

4. Wellen breiten sich aus

Unterscheidung von Wellen

57 Wellen und Schwingungen gehören zusammen, denn wie Sie noch in diesem Kapitel erfahren werden, entstehen Wellen durch das Zusammenspiel vieler schwingender Körper. Es gibt eine grosse Zahl alltäglicher Erscheinungen, welche reine Wellenphänomene sind (auch wenn wir die Wellen nicht immer direkt wahrnehmen können).

58 Sie werden an einige Beispiele von Wellenphänomenen erinnert, die Ihnen sicher bekannt sind. Protokollieren Sie.

- a) Störung entlang eines **Seiles**.
- b) Ein Stein fällt ins **Wasser**.
- c) **Eisenbahn** beim Ankoppeln eines Wagens.
- d) **Schallwellen** in der Luft.

59 Überlegen Sie, nach welchen Kriterien diese Wellenerscheinungen **geordnet** werden können. Inwiefern unterscheiden sich die Phänomene? Haben sie auch Gemeinsamkeiten?


Kriterium	Seilwellen	Wasserwellen	Eisenbahnwellen	Schallwellen

60 Wellen können als "**Transportphänomene**" angesehen werden. Durch die Ausbreitung von "Störungen" oder "Signalen" kann **Energie** oder **Information** transportiert werden. Hingegen findet **kein Materietransport** statt. Damit Wellen überhaupt entstehen können, müssen gewisse Voraussetzungen erfüllt sein:


- a) Es muss ein **Wellenträger**, ein **Wellenmedium** gegeben sein. Bei **mechanischen Wellen** ist dies ein materieller (fester, flüssiger oder gasförmiger) Wellenträger.
- b) Die **Masseteilchen** (Moleküle, Atome) des Wellenträgers müssen aus der Gleichgewichtslage ausgelenkt werden können, also beweglich sein.
- c) Die Masseteilchen müssen untereinander "wechselwirken", d.h. Kräfte aufeinander ausüben.
- d) Ein Wellenerreger muss für eine "Störung" sorgen.

Ziele dieses Kapitels

1. Sie können die verschiedenen mechanischen Wellen nach mehreren Kriterien unterscheiden.
2. Sie können die Wellenformel in verschiedenen Situationen anwenden, speziell in Bezug auf Schallwellen und den Dopplereffekt.
3. Berechnungen zu Dopplereffekt sind Ihnen vertraut.


61  Die **Wellenmaschine** ist ein Modell eines Wellenmediums, welches diese Voraussetzungen erfüllt. Das Modell ist eine **lineare Kette gekoppelter Oszillatoren**.

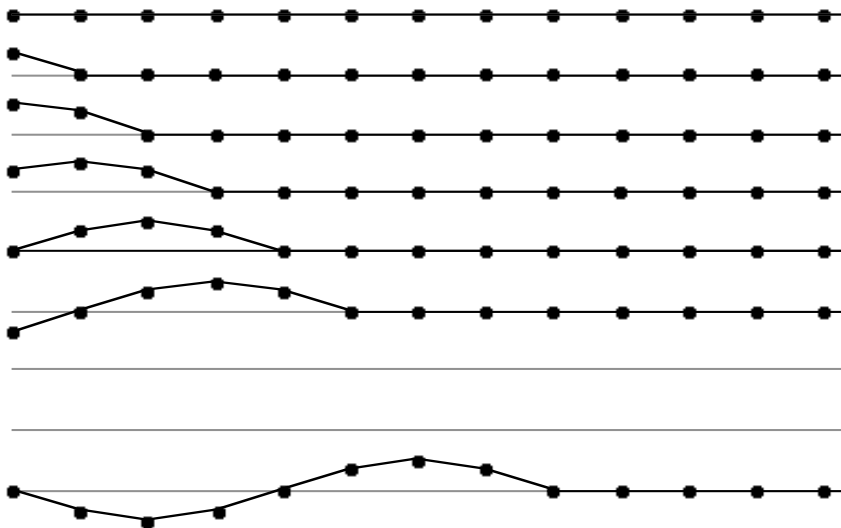
Beobachtungen an der Wellenmaschine zeigen, wovon die **Wellengeschwindigkeit c** , resp. die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Störung abhängt.

62  Später werden Sie lernen, warum die Tonhöhe einer Saite von der Wellengeschwindigkeit c abhängt. Nehmen Sie diese Information jetzt einfach als gegeben hin und leiten Sie daraus und mit Hilfe obiger Beobachtung an der Wellenmaschine ab, wie die **Tonhöhe einer Saite** verändert werden kann.


