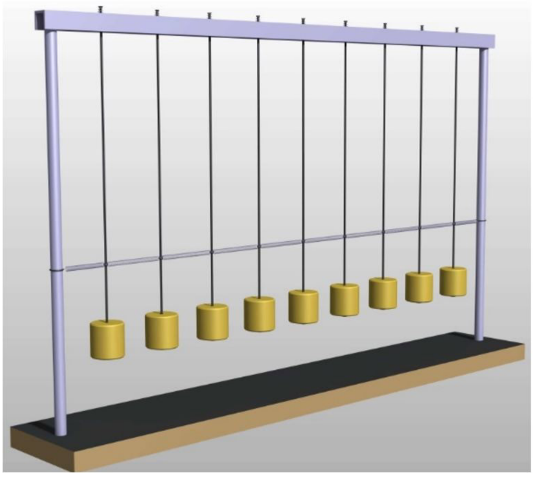
Nehmen wir an, dass sich die Welle nach rechts ausbreitet. Wie sieht eine zweite Momentaufnahme einen kurzen Moment später aus? Zeichne deine Abbildung in den Kasten unten ein. Die Momentaufnahme kurz zuvor ist wieder als Hilfe schwach eingezeichnet.



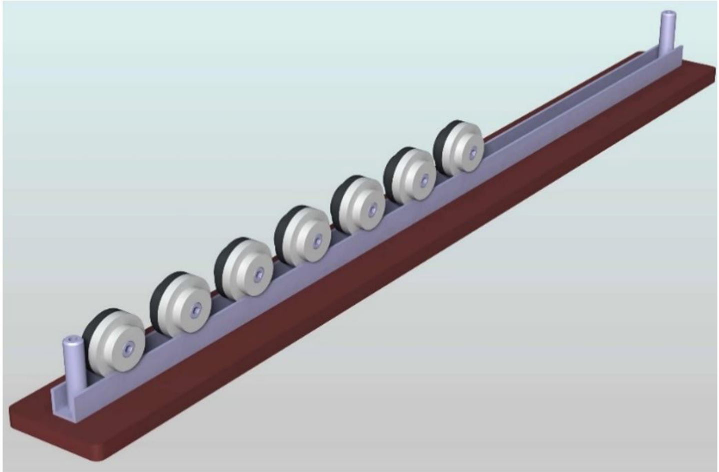
Handelt es sich hier um Längs- oder um Querwellen?

Workshop

Experimente:
Mit den beiden unten abgebildeten Wellenmodellen kannst du in einem Workshop selbst experimentieren.



Pendelmodell



Magnetmodell

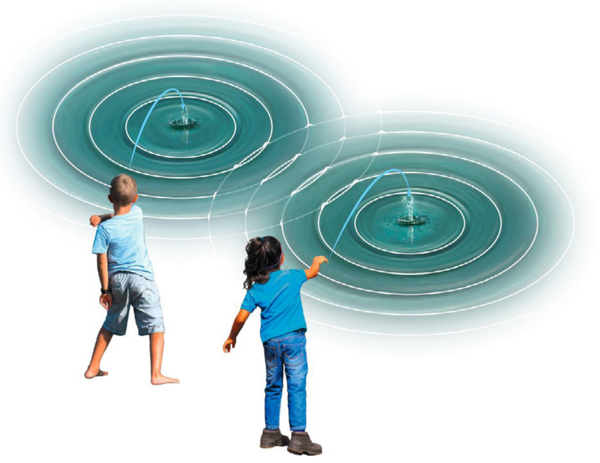
Aufgabe 1:
Überlege dir zuerst, mit welchem Modell du Längswellen bzw. Querwellen erzeugen kannst und wie du die Körper dazu anstossen musst. Ist es auch möglich, gleichzeitig Längs- und Querwellen zu erzeugen?

Aufgabe 2:
Überlegt euch in einer kleinen Gruppe, welche Wellenarten ihr kennt und ob es sich dabei jeweils um Längs- oder Querwellen handelt.

Aufgabe 3:
Recherchiert im Internet zu Wasserwellen. Um welche Wellenart handelt es sich dabei. Mit welchem Modell könnt Ihr sie simulieren? Wie müssen die Pendelkörper dazu angestossen werden?

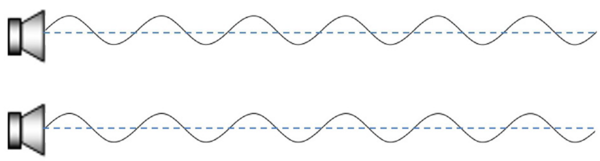
Überlagerung von Wellen

Wellen können sich überlagern. Wirft man gleichzeitig zwei Steine ins Wasser, treffen sich die Kreiswellen und gehen durcheinander hindurch. Von einer Stereoanlage überlagern sich die Schallwellen der beiden Lautsprecher in eurem Ohr Was passiert, wenn sich zwei Wellen überlagern. Dazu könnt Ihr in der Schule die folgenden Experimente machen:

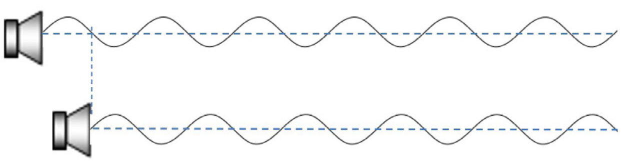


Experiment 1:
Zwei Lautsprecher sind am selben Frequenzgenerator angeschlossen. Die Schallwellen sind deshalb im Gleichtakt. Die Frequenz beträgt z.B. $f = 1000$ Hz. Ein Mikrofon ist an einem Oszilloskop angeschlossen und registriert die Signale der beiden Lautsprecher. Δs ist jeweils der Wegunterschied der Schallwellen vom Lautsprecher zum Mikrofon. Wie sieht das Oszilloskopbild jeweils aus, wenn