Die Wellengeschwindigkeit c ist abhängig von:

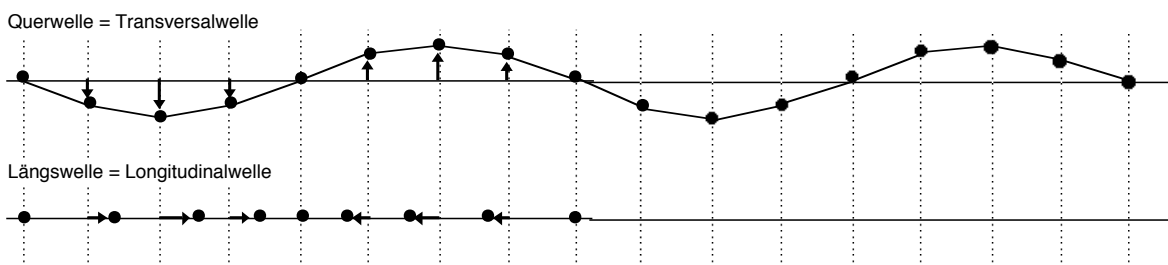
Transversalwellen (Querwellen)

63  Anhand folgender Darstellung überlegen wir nun im Detail, wie eine **Querwelle** entsteht.



Longitudinalwellen (Längswellen)

64  Eine **Längswelle** entsteht in analoger Weise wie die Querwelle, nur sind die Auslenkungen der Oszillatoren nicht quer, sondern parallel zur Ausbreitungsrichtung. Gegenüber der vorherigen Konstruktion müssen also nur die Auslenkungsrichtungen "umgeklappt" werden. Bei Querwellen beschreibt man die Wellen durch **Wellentäler** und **Wellenberge**, wie ist das nun bei Längswellen?

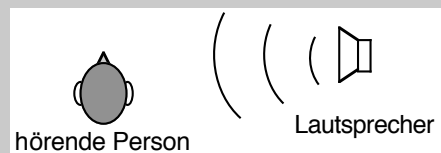
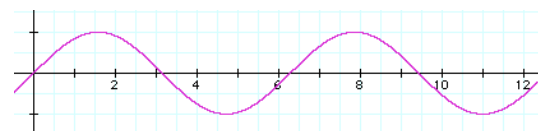
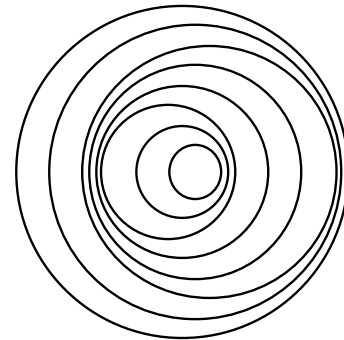


Wellengeschwindigkeit (Ausbreitungsgeschwindigkeit)

- 65 i** Weil Wellenbewegungen sich also auf Schwingungen einzelner Oszillatoren zurückführen lassen, werden auch die Begriffe von den Schwingungen übernommen. Neue Begriffe sind **Wellenlänge** und **Wellengeschwindigkeit**.
- 66 ?** Aus obigen Wellen-Konstruktionen können wir den Zusammenhang zwischen Wellengeschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge ablesen: Die **Wellenformel**.
- 67 R** Wie ändert sich die Wellenlänge, wenn bei sonst gleichen Bedingungen
- die Frequenz verdoppelt wird?
 - die Fortpflanzungsgeschwindigkeit verdoppelt wird?
- 68 R** Eine **Ozeanwelle** besitzt eine Wellenlänge von 300 m und eine Schwingungsdauer von 15 s. Wie gross ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit?
- 69 R** Rechts sind die Wellen, die ein "tanzender" **Wasserfloh** auf der Wasseroberfläche erzeugt, gezeichnet. Aus dem Wellenmuster können Sie die Abfolge der „Tanzschritte“ des Flohs erkennen.
- 70 R** Die Wellengleichung gilt auch für nichtmaterielle Wellen. Welche Fortpflanzungsgeschwindigkeit ergibt sich für elektromagnetische Wellen aus den Angaben eines **Kurzwellen-Radiosenders**: Wellenlänge 48.58 m, Frequenz 6175 kHz? Vergleichen Sie mit der Tabelle der wichtigen Konstanten. Was entdecken Sie?
- 71 R** Der **Ton a'** hat die Frequenz 440 Hz. Wie gross ist die Wellenlänge der zugehörigen Schallwelle in Luft?
- 72 R** Wie muss das Diagramm rechts interpretiert werden, wenn es eine **Longitudinalwelle** darstellen soll?
- 73 R Richtungshören:** Wenn wir einen Ton wahrnehmen, so können wir in der Regel auch feststellen, aus welcher Richtung der Ton kommt. Die Voraussetzung dafür ist allerdings, dass wir mit beiden Ohren gleich gut hören können. Der Grund für unsere Fähigkeit ist kurz beschrieben für den Fall, dass ein Ton von rechts ertönt (die Zeichnung stellt die Situation von oben gesehen dar).
- Wie gross ist dieser **Zeitunterschied** etwa in der dargestellten Situation? (Überlegen Sie selber, welche Grössen Sie zur Berechnung benötigen und schreiben Sie die verwendeten Werte auf.)
 - Manchmal bereitet das Richtungshören **Schwierigkeiten**, nämlich dann, wenn bei beiden Ohren gleichzeitig Verdichtungen ankommen, die aber bei der Schallquelle *nicht zur gleichen Zeit* erzeugt wurden. Bei welchen Frequenzen ist das ungefähr der Fall?

- A Amplitude** der Welle = Amplitude eines Oszillators
- f Frequenz** der Welle = Frequenz eines Oszillators = Frequenz des Erregers
- T Periode** der Welle = Periode eines Oszillators
- λ Wellenlänge**
- c Wellengeschwindigkeit** = Ausbreitungsgeschwindigkeit

Wellenformel



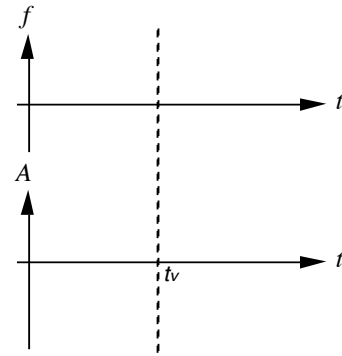
Von der Tonquelle her kommend gelangen Verdichtungen und Verdünnungen an die Ohren.

Allerdings gelangt eine bestimmte Verdichtung immer zuerst zum rechten Ohr und erst etwas später zum linken Ohr. (Die Erfahrung zeigt, dass die Schallwellen auch um den Kopf herum in das Ohr auf der "Schattenseite" gelangen können.)

Das Gehirn der hörenden Person registriert den **Zeitunterschied**, mit welchem eine Verdichtung bei den Ohren ankommt und "berechnet" daraus die Herkunftsrichtung der Schallwelle.

Schallwellen und Dopplereffekt

74 ? Sie stehen am Strassenrand. Ein Auto fährt hupend oder mit Sirene an Ihnen vorbei. Stellen Sie die Wahrnehmungen qualitativ in einem $f-t$ - und in einem $A-t$ -**Diagramm** dar. (t_v ist der Zeitpunkt der Vorbeifahrt.)



75 **Dopplereffekt bei bewegter Quelle und ruhendem Beobachter:** Die von Ihnen bei der vorherigen Aufgabe beschriebene Wahrnehmung werden Sie verstehen, wenn es Ihnen gelingt, die im Kasten aufgeführte Formel zu beweisen, resp. den gemeinsam konstruierten Beweis zu verstehen.

- a) Wir beweisen diese Formel für den Fall, dass die Schallquelle Q sich zum ruhenden Beobachter B hin bewegt. Beachten Sie, dass der Beobachter die Welle nach wie vor mit der Schallgeschwindigkeit c auf sich zukommen "sieht", dass er aber gegenüber der Schallwelle einer ruhenden Quelle eine veränderte Wellenlänge wahrnimmt.
- b) Wie lautet die Formel, wenn sich die Quelle vom Beobachter *entfernt*?
- c) Machen Sie Aussagen über die Definitionsbereiche der beiden Formeln.

76 ? **Signalpfeife:** Der (offenbar musikalische) Stationsvorsteher hört die Signalpfeife eines fahrenden Zuges einen Ganzton tiefer als beim stehenden Zug. Mit welcher Geschwindigkeit entfernt sich der Zug von der Station?

77 Im Unterricht wird gezeigt, wie man anhand der Tonhöhen-Änderung eines hupenden vorbeifahrenden Autos seine **Geschwindigkeit** berechnen kann. Zuerst allerdings werden Sie aufgefordert die Geschwindigkeit zu schätzen. Können Sie das gut?

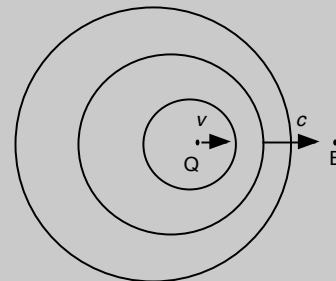
78 Die Überlegungen zu **72** veranlassen Bemerkungen und Computer-Demonstrationen zu **Bugwelle** und **Überschallknall**. Machen Sie Notizen zu den wichtigen Teilen.