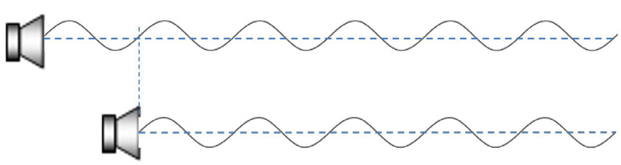
a) die zwei Lautsprecher **gleich weit** vom Mikrofon entfernt sind ($\Delta s = 0$):



b) der untere Lautsprecher um eine halbe Wellenlänge nach rechts verschoben ist ($\Delta s = \lambda/2$):



c) der untere Lautsprecher um eine ganze Wellenlänge nach rechts verschoben wird ($\Delta s = \lambda$):



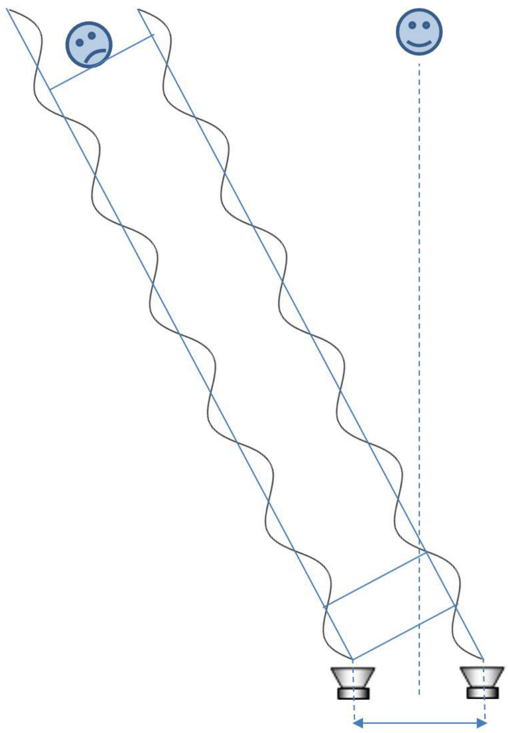
Zeichne jeweils das Oszilloskopbild rechts neben der entsprechenden Abbildung ein und notiere deine Feststellungen.

Feststellungen:

Aufgabe 1:
Bei b) sind die Lautsprecher um Δs = 17 cm gegeneinander verschoben und bei c) um Δs = 34 cm. Die Wellenlänge der Schallwellen beträgt demnach λ = 34 cm = 0.34 m. Berechne daraus die **Schallgeschwindigkeit** c bei der Frequenz f = 1000 Hz.

Experiment 2:
Nun werden die beiden Lautsprecher in einem Abstand von d = 1 m nebeneinander aufgestellt. Die Frequenz beträgt jetzt f = 1700 Hz. Wenn Ihr jetzt vor den beiden Lautsprechern im Schulzimmer umhergeht, stellt Ihr fest, dass sich die Lautstärke je nach eurer Position im Raum verändert. Es gibt also Orte, wo man den Ton gut hört und Orte, an denen man fast nichts hört. Woran liegt das? Mithilfe der folgenden Abbildung wollen wir die Sache klären.

Der fröhliche Zuhörer hört beide Lautsprecher, der traurige hört fast nichts.



Aufgabe 2:

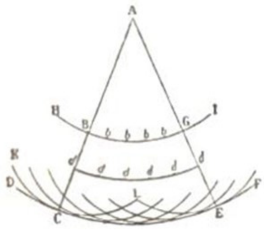
a) Weshalb ist das so? Betrachte dazu die eingezeichneten Wellenbilder ganz genau und vergleiche mit Experiment 1.

b) Wie gross ist der Winkel zwischen den beiden Zuhörern? Drücke diesen Winkel α durch den Abstand *d* der beiden Lautsprecher und die Wellenlänge λ der Schallwellen aus. Wenn sich die Wellen gegenseitig auslöschen, sprechen wir von **destruktiver Interferenz**. Wenn sie sich verdoppeln von **konstruktiver Interferenz**.

c) Unter welchem Winkel müsste ein zweiter fröhlicher Zuhörer bezüglich dem ersten stehen, der wieder beide Lautsprecher hört? Gib eine allgemeine Formel an unter welchen Winkeln jeweils konstruktive Interferenz auftritt.

Wellentheorie von Christian Huygens (1629-1695)

Huygens schreibt:

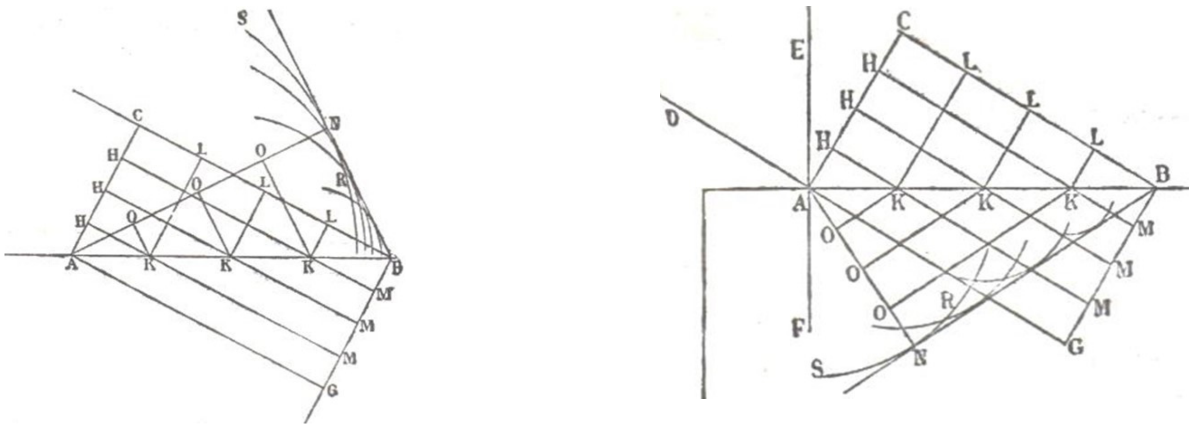


«Es ist aber nötig, den Ursprung dieser Wellen und die Art ihrer Fortpflanzung noch eingehender zu betrachten. Zunächst folgt nämlich aus den obigen Bemerkungen über die Erzeugung des Lichtes, dass jede kleine Stelle eines leuchtenden Körpers, wie der Sonne, einer Kerze oder einer glühenden Kohle, ihre Wellen erzeugt, deren Mittelpunkt diese Stelle ist.»

«Hinsichtlich der Fortpflanzung dieser Wellen ist ferner noch zu bedenken, dass jedes Teilchen des Stoffes, in welchem eine Welle sich ausbreitet, nicht nur dem nächsten Teilchen, welches in der von dem leuchtenden Punkt ausgezogenen geraden Linie liegt, seine Bewegung mitteilen muss, sondern notwendig allen übrigen davon abgibt, welche es berühren und sich seiner Bewegung widersetzen. Daher muss sich um jedes Teilchen eine Welle bilden, deren Mittelpunkt dieses Teilchen ist.»

Huygens geht also davon aus, dass bei jeder Art von Wellenausbreitung jeder Punkt Ausgangspunkt einer **Elementarwelle** (Kreiswelle) ist. Alle Elementarwellen, die von einer Wellenfront ausgehen, formieren sich zu einer neuen Wellenfront.

Mit diesem nach Christian Huygens benannten Prinzip lassen sich alle Wellenerscheinungen wie **Interferenz** und **Beugung** aber auch die **Reflexion** und die **Brechung** des Lichtes einfach erklären:



Bilder aus: Traité de la lumière, 1690 – Abhandlung zu Reflexion und Refraktion

Reflexion:
Die Strahlen *HK* treffen nacheinander auf die spiegelnde Fläche und erzeugen dort nacheinander *Elementarwellen*. Die gemeinsame Wellenfront dieser Wellen läuft unter demselben Winkel wie die einfallenden Strahlen von der Spiegelfläche weg (siehe nächste Seite).

Brechung:
Unter der Annahme, dass sich das Licht im dichteren Medium (Glas, Wasser, etc…) langsamer ausbreitet als in Luft oder im Vakuum, lässt sich auch in diesem Fall das Brechungsverhalten des Lichtes auf dieselbe Weise korrekt erklären (siehe nächste Seite).

Erklärung von Reflexion und Brechung

und die Ableitung des *Snellius'schen* Brechungsgesetzes. (Willebrord van Roijen Snell, 1680-1626)

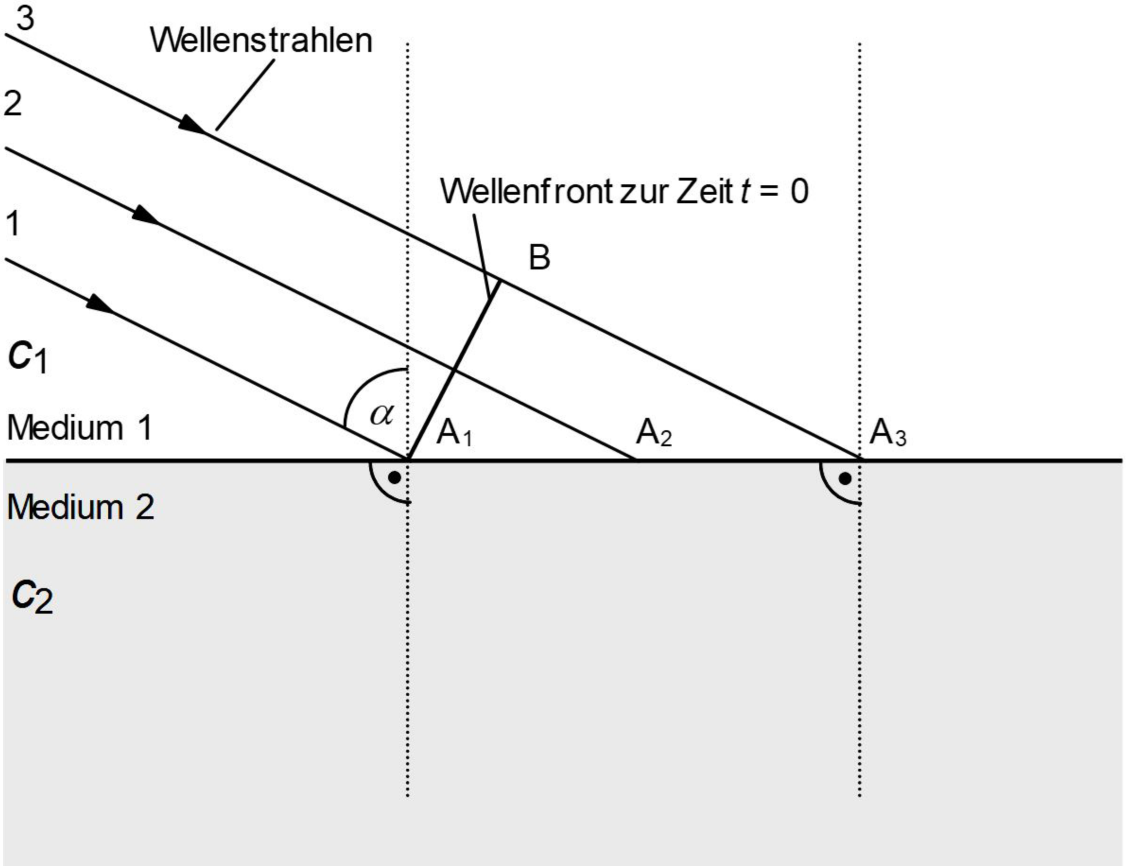
Eine ebene Welle im Medium 1 mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c_1 trifft auf eine ebene Grenzfläche von Medium 2 (ein Lichtstrahl trifft z.B. in Luft auf eine Glasplatte). Dabei wird ein Teil der Welle reflektiert und der andere Teil durchdringt das Medium 2 mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c_2. Dabei soll für dieses Beispiel gelten:

$\frac{c_1}{c_2} = n = 1.5$ bzw. $c_1 = 1.5 * c_2$

Aufgabe 1:
Konstruiere zunächst in der Abbildung unten mit Hilfe des Huygen'schen Prinzips die Wellenfronten und Wellenstrahlen, die

a) an der Trennfläche zum Medium 2 reflektiert werden und
b) ins Medium 2 eindringen und gebrochen werden.

Aufgabe 2:
Anschliessend kannst du die Beziehungen zwischen dem Einfallswinkel α dem Reflexionswinkel α' und dem Brechungswinkel β aus der Konstruktion ablesen. Die Winkel sind jeweils bezüglich des Lots zur Grenzfläche zu nehmen.



Die Wellennatur des Lichts

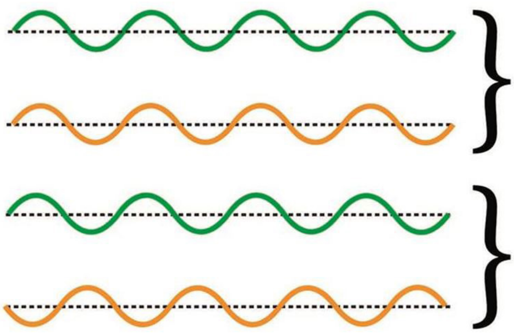
Christian Huygens vertrat also die Theorie, Licht sei eine Wellenerscheinung. Etwa zur gleichen Zeit war Isaac Newton hingegen der Meinung, dass sich das Licht in Form von Lichtteilchen ausbreite. Zu Lebzeiten der beiden Forscherkonnte diese Frage nicht geklärt werden. Im Jahre 1802 führte der englische Augenarzt und Physiker **Thomas Young** (1773 – 1829) als erster Interferenzversuche mit Licht an einem Doppelspalt durch. Dies war ein starker Hinweis für das Wellenmodell des Lichtes.

Das Doppelspaltexperiment

Ein Laserstrahl wird durch einen Doppelspalt geschickt. Auf einem Schirm oder der Wand hinter dem Doppelspalt wird das Lichtmuster beobachtet. Es entsteht ein Muster aus mehreren hellen Streifen mit dunkeln Stellen dazwischen, an die offenbar kein Licht hinkommt.

Interferenz

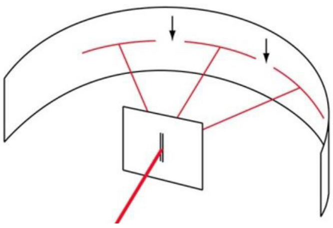
Treffen zwei Wellen gleicher Wellenlänge aufeinander, sind zwei Spezialfälle zu unterscheiden:



Aufgabe 1:
Beschreibe die Unterschiede der beiden Situationen und skizziere jeweils das Ergebnis der Überlagerung.

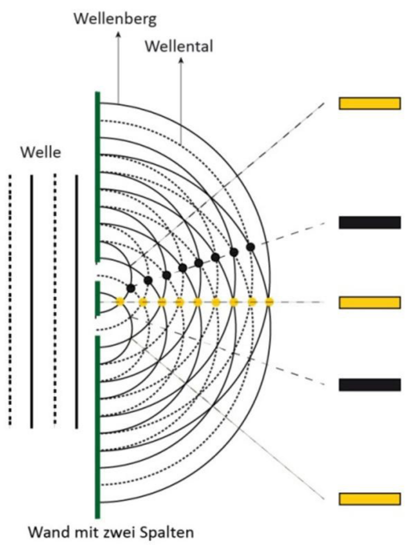
Ursache des Effekts

Die Abbildung unten zeigt, wie sich von links eine Wellenfront einem Doppelspalt nähert. Gemäss dem Huygens'schen Prinzip wird in jedem Spalt eine Elementarwelle aus der Wellenfront herausgefiltert. Die beiden Elementarwellen überlagern sich und bilden das Interferenzmuster aus den hellen und dunklen Streifen.



Erklärung des Interferenzmusters

Die Abbildung unten zeigt die Überlagerung zweier Halbkreiswellen hinter einem Doppelspalt:

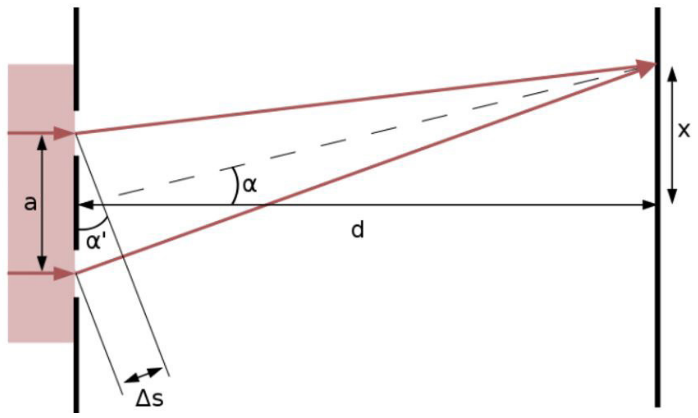


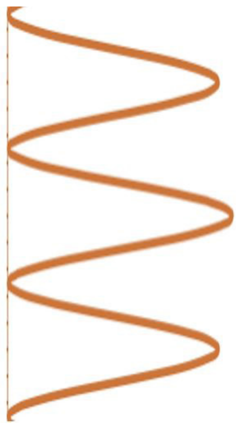
Frage 1:
Um wieviele Anteile einer Wellenlänge sind die beiden Kreiswellen längs der fünf eingezeichneten Richtungen jeweils gegeneinander verschoben?

Aufgabe 2:
Zeichne in der Abbildung links jeweils Schnittbilder der beiden Kreiswellen entlang der gestrichelten Linien rechts neben den gelben und schwarzen Kästchen ein. Worin unterscheiden sich die Richtungen, die zu den gelben Kästchen führen von jenen, die zu den schwarzen gehen? Gib eine allgemeine Bedingung für das Ergebnis schwarz bzw. gelb an.

Berechnung der Interferenzmaxima

Die Abbildung unten erklärt das Zustandekommen der Interferenz in einem Punkt auf einem Schirm hinter dem Doppelspalt. Grund für das Interferenzmuster sind die unterschiedlich langen Wegstrecken der beiden Lichtstrahlen bis zum Treffpunkt auf dem Schirm. Konstruktive Interferenz tritt dann ein, wenn der Wegunterschied ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist. Destruktive Interferenz hat man bei nicht geraden Vielfachen der halben Wellenlänge.





Frage 2:
In welchen Richtungen (unter welchen Winkeln α) bzw. an welchen Stellen *x* treten Interferenzmaxima und an welchen Stellen Interferenzminima auf? Gib dazu jeweils eine allgemeine Formel an.

Rechenbeispiel

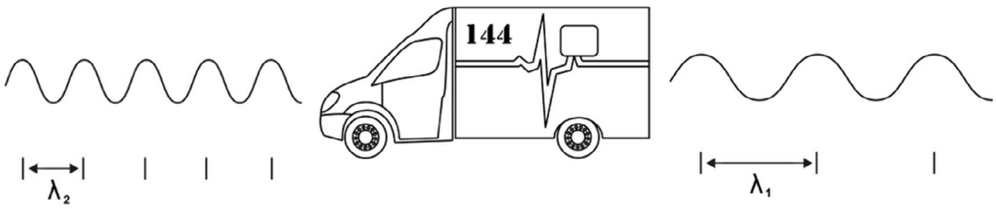
Mit solchen Interferenzversuchen gelingt es, die Wellenlänge des Lichtes zu bestimmen.

Aufgabe 3:
Welche Wellenlänge hat das Laserlicht, wenn man im Abstand $d = 2$ m vom Doppelspalt an der Wand die Distanz der beiden ersten Nebenmaxima zu $2x = 2.54$ cm misst und der Abstand der beiden Spalte mit $a = 0.1$ mm angegeben ist?

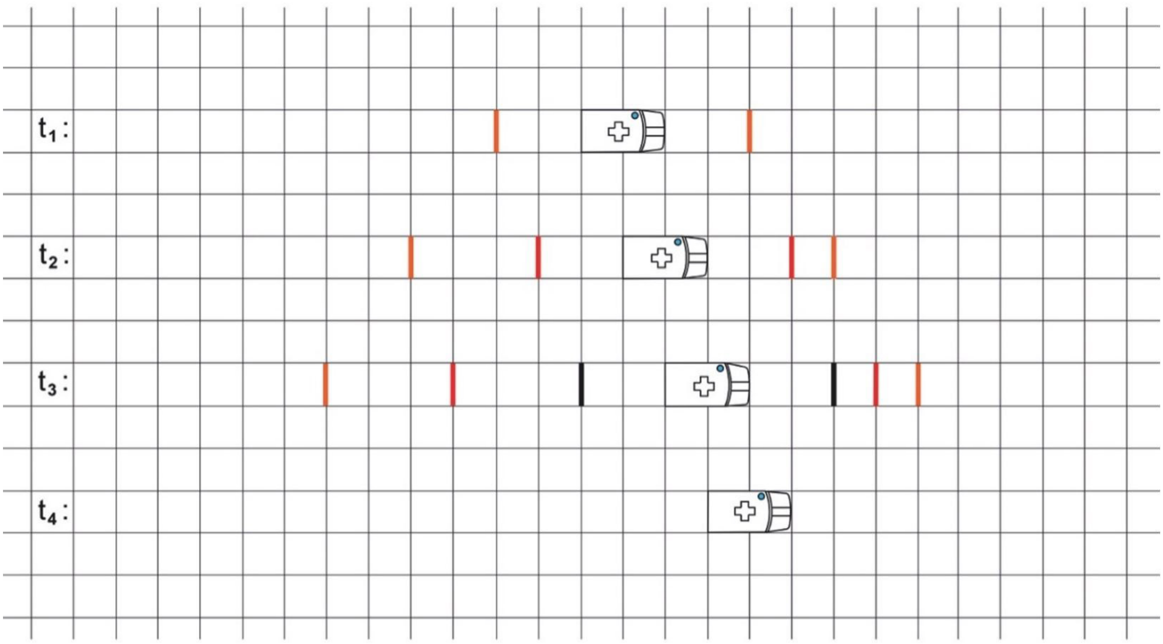
Frage 3:
Was ändert sich, wenn man anstelle von Laserlicht weisses Licht verwendet?

Doppler-Effekt

Ein weiterer wichtiger Wellen-Effekt, der viele Anwendungen findet, wurde 1842 zuerst von **Christian Doppler** (1803-1853) beschrieben. Bewegt sich z.B. ein Krankenwagen auf uns zu, hören wir den Sirenenton höher, als wenn er sich von uns wegbewegt. Die Bewegung einer Wellenquelle hat somit Einfluss auf die abgestrahlten Wellenlängen. Die Schallwellen werden vor dem Krankenwagen zusammengedrückt und hinter dem Krankenwagen gedehnt. In unserem Beispiel ist $\lambda_1 > \lambda_2$.



Wie es dazu kommt, verdeutlicht die unten stehende Abbildung: Das Krankenauto schaltet seine Sirene ein und fährt zum Zeitpunkt t_1 los. Die Schallwellen der Sirene sind dann bereits bis zu den orange markierten Stellen gekommen. Zum Zeitpunkt t_2 folgen die beiden nächsten Wellenberge (rot). Die orangen Wellenberge sind in dieser Zeit jeweils zwei Häuschen weitergewandert. Weil das Krankenauto in der Zwischenzeit auch weitergefahren ist, liegt der orange Wellenberg links weiter vom Krankenauto entfernt als der orange Wellenberg rechts. Beim nächsten Zeitpunkt t_3 folgen die dritten Wellenberge (schwarz).



Aufgabe 1:
Zeichne für den nächsten Zeitpunkt t_4 ein, wo die Wellenberge jetzt liegen.

Das Krankenauto jagt sozusagen den Wellenbergen auf der rechten Seite nach, während es die Wellenberge auf der linken Seite hinter sich lässt. Das hat Folgen: Die Wellenberge auf der rechten Seite liegen nicht mehr im selben Abstand, wie die Wellenberge auf der linken Seite.

Ist das Krankenauto in Ruhe, hat die Schallwelle in unserem Bild eine Wellenlänge von 2 *Häuschen*. Wir setzen deshalb: $\lambda_{Quelle} = 2$.

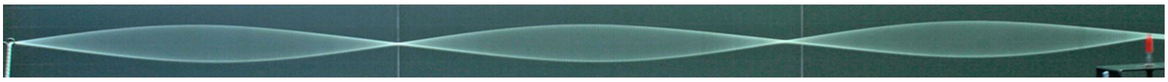
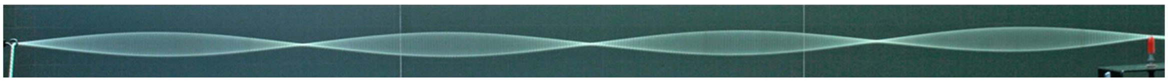
Das fahrende Krankenauto hat eine Geschwindigkeit v von 1 *Kästchen pro Zeitschritt*. Es legt also in einem Zeitschritt Δt den Weg $s = v \cdot \Delta t = 1$ zurück.

Aufgabe 2:
Welche Wellenlängen misst ein aussenstehender Beobachter? Kannst du mit Hilfe des Beispiels oben eine Formel aufstellen, wie man die Wellenlängen λ_1 und λ_2 für die rechte und linke Schallwelle berechnen kann?

Aufgabe 3:
Wenn die Wellenlängen λ_1 und λ_2 bekannt sind, kannst du auch die Frequenzen f_1 und f_2 berechnen. Führe diese Rechnung formal durch. Das Ergebnis ist eine **Formel**, mit der man allgemein die Frequenz f_B des Beobachters in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v_Q der Quelle, der Frequenz f_Q der Quelle und der Schallgeschwindigkeit c berechnen kann.

Stehende Wellen

Bisher haben wir Wellen betrachtet, die sich in unbegrenzten Medien (z.B. Wasseroberfläche, Luft) ausbreiten. Dabei entsteht das typische Bild einer fortlaufenden Welle. Häufig entstehen Wellen aber in **begrenzten Medien**, wie z.B. in einer Saite eines Musikinstruments. Die Wellen werden dann an den Enden hin und her reflektiert. Welches Schwingungsverhalten sich daraus ergibt, betrachten wir anhand eines Gummiseils, welches zwischen zwei Stativstangen festgemacht ist. Die Länge des gespannten Gummiseils beträgt etwa 3 m. Das Gummiseil wird durch einen Lautsprecher zum Schwingen angeregt. Seine Schwingungen werden auf der rechten Seite über einen Stab, der an der Membran des Lautsprechers angebracht ist, auf das Gummiseil übertragen. Die Frequenz f des Lautsprechers wird mit einem Frequenzgenerator eingestellt. Bei ***Null*** beginnend, wird die Frequenz kontinuierlich erhöht. Dabei gerät das Gummiseil bei bestimmten Frequenzen in heftige Schwingungen.

1	f_0 = 5 Hz 
2	f_1 = 10 Hz 
3	f_2 = 15 Hz 
4	f_3 = 20 Hz 

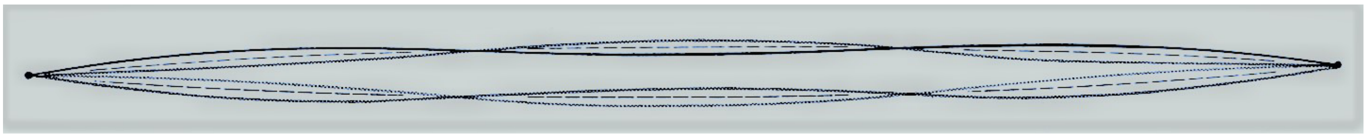
Die Schwingung mit der tiefsten Frequenz f_0 heisst **Grundschwingung**. Die nächsthöheren Schwingungen heissen **Oberschwingungen** f_1, f_2, f_3, etc.

Aufgabe 1:
Welche Regelmässigkeit ist hier zu erkennen?

Aufgabe 2:
Wie gross sind jeweils die Wellenlängen λ_0 der Grundschwingung und λ_n der n-ten Oberschwingung. Gib eine allgemeine Formel an.

Schwingung einer Saite

Die Saite eines Musikinstruments kann sogar mit mehreren Frequenzen gleichzeitig schwingen. Ein möglicher Schwingungszustand zeigt die folgende Abbildung:



Frage:
Welche der oben abgebildeten Schwingungen überlagern sich hier und wie äussert sich das im Klangempfinden?

Sicher ist dir schon aufgefallen, dass eine Saite bei gleicher Tonhöhe unterschiedlich klingen kann. Das liegt daran, dass sie mit mehreren Frequenzen gleichzeitig schwingt aber die Zusammensetzung der Oberschwingungen unterschiedlich ist. Die Tonhöhe wird durch die tiefste Frequenz f_0 der Grundschwingung festgelegt, das Klangbild hingegen durch die Zusammensetzung f_n der Obertöne.

Um einen Klang zu analysieren, waren früher komplizierte und teure Geräte erforderlich, sog. **Frequenzanalysatoren** (frequency analyzer). Heute gibt es **Apps** fürs Handy oder das Tablet.

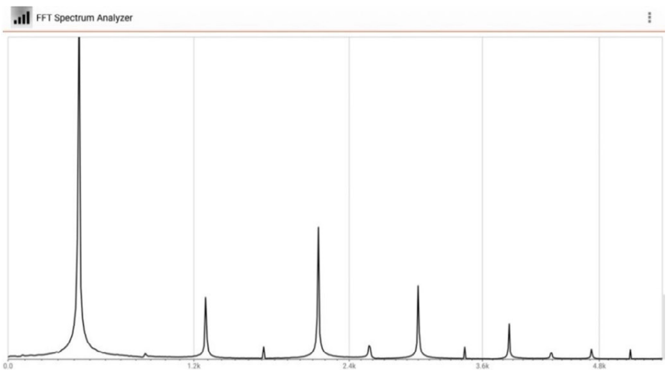
Für Handys oder Tablets mit dem Betriebssystem **Android** gibt es von **XYZ-Apps** drei für unsere Zwecke sehr gut geeignete Apps kostenlos.

Oscilloscope: Das Oszilloskop nimmt das Signal der Mikrofone deines Handys auf und stellt den zeitlichen Verlauf des Signals dar.

Signal-Generator: Mit dem Signalgenerator kannst du selbst Klänge synthetisieren.

FFT Spectrum Analyzer: Der Frequenzanalysator nimmt das Signal der Mikrofone deines Handys auf, führt eine Frequenzanalyse durch und stellt das Klangspektrum grafisch dar.

Beispiel eines Klangspektrums (angezupft wurde hier die Saite eines Monochords):

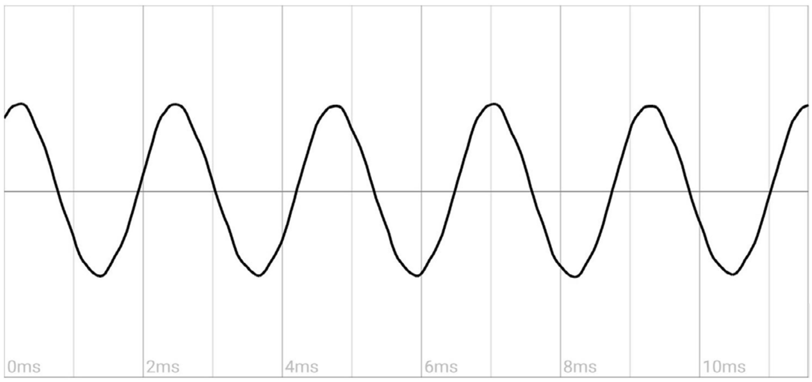


Aufgabe 3:
Was stellt dieses Diagramm dar? In welcher Beziehung könnte dieses Diagramm zu den Beobachtungen an der schwingenden Saite in den vorangegangenen Aufgaben stehen?

Schwingung einer Stimmgabel

Im ersten Versuch mit unserer App wollen wir die Schwingung einer Stimmgabel untersuchen.

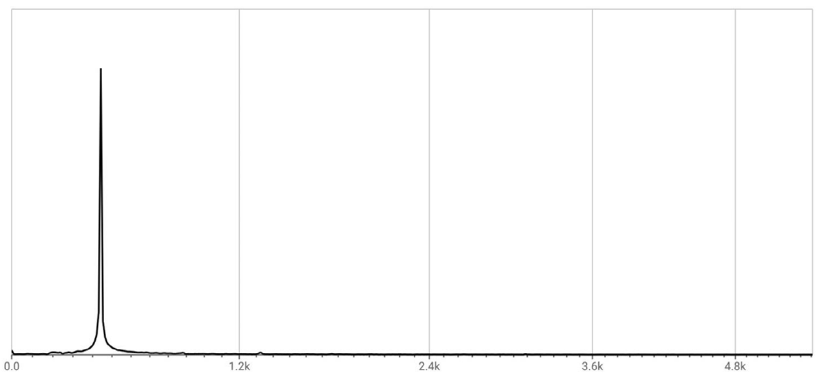
Versuch 1:
Nimm mit der App *Oscilloscope* die Schwingung einer Stimmgabel auf. Das Ergebnis wird etwa wie im folgenden Bild aussehen:



Das Diagramm zeigt den zeitlichen Verlauf der Schwingung einer Stimmgabel (Sinuston).

Aufgabe 4:
Lies die Schwingungsdauer möglichst genau ab und berechne die Frequenz der Stimmgabel.

Versuch 2:
Nimm nun mit der App *FFT Spectrum Analyzer* nochmals denselben Ton auf. Das Ergebnis wird nun etwa wie im nächsten Bild aussehen:



Aufgabe 5:
Lies die Frequenz des Tons möglichst genau ab und vergleiche mit dem Ergebnis von Aufgabe 4.

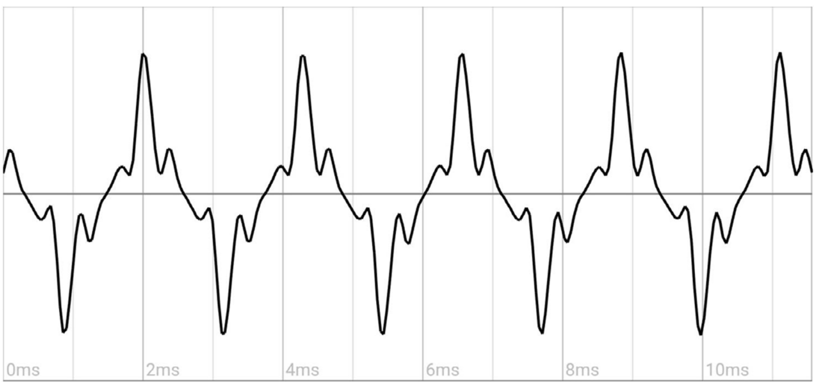
Schwingung eines Monochords

Ein Monochord ist ein Instrument, das nur eine Saite und einen Resonanzkörper besitzt.

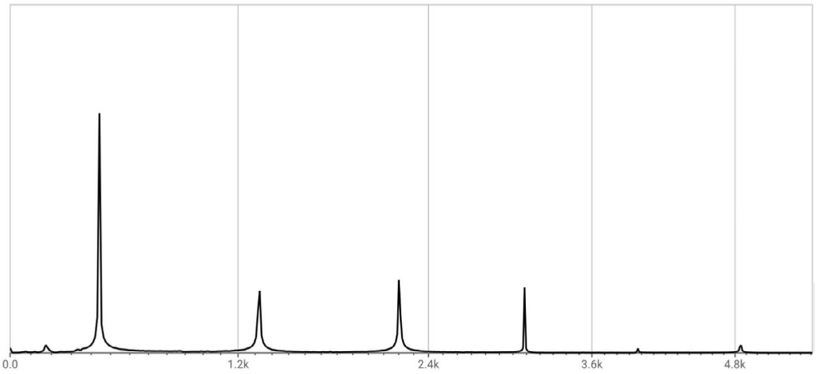
Versuch 3:
Nimm die Schwingungen eines Monochords (oder einer Saite einer Gitarre) jeweils mit der App *Oscilloscope* und mit App *FFT Spectrum Analyzer* auf. Zupfe dabei die Saite einmal in der Mitte und einmal am Rand an. Das Instrument klingt dabei unterschiedlich.

Beispiel:
Abschliessend noch ein Beispiel zu Versuch 3, falls du den Versuch nicht selbst durchführen kannst.

Die folgende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der Schwingung einer in der Mitte gezupften Saite, aufgenommen mit der App *Oscilloscope*:



Die nächste Abbildung zeigt das Spektrum desselben Klangs, aufgenommen mit der App *FFT Spectrum Analyzer*:

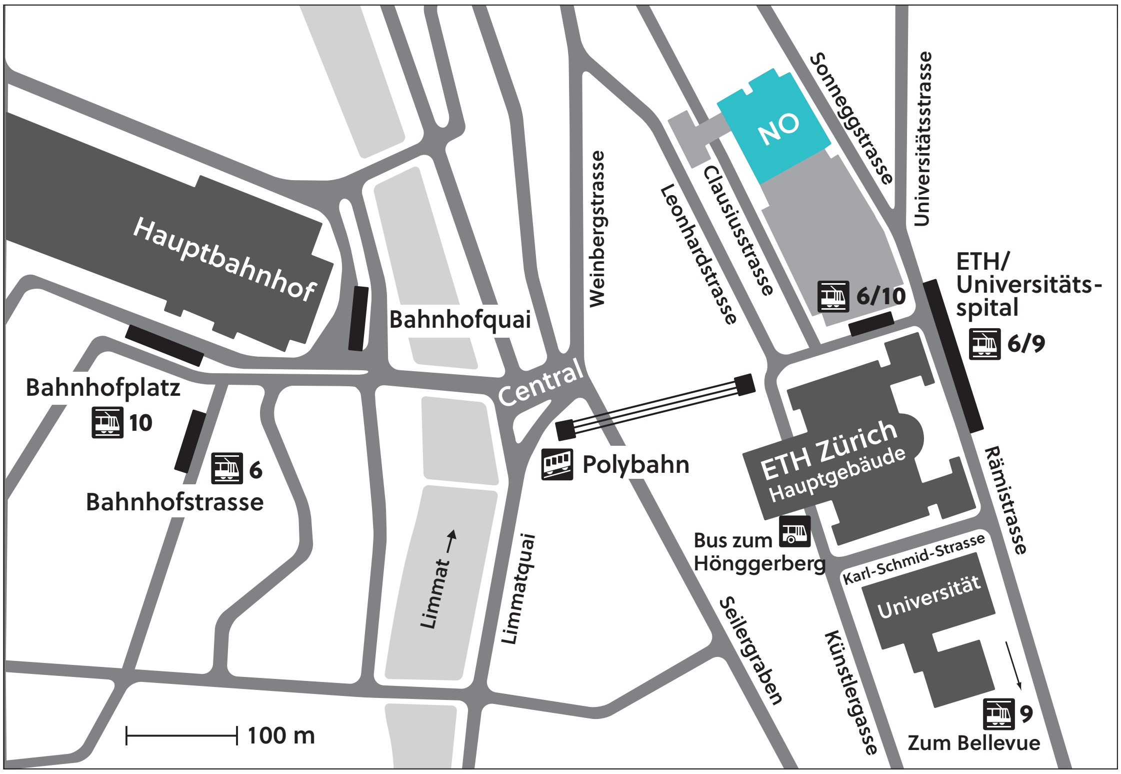


Aufgabe 6:
Welche Frequenzen sind in diesem Diagramm erkennbar (Skala nicht linear)? Findest du diese Schwingungen auch im *Oscilloscope*-Diagramm?

Herausgeberin:
*focus*Terra – ETH Zürich
in Zusammenarbeit mit dem MINT-Lernzentrum der ETH Zürich

Autorenteam:
Kerstin Fankhauser
Dr. Herbert Rubin
Dr. Ralph Schumacher

Illustrationen:
Oculus Illustration GmbH, MINT-Lernzentrum der ETH Zürich



***focus*Terra**
ETH Zürich, Gebäude NO
Sonneggstrasse 5, 8092 Zürich
Telefon +41 44 632 62 81
info_focusterra@erdw.ethz.ch

Öffnungszeiten
Montag bis Freitag: 9 – 17 Uhr
Sonntag: 10 – 16 Uhr
Feiertage und sonstige Schliessungen:
Informationen siehe Webseite

Eintritt frei

Finden Sie uns online!
www.focusterra.ethz.ch

Öffentliche Führungen am Sonntag
Aktuelles Programm siehe Webseite

Führungen und Spezialveranstaltungen
Informationen und Buchung online

Interessieren Sie sich für ein Studium der Erdwissenschaften?
Mehr Informationen unter:
www.erdw.ethz.ch

D ERDW
EARTH SCIENCES