79 ? **Dopplereffekt bei ruhender Quelle und bewegtem Beobachter:** Wenn sich ein Beobachter relativ zu einer gegenüber der Luft ruhenden Schallquelle bewegt, so nimmt er eine leicht veränderte Tonhöhe wahr. Bewegt sich der Beobachter auf die Schallquelle *zu*, so wird der Ton etwas *höher* wahrgenommen.

- a) Beweisen Sie diese Formel! Beachten Sie, dass ein ruhender und ein bewegter Beobachter dieselben Wellenlängen aber verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeiten wahrnehmen.
- b) Wie lautet die Formel, wenn sich der Beobachter von der Schallquelle entfernt?

Wenn eine Schallquelle sich auf einen ruhenden Beobachter zubewegt, so gilt:

$$f_B = f_Q \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}$$



f_Q **Frequenz der Schallquelle** = bei ruhender Quelle vom ruhenden Beobachter wahrgenommene Frequenz

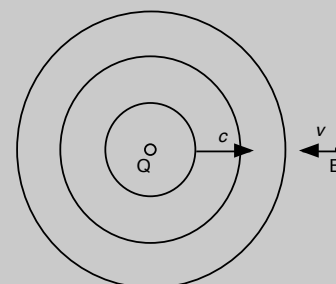
f_B die vom ruhenden Beobachter **wahrgenommene Frequenz** der bewegten Quelle

v **Geschwindigkeit der bewegten Quelle** (gegenüber ruhendem Beobachter, resp. ruhender Luft)

c **Schallgeschwindigkeit** in Luft

Wenn ein Beobachter sich auf eine ruhende Schallquelle zu bewegt, so gilt:

$$f_B = f_Q \cdot (1 + \frac{v}{c})$$



80 ? Kombiniertes Dopplereffekt: Eine Schallquelle mit konstanter Tonhöhe und ein Beobachter bewegen sich einander auf einer Geraden entgegen, und zwar mit den Geschwindigkeiten v_Q und v_B relativ zur Luft.

- Wie berechnet sich in diesem Fall die vom Beobachter wahrgenommene Frequenz?
- Was ändert sich, wenn der Beobachter oder die Quelle oder beide die Bewegungsrichtung entlang der Geraden „umdrehen“.


81 R Signalpfeife: Die Signalpfeife eines Zuges habe die Tonhöhe a'' (d.h. $f_a = 1760$ Hz). Der (offenbar wieder musikalische) Stationsvorsteher hört sie aber einen Ganzton höher (Tonhöhe h''), nämlich mit der Frequenz $f_h = 1976$ Hz. Mit welcher Geschwindigkeit fährt der Zug auf die Station zu?

82 R Zwei Velofahrer bewegen sich mit gleicher Geschwindigkeit aufeinander zu. Der eine klingelt, um den andern auf sich aufmerksam zu machen. ...

Weil einer der beiden Velofahrer gerade den Physikunterricht in einem bekannten Berner Gymnasium besucht, stellt er sich nach der Begegnung die folgende Frage: "Ich nehme an, die Veloglocke erzeuge einen Ton mit der Frequenz 700 Hz und wir Velofahrer haben eine Geschwindigkeit von 15 km/h. Welche Frequenz habe ich eben wahrgenommen?"

83 R Eine Versuchsperson marschiert mit einer **Stimmgabel** in der Hand gegen eine schallreflektierende Wand. Diese Person hört den Stimmgabelton zweifach, einmal direkt von der Quelle und einmal als an der Wand reflektierter Ton. Wir machen folgende Annahmen: Die Stimmgabel-Frequenz betrage 440 Hz und die Versuchsperson marschiere mit der Geschwindigkeit 1.5 m/s. Mit welcher Frequenz nimmt die Versuchsperson den **reflektierten Ton** wahr?

84 R Vielleicht wurde im Unterricht der Film über **Christian Doppler** gezeigt. In diesem Film wurde gemogelt? Wie schnell müsste tatsächlich ein Horn-Bläser, der einen Ton mit konstanter Tonhöhe bläst, auf einem offenen Bahnwagen an einem neben dem Bahngleise stehenden Beobachter vorbeifahren, damit dieser zwischen Annäherung und Entfernung des Zuges eine Tonhöhe-Veränderung um eine **gross Terz** (= Frequenzverhältnis 5 : 4) wahrnehmen würde?

85  Halten Sie unter dieser Nummer die Ergänzungen fest, die wir im Unterricht zu diesem Kapitel (vielleicht) gemacht haben.

Die allgemeine Formel für den Dopplereffekt lautet:

- Keine Ergänzungen
- Es gibt Ergänzungen, nämlich: