

E Schwingungen und Wellen

1 Schwingungen (Zusammenfassung)

1.1 Mechanische Schwingung

Eine mechanische Schwingung ist eine zeitlich periodische Bewegung eines Körpers um seine Gleichgewichtslage (Abb.1).

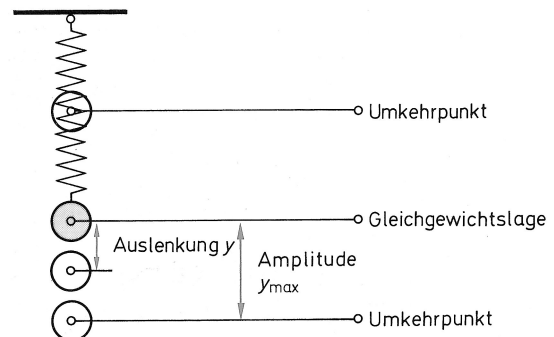


Abb.1: Mechanische Schwingung

Voraussetzungen für das Entstehen einer mechanischen Schwingung sind eine zur Gleichgewichtslage gerichtete rücktreibende Kraft und die Trägheit des schwingenden Körpers.

1.2 Harmonische Schwingung

Bei einer **harmonischen Schwingung** ist die rücktreibende Kraft proportional der Auslenkung aus der Gleichgewichtslage (Abb.2).

$$F = D \cdot y$$

F: Kraft in N

D: Direktionsgröße in N/mm

y: Auslenkung in mm

Die Direktionsgröße D oder Federkonstante c kennzeichnet die Härte einer Feder.

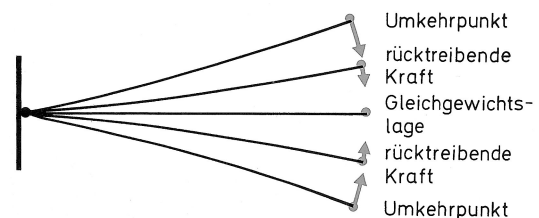


Abb.2: Harmonische Schwingung

Weg-Zeit-Gesetz einer harmonischen Schwingung.

$$y = y_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

y: Elongation (Auslenkung) in m

y₀: Amplitude in m

ω: Winkelgeschwindigkeit in rad/s

t: Zeit in s

φ₀: Phasenwinkel bei t = 0 in rad

Hinweis zum Kapitel „Schwingungen und Wellen“:

Auszüge aus Physik
Volk und Wissen
ISBN 3-06-021172-8
Höfling:
Physik Band II Teil 1
Dümmler 4114
ISBN 3-427-41145-1

Das Weg-Zeit-Diagramm einer harmonischen Schwingung (Abb.3) ergibt eine Sinuskurve.

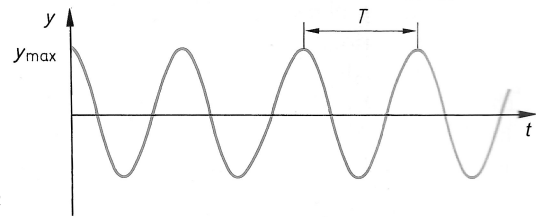


Abb.3: Weg-Zeit-Diagramm

Für die Periodendauer gilt:

Schwingungsgleichung eines Federpendels (Federschwingers)

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

T: Periodendauer in s
m: Masse in kg
D: Direktionsgröße in N/m

Schwingungsgleichung eines Fadenpendels

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

T: Periodendauer in s
l: Fadenlänge in m
g: Erdbeschleunigung in m/s²

1.3 Gedämpfte Schwingung

Wird beim Schwingen die mechanische Energie allmählich in eine andere Energieform umgewandelt, so ist die Schwingung gedämpft (Abb.4).

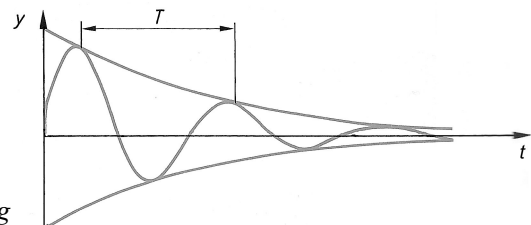
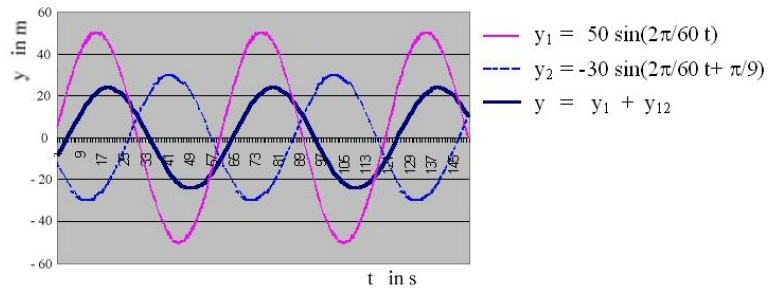


Abb.4: Gedämpfte Schwingung

1.4 Überlagerung harmonischer Schwingungen

Bei der Überlagerung frequenzgleicher harmonischer Schwingungen beliebiger Amplitude und Phase entsteht immer wieder eine harmonische Schwingung der gleichen Frequenz (Abb.5).

Abb.5: Überlagerung harmonischer Schwingungen gleicher Frequenz



1.5 Resonanz

Bei periodischer Erregung führt jeder Schwinger Schwingungen mit der Erregerfrequenz aus (erzwungene Schwingungen).

Wenn **Eigenfrequenz** des Schwingers und Erregerfrequenz übereinstimmen, dann treten die größten Amplituden auf. Erreger und Schwinger befinden sich dann in Resonanz (Abb.6).

Die Resonanz ist umso schlanker und höher, je geringer die Dämpfung des Schwingers ist.

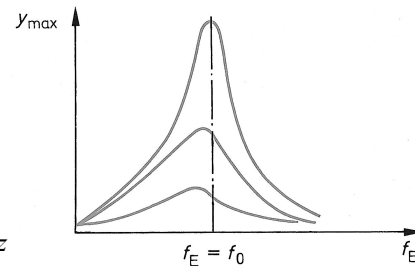


Abb.6: Resonanz

2 Mechanische Wellen

2.1 Entstehung

Wenn ein Stein ins Wasser fällt, wird die Wasseroberfläche zum Schwingen angeregt. Auch die Umgebung der Auftreffstelle gerät in Schwingungen. Der Prozeß setzt sich in Form einer kreisförmigen Welle fort (Abb.7).

Zwischen den Wasserteilchen wirken Kräfte. Durch diese beeinflusst jedes schwingende Teilchen die benachbarten Teilchen.



Abb.7: Schwingungen/Welle im Wasser

Schwingungsfähiges System

Verbindet man zwei gleichartige Federschwinger mit einem Gummifaden (Abb.8) entsteht ein einfaches **gekoppeltes Schwingungssystem**:

Wird der erste Schwinger ausgelenkt und losgelassen, klingt die Schwingung nach und nach ab. Gleichzeitig wird der zweite Schwinger zu immer stärkerem Mitschwingen erregt. Wenn die gesamte Energie auf den zweiten Schwinger übertragen ist und der erste Schwinger ruht, wiederholt sich der Vorgang indem der zweite Schwinger nun den ersten nach und nach in Bewegung versetzt.

Verwendet man mehrere Federschwinger nebeneinander, wird die Schwingung nach und nach auf den jeweils nächsten Schwinger übertragen. Diese Ausbreitung der Energie des ersten Schwingers bezeichnet man als Welle.

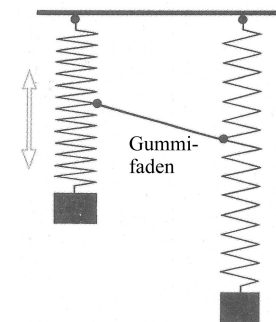


Abb.8: Schwingungsfähiges System

Eine **Welle** entsteht, wenn eine Reihe gekoppelter **schwingungsfähiger Systeme** nacheinander **gleichartige Schwingungen** ausführt.

Die kreisförmigen Wellen an der Wasseroberfläche breiten sich **zweidimensional** aus.

Bei dem gekoppelten Schwingungssystem mit Federschwingern entsteht eine **eindimensionale** Welle. Ebenso erhält man eine eindimensionale Welle wenn man eine lange Schraubenfeder an einem Ende schnell auf- und abbewegt (Abb.9).

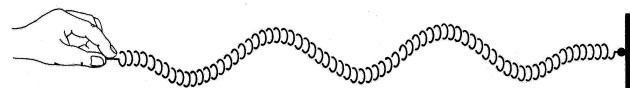


Abb.9: Eindimensionale Welle

Schallwellen (Abb.10) bereiten sich **dreidimensional** im Raum aus. Die Luftteilchen übertragen hier die Energie.

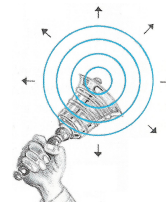


Abb.10: Dreidimensionale Welle

Eine **mechanische Welle** ist die Ausbreitung einer mechanischen Schwingung im Raum.

Eine **Welle** überträgt **Energie**, jedoch keinen Stoff.

2.2 Arten von Wellen

2.2.1 Transversalwellen = Querwellen

Bei einer **Transversal-** oder **Querwelle** bewegen sich die Teilchen quer zur Ausbreitungsrichtung der Welle.

Transversalwellen haben **Wellenberge** und **Wellentäler** (Abb.11), die periodisch aufeinander folgen. Sie bewegen sich in Ausbreitungsrichtung der Welle.

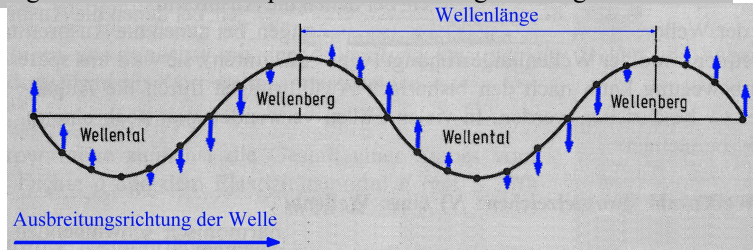


Abb.11: Transversalwelle

Beispiele:

Regentropfen in Wasserpfütze, Fahne die im Wind flattert.

2.2.2 Longitudinalwellen = Längswellen

Bei einer **Longitudinal-** oder **Längswelle** schwingen die Teilchen in Ausbreitungsrichtung der Welle.

Longitudinalwellen erkennt man beispielsweise auf einem Rangierbahnhof, wenn eine Lokomotive eine Reihe von stehenden Wagen anstößt (Abb.12). Die gesamte Wagenreihe bleibt in Ruhe, der Stoß pflanzt sich von Wagen zu Wagen fort.

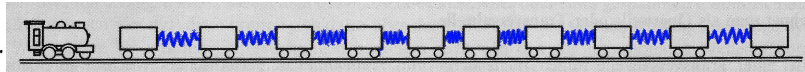


Abb.12: Erzeugung einer Longitudinalwelle

Longitudinalwellen haben **Verdichtungen** und **Verdünnungen**, (Abb.13), die periodisch aufeinander folgen. Sie bewegen sich in Ausbreitungsrichtung der Welle.

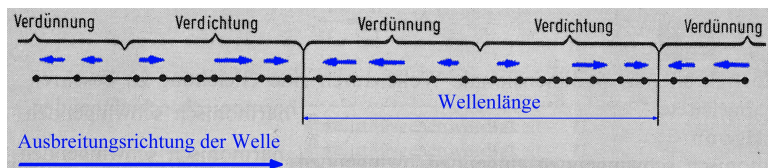


Abb.13: Longitudinalwelle

Beispiele:

Explosionen, Erdbeben

2.2.3 Oberflächenwellen

Dünungswellen auf dem Meer bestehen aus langgestreckten Wellentälern und schmalen, spitzen Wellenbergen (Abb.14).

Bei kleinen Wasserwellen, wird die rücktreibende Kraft in erster Linie durch die **Oberflächenspannung** bedingt. Die rücktreibende Kraft wirkt in Richtung der ungestörten und möglichst kleinen Oberfläche.

Bei größeren Wellen überwiegt der Einfluß der **Schwerkraft** des Wassers. Die Wasserteilchen führen dort keine einfache Auf- und Abbewegung, sondern eine Kreisbewegung (Abb.15) aus. Die Teilchen des Wellenberges bewegen sich dabei in Ausbreitungsrichtung, die Teilchen des Wellentales in entgegengesetzter Richtung.



Abb.14: Dünungswellen

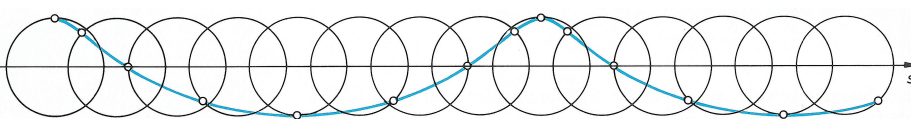


Abb.15: Teilchenbewegung bei großer Oberflächenwelle

2.3 Beschreibung einer Welle

2.3.1 Physikalische Größen zur Beschreibung einer Welle

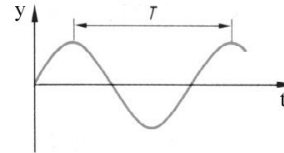
Die Beschreibung mechanischer Wellen erfolgt analog zur Beschreibung von Schwingungen, da jedes Teilchen, das von der Welle erfaßt wird, eine Schwingung ausführt.

Die **Periodendauer** einer Welle ist die Zeit, die jedes Teilchen für eine vollständige Hin- und Herbewegung benötigt.

Die **Frequenz** einer Welle ist die Frequenz, mit der jedes Teilchen seine Schwingung ausführt.

Die Bewegung jedes **einzelnen Teilchens** kann man in einem (y,t) -Diagramm (Abb.16) darstellen.

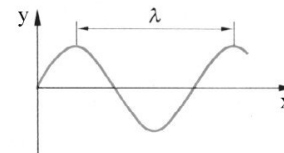
Abb.16: Bewegung eines Teilchens
– zeitliche Periodizität



Die **Wellenlänge** λ einer Welle ist der Abstand zweier benachbarten Teilchen, die im gleichen Bewegungszustand d.h. in gleicher Phase schwingen.

Das **augenblickliche Bild** einer **Welle** erkennt man in einem (y,x) -Diagramm (Abb.17).

Abb.17: Darstellung einer Welle
– räumliche Periodizität



Beide Diagramme haben zwar den gleichen Verlauf, sie beschreiben jedoch andere Sachverhalte! Man erkennt daß eine Welle zeitlich und räumlich periodisch ist.

Allgemein läßt eine Welle sich durch folgende mathematische Beziehung beschreiben:

Wellengleichung	$y = \hat{y} \cdot \sin \left[2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right]$	<p>y: Elongation in m \hat{y}: Amplitude der Welle = Amplitude der erregenden Schwingung in m t: Zeit in s T: Periodendauer in s x: Abstand vom Wellenzentrum = Laufstrecke der Welle in m λ: Wellenlänge = Abstand zweier benachbarter Teilchen, die in gleicher Phase schwingen in m</p>
------------------------	--	---

Die Wellengleichung beschreibt die Elongation = Auslenkung der Welle als Funktion der Position x und des Zeitpunktes t (Abb.18):

$$y = y(x,t)$$

Abb.18: $y = y(x,t)$

Betrachten wir ein Teilchen an einem **bestimmten Raumpunkt** d.h. setzen wir in der Gleichung $x = \text{konstant}$, erhalten wir eine Gleichung für eine **zeitliche Periodizität** (Abb.16).

Betrachten wir alle Teilchen zu einem **bestimmten Zeitpunkt** d.h. setzen wir in der Gleichung $t = \text{konstant}$, erhalten wir eine Gleichung für eine **räumliche Periodizität** (Abb.17).

Betrachten wir zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten t_1 und t_2 die räumliche Periodizität der Welle d.h. stellen wir die Welle jeweils in einem (y,x) -Diagramm (Abb.19) dar.

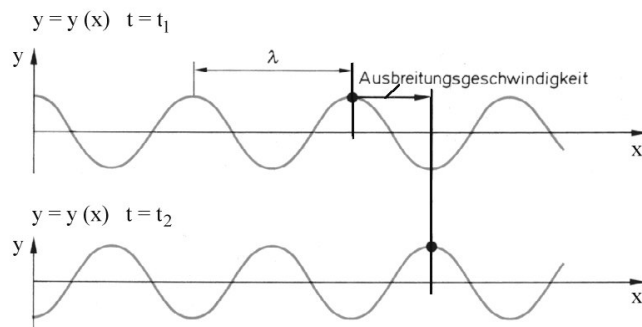


Abb.19: $y = y(x,t)$ zu zwei Zeitpunkten

Wir erkennen daß die Welle „wandert“, sie breitet sich im Raum aus. Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit c** hängt ab von

- der **Wellenlänge λ** d.h. dem Abstand zwischen zwei Teilchen gleicher Phase und
- der **Frequenz f** mit der jedes Teilchen der Welle schwingt.

Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit c** einer Welle gibt an, wie schnell sich ein bestimmter Schwingungszustand ausbreitet.

$$c = \lambda \cdot f$$

c : Ausbreitungsgeschwindigkeit
= Phasengeschwindigkeit in m/s
 λ : Wellenlänge in m
 f : Frequenz in Hz

2.3.2 Aufgaben zur Beschreibung einer Welle

Aufgabe 1:

Eine Sirene sendet einen Ton mit zunächst ansteigender und nachfolgend abnehmender Frequenz aus. Die Schallwellen werden an einer Häuserfront reflektiert.

Ein unter der Sirene stehender Beobachter stellt eine zeitliche Verschiebung der Veränderungen um 2,4 s gegenüber dem ausgesandten Signal fest. Wie weit ist die Häuserfront von der Sirene entfernt?

(Schallgeschwindigkeit c_{Luft} (15°C , 1,013 bar) = 340 m/s)

Aufgabe 2:

a) Bestimme für eine Wasserwelle aus der Abb.20 die Amplitude, die Frequenz, die Wellenlänge und die Ausbreitungsgeschwindigkeit.

b) Berechne die Elongation eines Teilchens im Abstand von 50 cm nach 1 s bzw. nach 1,5 s.

c) Können die Werte für die Elongation aus den Diagrammen gelesen werden?

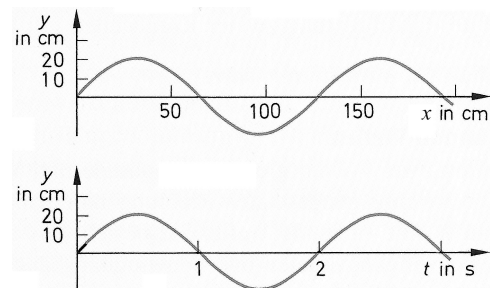


Abb.20: Darstellung einer Wasserwelle

Aufgabe 3:

Bei der Ausbreitung einer Schallwelle der Frequenz 2 kHz werden die Wellenlängen in Wasserstoff ($t = 20^\circ\text{C}$), in Luft ($t = 20^\circ\text{C}$) und Mauerwerk gemessen. Sie betragen 0,64 m, 0,17 m und 1,80 m. Wie groß sind die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Schallwelle?

Aufgabe 4:

Der Mensch kann Frequenzen von etwa 20 Hz bis 16 kHz hören. Welchen Wellenlängen entspricht das in Luft? ($c = 330$ m/s)

Aufgabe 5:

Eine Transversalwelle breitet sich in Richtung der positiven x-Achse mit der Geschwindigkeit $c = 4$ m/s aus. Sie beginnt zur Zeit $t = 0$ im Nullpunkt des Koordinatensystems. Die Frequenz beträgt $f = 0,25$ Hz.

a) Wie groß ist die Wellenlänge?

b) Wann beginnt ein Teilchen bei $x = 100$ m zu schwingen?

c) Welche Elongation hat dieses Teilchen zur Zeit $t = 75$ s?

3 Überlagerung = Interferenz

3.1 Ungestörte Überlagerung

Fahren zwei Motorboote nebeneinander her (Abb.21), so laufen die inneren Bugwellen aufeinander zu. In einem bestimmten Bereich durchdringen sie sich gegenseitig. Danach verläuft jede der Wellen so weiter, als wenn sie die andere Welle nicht getroffen hätte.

Das gleiche kann man beobachten wenn man zwei Steine in eine Wasserpfütze wirft.

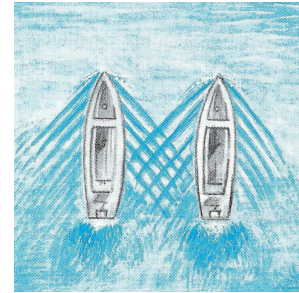


Abb.21: Ungestörte Überlagerung von Wellen

Überlagerungsprinzip = Superpositionsprinzip:

Treffen zwei mechanische Wellen aufeinander, so überlagern sie sich, ohne sich zu stören.

Selbst wenn sich die beiden Wellen nicht gegenseitig stören, so entsteht doch im Bereich der Überlagerung ein ganz anderes Wellenbild: die **Amplitude** ist an einzelnen Stellen **unterschiedlich groß**. Diese Erscheinung bezeichnet man als **Interferenz**.

Interferenz ist die Überlagerung zweier oder mehrerer Wellen an der gleichen Stelle des Raumes. Dabei treten Verstärkung oder Auslöschung der Welle auf.

Interferenzen sind **wellentypische Erscheinungen**. Sie sind besonders gut bei Wasserwellen zu zeigen.

3.2 Überlagerung von Kreiswellen

Um die Vorgänge bei der Überlagerung von Kreiswellen zu untersuchen, werden diesem mit einem Erreger auf einer Wasseroberfläche erzeugt. Hierzu sind an einem Wellenerreger zwei Tupfer befestigt, so daß sich bei der Auf- und Abwärtsbewegung gleichzeitig zwei Systeme von Kreiswellen einstellen.

Die sich ausbreitenden Kreise der Wellensysteme überlagern sich und erzeugen ein charakteristisches „Bild“ (Abb.22):

in manchen Gebieten der Wasseroberfläche tritt eine Verstärkung der Schwingung auf, in anderen eine Abschwächung. Längs einiger Streifen bleibt die Wasseroberfläche fast völlig in Ruhe (Abb.23).

Manche Wasserteilchen schwingen demzufolge stärker, andere schwächer und einige bleiben völlig in Ruhe.

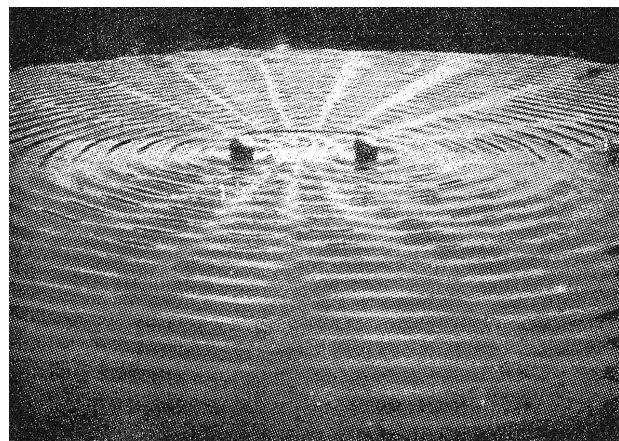


Abb.22: Überlagerung von zwei Kreiswellen

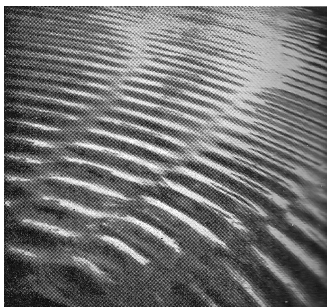


Abb.23: Schwingende und ruhige Gebiete der Wasseroberfläche

Berechnung der Interferenzerscheinungen:

Betrachten wir 2 Wellen gleicher Frequenz, gleicher Wellenlänge und gleicher Amplitude:

$$\left. \begin{aligned}
 y_1 &= \hat{y} \cdot \sin \left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right] \\
 y_2 &= \hat{y} \cdot \sin \left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \Delta\varphi \right]
 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l}
 y_1 \text{ und } y_2 \text{ unterscheiden sich zum Zeitpunkt } t \text{ am Ort } x \\
 \text{um die Phasenverschiebung } \Delta\varphi
 \end{array}$$

Überlagerungsprinzip:

$$\begin{aligned}
 y_R &= y_1 + y_2 \\
 &= \hat{y} \cdot \sin \left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right] + \hat{y} \cdot \sin \left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \Delta\varphi \right] \\
 y_R &= \hat{y} \cdot \left\langle \sin \left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right] + \sin \left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \Delta\varphi \right] \right\rangle \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{Trigonometrie:} \\
 \sin(\alpha + 2\pi) = \sin \alpha \quad (2) \\
 \sin(\alpha + \pi) = -\sin \alpha \quad (3)
 \end{array} \right\}$$

Aus (2) und (1) erhält man:

bei $\Delta\varphi = k \cdot 2\pi$ mit $k \in \mathbb{Z}$: **k: Gangzahl**

$$\begin{aligned}
 y_R &= \\
 y_R &= \text{_____} \quad \text{Maximale Verstärkung}
 \end{aligned}$$

Aus (3) und (1) erhält man:

bei $\Delta\varphi = (2 \cdot k + 1) \cdot \pi$

$$\begin{aligned}
 y_R &= \\
 y_R &= \text{_____} \quad \text{Auslöschung}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Aus } c &= \frac{\Delta x}{\Delta t} \text{ und} \\
 \omega &= \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \text{ nach } \Delta t \text{ aufgelöst und gleichgesetzt}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{erhält man: } \frac{\Delta x}{c} &= \frac{\Delta\varphi}{\omega} \\
 \Delta\varphi &= \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$(4) \text{ in } (1): y_R = \quad (5)$$

Wie vorhin erhält man für die Gangzahl $k \in \mathbb{Z}$

$$\begin{aligned}
 \text{aus (5) und (1): } \frac{\Delta x \cdot \omega}{c} &= k \cdot 2\pi \\
 \Leftrightarrow \Delta x &= \quad \left| \begin{array}{l} \omega = \frac{2\pi}{T} \\ c = \frac{\lambda}{T} \end{array} \right. \\
 \Leftrightarrow \Delta x &= \quad \left| \begin{array}{l} \omega = \frac{2\pi}{T} \\ c = \frac{\lambda}{T} \end{array} \right. \\
 \Delta x &= k \cdot \lambda \quad \text{Maximale Verstärkung}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Analog aus (5) und (2):} \\
 \Delta x &= (2 \cdot k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \text{Auslöschung}
 \end{aligned}$$



Unter dem **Gangunterschied** zweier Wellen gleicher Wellenlänge verstehen wir eine Strecke, um die man die eine Welle verschieben muß, damit gleichartige Schwingungszustände (z.B. die Stellen maximaler positiver Elongation) der beiden Wellen zur Deckung kommen.

Zeichnerische Konstruktion der Interferenzerscheinungen:

Nachfolgend sind die Wellensysteme der beiden Erreger (Abb.24) dargestellt:

- die Wellenberge sind durch dick ausgezogene Kreise (dunkelgrün bzw. dunkelgelb) dargestellt,
- die Wellentäler sind durch dünne ausgezogene Kreise (hellgrün bzw. hellgelb) dargestellt.

Aufgabe:

Zeichne die Punkte ein, an denen Auslöschung oder maximale Verstärkung stattfindet. Verbinde diese Punkte durch Kurven.

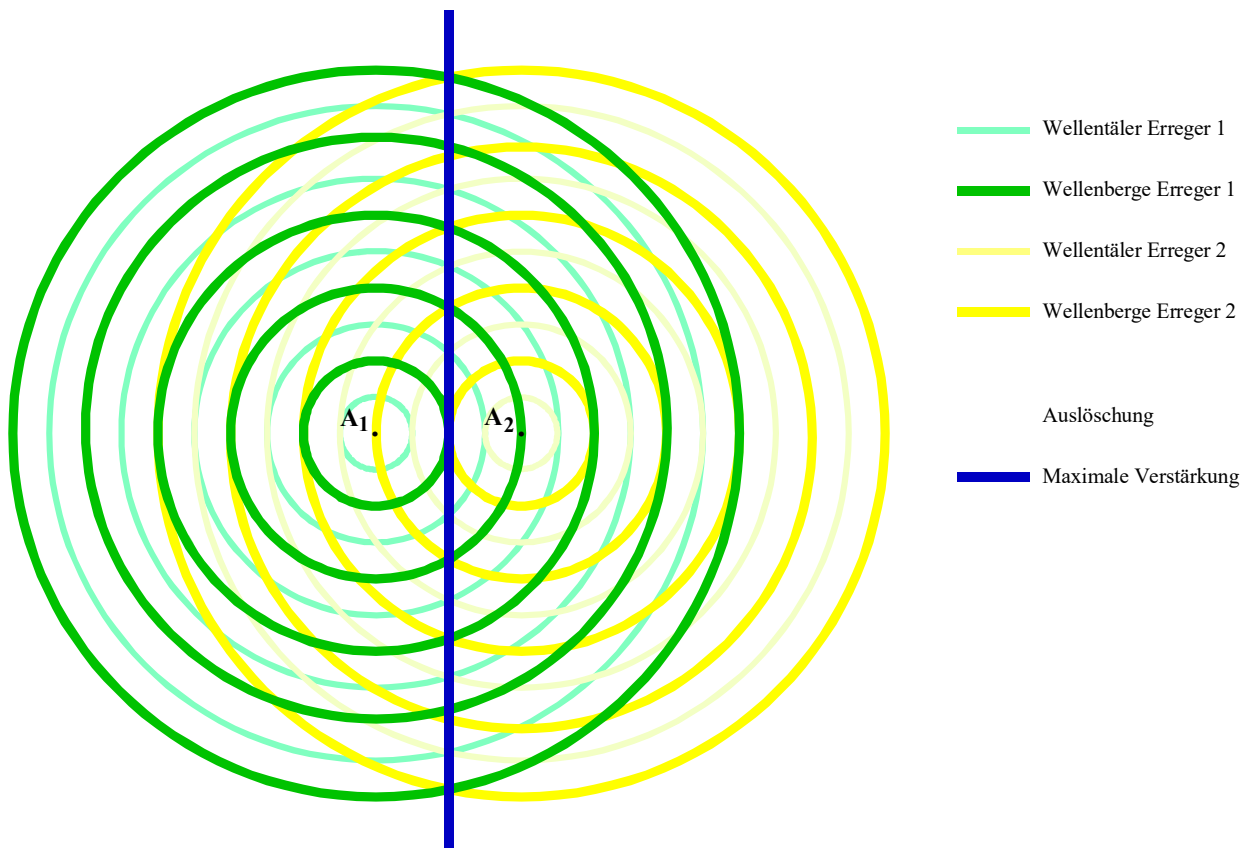


Abb.24: Wellensystem von zwei Erregern

Entsprechend den Berechnungen auf der vorhergehenden Seite tritt eine **maximale Verstärkung** an allen Punkten der Wasseroberfläche ein, an denen sich zwei Wellen mit einem Gangunterschied $k \cdot \lambda$ überlagern.

Das ist unter anderem überall dort der Fall, wo sich zwei dick gezeichnete oder zwei dünn gezeichnete Kreise schneiden. Diese Punkte maximaler Verstärkung sind durch dicke (z.B. blaue) Kurven dargestellt.

Die **maximale Verstärkung** findet beispielsweise an allen Punkten statt, an denen ein **Wellenberg** auf einen **Wellenberg** trifft oder ein **Wellental** auf ein **Wellental**.

Maximale Verstärkung tritt bei allen Punkten der Mittelsenkrechten der Strecke A_1A_2 ein. Alle anderen Kurven maximaler Verstärkung sind Hyperbeln, die als Brennpunkte die Erregerzentren haben.

Auslöschung tritt an allen Punkten der Wasseroberfläche ein, an denen sich zwei Wellen mit einem Gangunterschied $(2 \cdot k + 1) \cdot \lambda / 2$ überlagern.

Das ist unter anderem überall dort der Fall, wo sich ein dick gezeichneter und ein dünn gezeichneter Kreis schneiden. Diese Punkte maximaler Verstärkung sind durch dünne (z.B. blaue) Kurven dargestellt.

Die Auslöschung findet beispielsweise an allen Punkten statt, an denen ein **Wellenberg** auf ein **Wellental** trifft.

3.3 Prinzip von Huygens

Um die Vorgänge bei der Wellenausbreitung erklären zu können, entwickelte Christiaan HUYGENS ¹⁾ ein Modell der Wellenausbreitung.

Sein Prinzip wird anhand von zwei Versuchen veranschaulicht.

Versuch 1:

In einer Wellenwanne werden Wellen mit geradlinigen Wellenfronten erzeugt, die auf ein langgestrecktes Hindernis mit einer spaltförmigen Öffnung (Abb.25) auftreffen.

Man erkennt, daß sich hinter der Öffnung eine halbkreisförmige Welle ausbildet. Die **Öffnung** ist der **Ausgangspunkt** dieser **Welle**.

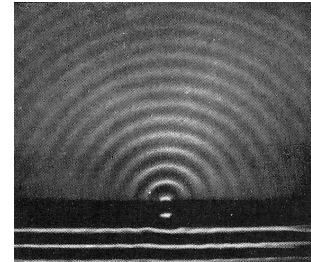


Abb.25: Wellenbildung an spaltförmiger Öffnung

Versuch 2:

Bei einem ähnlichen Versuchsaufbau wird ein Hindernis mit vielen kleinen Öffnungen verwendet, die in gleichen Abständen (Abb.26) angeordnet sind.

Hinter jeder Öffnung bilden sich wiederum halbkreisförmige Wellen aus. Diese überlagern sich derart, daß **in großer Entfernung** vom Hindernis erneut eine **geradlinige Wellenfront** auftritt.

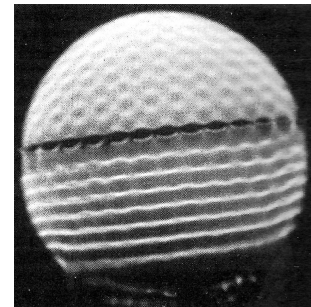


Abb.26: Bildung einer Wellenfront

Die Erklärung beider Vorgänge liefert nachfolgendes Modell der Wellenausbreitung:

Prinzip von Huygens:

Jeder von einer Wellenbewegung erfaßte Punkt eines Mediums wird selbst zum Ausgangspunkt einer neuen Welle, der sogenannten **Elementarwelle**, die sich mit der gleichen Geschwindigkeit wie die ursprüngliche Welle ausbreitet.

Die **neue Wellenfront** entsteht als **Einhüllende** aller Elementarwellen.

Anmerkung: die Elementarwelle ist eine Modellvorstellung. Man kann nur Kreiswellen mit einem ausgedehnten Zentrum erzeugen und sehen.

Mit Hilfe des Prinzips von Huygens kann man die Vorgänge bei den beiden Versuchen schematisch darstellen und deuten:

zu Versuch 1: die Wasserteilchen in der Öffnung werden durch die ankommende Welle zum Schwingen angeregt. Sie sind Ausgangspunkt von Elementarwellen (Abb.27).

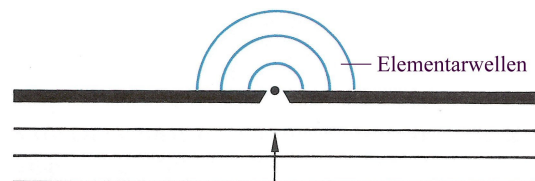


Abb.27: Bildung von Elementarwellen

zu Versuch 2: die Elementarwellen bilden hinter den Öffnungen halbkreisförmige Wellen. Diese überlagern sich. In größerem Abstand entsteht als Einhüllende (Abb.28) eine geradlinige Wellenfront.

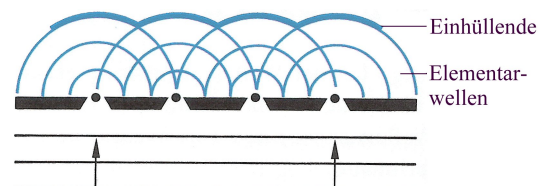


Abb.28: Bildung einer Einhüllenden

¹⁾ Christiaan HUYGENS (1629-1695): holländischer Physiker, Mathematiker und Astronom, entwickelte Wellenmodell. (Traité de la Lumière (1690))



4 Ausbreitung von Wellen

4.1 Einführung

Bei der **Ausbreitung** mechanischer Wellen kann man mehrere **charakteristische Erscheinungen** feststellen.

4.1.1 Geradlinige Ausbreitung

Bei hohen Geschwindigkeiten erzeugt ein Motorboot starke Bugwellen (Abb.29). Die geradlinigen Wellenfronten bewegen sich in der Ausbreitungsrichtung der jeweiligen Welle. Bei gleichbleibender Wassertiefe (Ausbreitungsgeschwindigkeit) breiten sich die Wellen geradlinig und senkrecht zu den Wellenfronten aus.

Das gilt auch für Schallwellen. Eulen greifen ihre Beute im Dunkeln. Sie peilen eine piepsende oder raschelnde Maus mit den Ohren an. Da sich die Schallwellen geradlinig ausbreiten, können sie die Maus fangen.

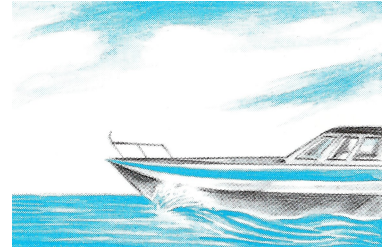


Abb.29: Geradlinige Ausbreitung von Wasserwellen

Mechanische Welle breiten sich **geradlinig** aus.

4.1.2 Reflexion

Fährt ein Schiff in einem Kanal, so treffen seine Bugwellen auf die Uferbefestigungen auf. Dort werden die Wasserwellen reflektiert (Abb.30).

Manchmal hört man die letzten Silben eines Wortes, das man vor einer Häuserwand, einem Berg oder einem Wald laut ruft. Die Schallwellen werden als Echo reflektiert.

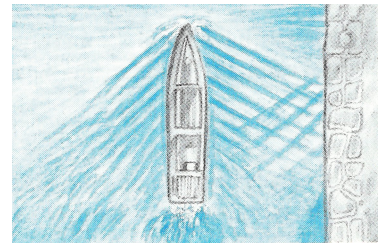


Abb.30: Reflexion von Wasserwellen

Tritt eine mechanische Welle auf ein **Hindernis**, so wird sie **reflektiert**.

4.1.3 Brechung

Treffen Wasserwellen schräg auf ein Gebiet, in dem sich flaches Wasser befindet, so ändert sich die Richtung der Wellenfronten und damit die Ausbreitungsrichtung der Wellen (Abb.31).

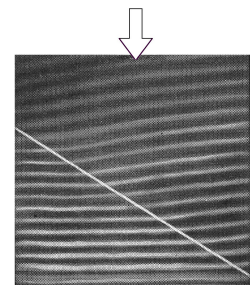


Abb.31: Brechung von Wasserwellen

Trifft eine mechanische Welle auf eine **Grenzschicht**, an der die Ausbreitungsgeschwindigkeit ändert, so ändert sich ihre Ausbreitungsrichtung. Die Welle wird **gebrochen**.

4.1.4 Beugung

Molen vor Hafenbecken werden so angelegt, daß die Dünung des Meeres nicht direkt eintreten kann. Dadurch werden Schäden an den Hafenanlagen und zu starke Bewegungen der vor Anker liegenden Schiffe vermieden. Trotzdem gelangen die Dünungswellen teilweise in das Hafenbecken hinein. Sie werden an der Hafensemole "herumgebogen" (Abb.32). Diese Erscheinung nennt man Beugung.

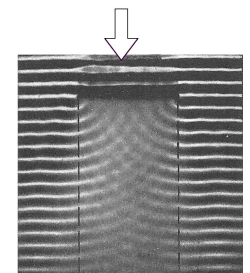


Abb.32: Beugung von Wasserwellen an einem Hindernis

Auch Wellen die teilweise zwischen zwei Wellenbrechern hindurch kommen, werden „herumgebogen“ und erzeugen in der abgedeckten Wasseroberfläche hinter den Brechern eine Wasserbewegung (Abb.33).

Ebenso hört man den Schall von Autos in einer Fußgängerzone, ohne die Autos zu sehen. Die Schallwellen werden an den Häusern, die am Eingang der Fußgängerzone stehen, gebeugt.

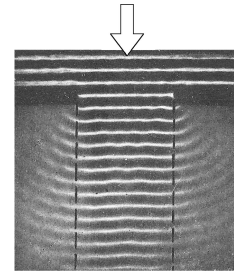


Abb.33: Beugung von Wasserwellen an einem Spalt

Trifft eine mechanische Welle auf ein Hindernis oder einen Spalt, so wird sie **gebeugt**.

4.2 Reflexionsgesetz

Betrachten wir eine ebene Welle P_1Q_1 , die schräg auf die Grenzfläche der beiden Medien 1 und 2 fällt (Abb.34). Sie wird durch die beiden parallelen Strahlen s_1 und s_3 dargestellt.

Abb.34: Reflexion einer Welle

Zum Zeitpunkt t_1 trifft der Strahl s_1 auf P_1 , der Strahl s_3 ist bei Q_1 ,
zum Zeitpunkt $t_3 > t_1$ trifft Strahl s_3 trifft auf P_3 .

Zum Zeitpunkt t_3 hat sich (nach Huygens) von P_1 aus eine neue kreisförmige Elementarwelle um P_1 ausgebreitet mit Radius P_1Q_1' .

Aufgrund des Zeitintervalls $\Delta t = t_3 - t_1$ gilt für den Radius: $P_1Q_1' = Q_1P_3$

Die neue Wellenfront ergibt sich als gemeinsame Tangente aller Elementarwellen, es ist zum Zeitpunkt t_3 die Verbindungslinie $Q_1'P_3$.

Betrachten wir die Dreiecke $P_1Q_1P_3$ und $P_1Q_1'P_3$:

die Länge P_1P_3 beider Dreiecke ist gleich,

da $Q_1P_3 = Q_1'P_1$ und Winkel($P_1Q_1P_3$) = Winkel($P_1Q_1'P_3$) = 90° muß auch gelten:

$$\text{Winkel}(Q_1P_3P_1) = \text{Winkel}(Q_1'P_3P_1)$$

und somit $\alpha = \beta$

Reflexionsgesetz:

Bei der **Reflexion** einer ebenen Welle an einer ebenen Grenzfläche sind der **Einfallswinkel** und **Reflektionswinkel gleich groß**

$$\alpha = \beta$$

α : Einfallswinkel in $^\circ$
 β : Reflektionswinkel in $^\circ$

4.3 Brechungsgesetz

Betrachten wir eine ebene Welle P_1Q_1 , die schräg auf die ebene Grenzfläche der beiden Medien 1 und 2 fällt und in das 2. Medium eindringt (Abb.35). Sie wird durch die zwei parallele Strahlen s_1 und s_3 dargestellt.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den Medien 1 bzw. 2 sollen c_1 bzw. c_2 betragen.

Abb.35: Brechung einer Welle

Zum Zeitpunkt t_1 trifft Strahl s_1 mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c_1 auf P_1 ,
zum Zeitpunkt $t_3 > t_1$ trifft Strahl s_3 mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c_1 auf P_3 .

Zum Zeitpunkt t_3 hat sich (nach Huygens) von P_1 aus eine neue kreisförmige Elementarwelle mit Radius P_1Q_1' ausgebreitet.

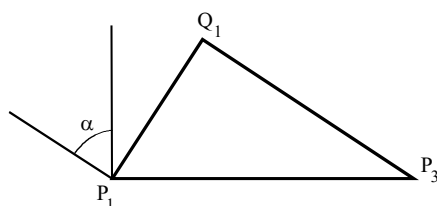
Die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Elementarwelle ist c_2 . Der Strahl s_1 hat die Strecke P_1Q_1' zurückgelegt. Die neue Wellenfront ergibt sich als gemeinsame Tangente aller Elementarwellen, es ist zum Zeitpunkt t_3 die Verbindungslinie $Q_1'P_3$.

Für gleiche Zeitintervalle gilt: $\frac{\text{Weg}}{\text{Geschwindigkeit}} = \text{konstant (= } \Delta t)$

$$\text{Für } \Delta t = t_3 - t_1 \text{ gilt daher: } \frac{Q_1P_3}{c_1} = \frac{P_1Q_1'}{c_2}$$

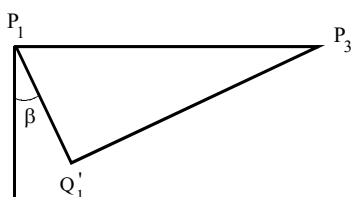
$$\text{und somit } \frac{Q_1P_3}{P_1Q_1'} = \frac{c_1}{c_2} \quad (I)$$

Betrachten wir die geometrischen Verhältnisse für die Welle im Medium 1 (Abb.36) und 2 (Abb.37):



Man erkennt:

Abb.36: Welle im Medium 1



Analog erhält man:

Abb.37: Welle im Medium 2

Aus (2) und (3) folgt:

$$\text{bzw.} \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{Q_1 P_3}{P_1 Q_1'} \quad (4)$$

Unter Berücksichtigung von (1) und (4) erhält man schlußendlich: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{Q_1 P_3}{P_1 Q_1'} = \frac{c_1}{c_2}$

Brechungsgesetz:

Wird eine ebene Welle an einer ebenen Grenzfläche zweier Medien **gebrochen**, ist der **Quotient aus dem Sinus** des Einfallswinkel und dem Sinus des Brechungswinkels gleich dem **Quotienten aus den Ausbreitungsgeschwindigkeiten** der Welle in den beiden Medien.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

α : Einfallswinkel in $^\circ$

β : Brechungswinkel in $^\circ$

c_1 : Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium 1 in m/s

c_2 : Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium 2 in m/s

Anmerkung:

Die Frequenz f der Welle bleibt unverändert.

$$\text{Somit gilt:} \quad \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

5 Stehende Wellen

5.1 Entstehung einer stehenden Welle

5.1.1 Überlagerung von Wellen

An den beiden gegenüberliegenden Enden eines Wellenkanals werden Wellen mit gleicher Frequenz erzeugt (Abb.38).

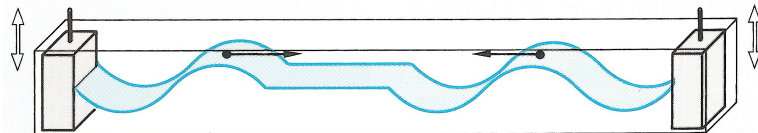


Abb.38: Überlagerung von Wellen

Beim Überlagern entstehen Bereiche, in denen sich das Wasser stark auf- und abbewegt, und solche, in denen das Wasser weitgehend ruht.

Erstere nennt man **Schwingungsbäuche**, letztere **Schwingungsknoten**.

In Abb.39 ist der Überlagerungsvorgang in aufeinander folgenden Phasen dargestellt.

Man erkennt, daß im Bereich der **Schwingungsbäuche** zeitlich **nacheinander alle Möglichkeiten der Überlagerung** zweier Wellen auftreten, von der gegenseitigen **Auslöschung** (bei $t = 0$, $t = T/2$, $t = T \dots$) bis zur vollständigen **Verstärkung** ($t = T/4$, $t = 3 \cdot T/4 \dots$).

Im Bereich der **Knoten** tritt demgegenüber **zu jedem Zeitpunkt Auslöschung** auf, da die **Elongation beider** Wellen entweder **null** ist ($t = T/4$, $t = 3 \cdot T/4 \dots$) **oder** die Elongation **gleichen Betrag**, aber **entgegengesetzt Vorzeichen** haben.

Eine solche Welle, die ortsfeste Schwingungsknoten und -bäuche besitzt, nennt man **stehende Welle**.

Beiderseits eines Knotens schwingen die Teilchen jeweils in entgegengesetzter Richtung.

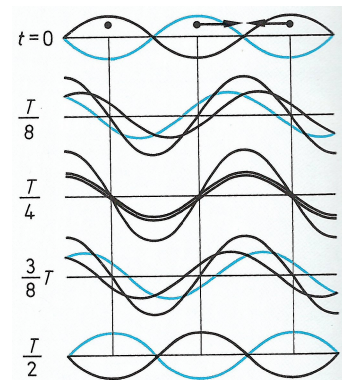


Abb.39: Entstehung einer stehenden Welle

Eine **stehende Welle tritt auf**, wenn zwei Wellen **gleicher Amplitude** und **Wellenlänge** aufeinander treffen, die sich in **entgegengesetzter Richtung** ausbreiten.

Sie hat **ortsfeste Schwingungsknoten** und **Schwingungsbäuche**.

Der **Abstand** zweier benachbarter **Knoten** beträgt eine **halbe Wellenlänge** ($\lambda/2$).

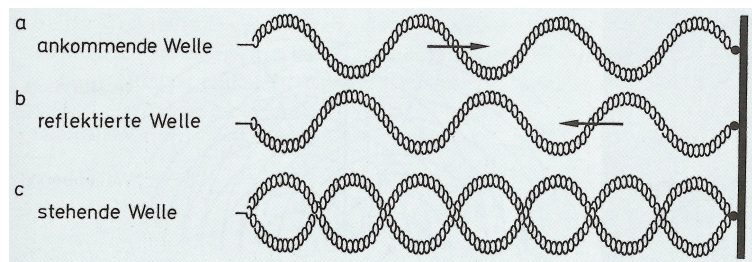
Anmerkungen:

- Die Wellenlänge der stehenden Welle stimmt mit derjenigen der Ausgangswellen überein.
- Beiderseits eines Knotens schwingen die Teilchen jeweils in entgegengesetzter Richtung.
- Alle Teilchen einer stehenden Welle gehen gleichzeitig durch die Gleichgewichtslage und erreichen gleichzeitig ihren größten Ausschlag.
- Stehenden Welle sind von Bedeutung, weil mit ihrer Hilfe Messungen von Wellenlängen durchgeführt werden können.

5.1.2 Reflexion von Wellen

Eine stehende Welle läßt sich auch dadurch erzeugen, daß man eine Welle auf ein Hindernis auflaufen läßt. Sie wird reflektiert und läuft der ankommenden Welle entgegen (Abb.40).

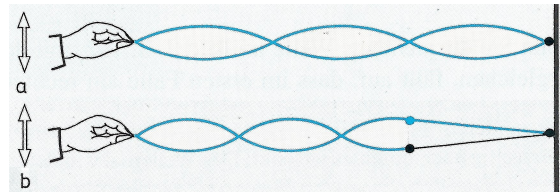
Abb.40: Entstehung einer stehenden Welle durch Reflexion



Solche Reflexionen können bei **Stäben, Seilen, Luftsäulen, Saiten** oder in **Flüssigkeiten** auftreten. Die Schwingungen einer stehenden Welle findet man bei vielen Musikinstrumenten.

Die **Form** der stehenden Welle, die durch Reflexion entsteht, hängt von den „Enden“ der Welle (Abb.41) ab:

Abb.41: Reflexion am festen Ende (a) und am offenen Ende (b)



Eine **stehende Welle** lässt sich dadurch **erzeugen**, daß eine Welle an einem **Hindernis reflektiert** wird.

Wird eine Welle an einem **festen Ende** reflektiert, so entsteht bei der Überlagerung von ankommender und reflektierender Welle an dieser Stelle ein **Schwingungsknoten**.

Bei der Reflexion am **losen Ende** entsteht dort ein **Schwingungsbauch**.

5.2 Grund- und Oberschwingung

Bei bestimmten Wellenlängen kommt es zu stehenden (oder stationären) Wellen. Betrachten wir mehrere stehenden Wellen, die an einem Seil entstehen können, das zwischen zwei Wänden eingespannt ist (Abb.42).

Aufgabe:

- Bestimme zu jeder Welle den Abstand l zwischen den Wänden als Funktion der Wellenlänge λ .
- Wie verhalten sich die Wellenlänge λ , die Frequenz f und die Amplitude y der einzelnen stehenden Wellen zueinander?

Bezeichnung:	Lösung:	Abstand:	λ, f und y:

Abb.42: Grund- und Oberschwingungen

Allgemein gilt als Zusammenhang zwischen dem Abstand l und der Wellenlänge λ :

Bei stehenden (stationären) Wellen an einem Seil, das zwischen zwei Wänden eingespannt ist, ist der Wandabstand ein Vielfaches der halben Wellenlänge.

- l : Abstand in m
- k : Gangzahl ohne Einheit
 $k = 1, 2, \dots$
- λ : Wellenlänge in m

5.3 Ausbreitungsgeschwindigkeit und Frequenz

5.3.1 Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit

Aufgabe:

Berechne für die Aufgabe aus vorhergehendem Abschnitt die Ausbreitungsgeschwindigkeit c .

- Gegeben: Abstand $l = 1$ m
Frequenz der Grundschiwingung: $f = 50$ Hz
- Gesucht: Ausbreitungsgeschwindigkeit c

Lösung:

$l = k \cdot \lambda / 2$ (1)
 $c = \lambda \cdot f$ (2) (siehe Seite E6)

Schwingung:	Gangzahl k ohne E.	Frequenz f in Hz (aus Abb.42)	Wellenlänge λ in m ($\lambda = 2 \cdot l / k$)	Ausbreitungsgeschwindigkeit c in m/s ($c = \lambda \cdot f$)
Grundschiwingung				
1. Oberschiwingung				
2. Oberschiwingung				

Allgemein gilt demzufolge:

Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit c** hängt vom **Ausbreitungsmedium** (Stoff) und der **Temperatur T** ab.

$c = c(T, \text{Medium})$

5.3.2 Berechnung der Frequenz

Aufgabe:

Berechne für die Aufgabe aus vorhergehendem Abschnitt die Frequenz f als Funktion der Ausbreitungsgeschwindigkeit:

Lösung:

Aus (2):

In (1):

Somit folgt:

$$f = k \cdot \frac{c}{2 \cdot l}$$

Frequenz eines Seiles, das zwischen zwei Wänden eingespannt ist.

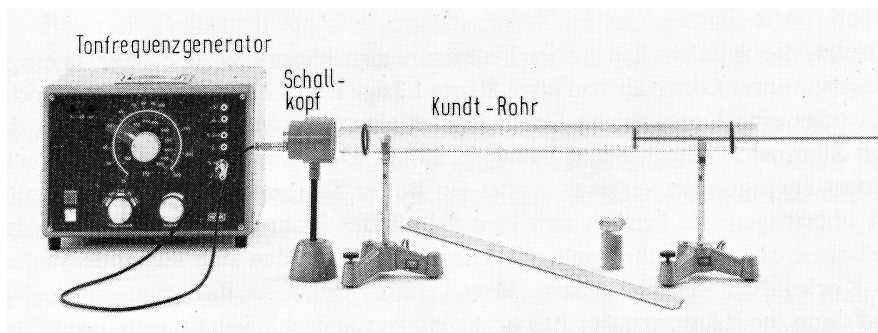
6 Schallwellen (Akkustik)

6.1 Stehende Wellen (Kundtsche Röhre)

Mit Hilfe des Kundt-Rohres ¹⁾ (Abb.43) werden stehende Schallwellen sichtbar gemacht.

Im Rohr erzeugte stehende Wellen werden durch Korkmehl sichtbar gemacht. Dieses bildet sogenannte Kundt-Staubfiguren: an den Wellenbäuchen bewegt es sich, an den Wellenknoten bleibt es in Ruhe.

Abb.42: Versuchsaufbau Kundtsche Röhre



Durch Messen des Abstandes zweier benachbarten Knoten kann man die Wellenlänge der Schwingungen bestimmen. Mit Hilfe der (am Tonfrequenzgenerator) eingestellten Frequenz errechnet sich daraus die Schallgeschwindigkeit des Gases im Rohr.

Die Schallgeschwindigkeit in festen Stoffen kann ebenfalls gemessen werden, da der ins Rohr eingespannte Stab eine Längsschwingung ausführt.

Aus den selbst durchgeführten Versuchen (siehe TP Kundtsche Röhre) und aus Literaturrecherchen lassen sich die in nachfolgender Tabelle (Abb.44) aufgeführten Schallgeschwindigkeiten zusammentragen.

Schallgeschwindigkeit c in m/s					
Feste Stoffe (bei 20°C):		Flüssigkeiten (bei 20°C):		Gase (bei 0°C und 101,3 kPa):	
Aluminium	5110	Ethylalkohol	1170	Luft	331,6
Eisen	5180	Glycerin	1923	Luft 15°C	340
Gummi	54	Meerwasser	1531	Methan	430
Kork	500	Wasser, dest.	0°C 1403	Sauerstoff	315
Kupfer	3800		20°C 1483	Stadtgas	450
Pyrexglas	5170		40°C 1529	Stickstoff	334
Ziegel	3650		60°C 1551	Wasserstoff	1286

Abb.44: Schallgeschwindigkeit verschiedener Stoffe

1) August Adolph Eduard Eberhard KUNDT (1839-1894): deutscher Physiker, bewies Einatomigkeit des Quecksilberdampfes stellte als erster Metallspiegel durch Kathodenbestäubung her



6.2 Schwebung

Wenn zwei Schallquellen harmonische Wellen gleicher Amplitude aussenden, die sich nur geringfügig in ihrer Frequenz unterscheiden, erklingen nicht zwei getrennte Töne, sondern ein einziger Ton. Dieser schwankt regelmäßig in seiner Lautstärke. Man spricht von **Schwebung**.

Die Summenschwingung läßt sich wie folgt berechnen:

$$y_R = 2 \cdot y_{\max} \cdot \cos[\pi(f_1 - f_2)t] \cdot \sin[\pi(f_1 + f_2)t].$$

Der Schwingungsverlauf ist in Abb. 45 dargestellt.

Schwebung läßt sich beispielsweise bei einer Orgel mit vielen Pfeifen nicht immer ganz verhindern, der Klang geht dann etwas „unter die Haut“. Bei großen Orchestern tritt der Effekt auf, die Lautstärke scheint dem Zuhörer dauernd an- und abschwellend. Musiker stimmen beispielsweise Klaviere mit Hilfe von Stimmgabeln.

Bei Metallsuchgeräten wird die Frequenz einer der beiden Schwingungskreise durch ein Metall verändert.

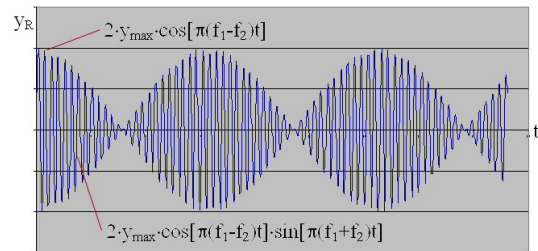


Abb.45: Schwebung

6.3 Aus Wissenschaft und Technik

Stehende Schallwellen in Orgelpfeifen

Das auffälligste an einer Orgel sind die Orgelpfeifen (Abb.46). Die langen sind gut sichtbar angeordnet. Von dieser großen Front können sie die tiefen Töne besonders gut ausbreiten. Die kleinen Pfeifen, die oft nur wenige Zentimeter lang sind, sind im hinteren Teil der Orgel angebracht. In ihnen werden die hohen Töne erzeugt. Da die Schwingungsenergie quadratisch mit der Frequenz zunimmt, sind auch die Töne der versteckten Orgelpfeifen unter sonst gleichen Bedingungen gut zu hören.

Es finden Pfeifen verschiedener Bauart Verwendung, sowohl oben offene als auch geschlossene („gedackte“) Pfeifen.

Bei einer Lippenpfeife strömt die Luft von unten ein. Der Luftstrahl, der in der Kernspalte entsteht, erzeugt Wirbel. Diese Wirbel regen die Luftsäule im oberen Teil der Orgelpfeife zum Schwingen mit deren Eigenfrequenz an. Es entsteht eine stehende Welle. In der schmalen, langen Pfeife bildet sich diese Welle nur in der Längsrichtung aus. Sie besitzt am oberen und am unteren Ende jeweils einen Schwingungsbauch.

Außer der Grundschwingung können noch harmonische Oberschwingungen auftreten. Diese Grund- und Oberschwingungen sind im Zusammenwirken immer wohlklingend.

Orgeln wurden in Form von Wasserorgeln schon 250 v. Chr. erwähnt. Das Wasser wurde benutzt, um die Luft in die Orgelpfeifen zu drücken.



Abb.46: Orgelpfeifen

7 Aufgaben zu stehenden Wellen

Aufgabe 1:

Die Schallgeschwindigkeit in Luft beträgt 340 m/s. Wie lang muß eine beidseitig offene Orgelpfeife sein, damit die 1. Oberfrequenz 880 Hz erzeugt? (Erg.: 0,386 m)

Aufgabe 2:

Welche Wellenlänge haben die Grundschwingung und die 2. Oberschwingung in einer 59cm langen Querflöte, die einseitig geöffnet ist? (Erg.: 236 cm; 47,2 cm)

Aufgabe 3:

Wenn man geschickt über die Öffnung einer leeren Wasserflasche bläst erzeugt man einen Ton. Wie verändert sich der Ton, wenn die Flasche mit Wasserstoff gefüllt ist? (Erg.: $f_{H_2} \approx 4 \cdot f_{Luft}$)

8 Optik (Licht)

8.1 Modellvorstellungen über die Ausbreitung des Lichtes

Anfang des 17. Jahrhunderts hat man versucht vom Licht eine anschauliche Modellvorstellung zu gewinnen. Diese sollte gestatten die beobachteten Erscheinungen und Gesetzmässigkeiten in möglichst einfacher Weise zu beschreiben und zu verstehen.

- Eine erste wichtige Erkenntnis auf dem Wege der Erforschung des Lichtes war die Feststellung, daß das Licht eine bestimmte, messbare Zeit braucht, um von dem Ort seiner Entstehung zum Ort seiner Wahrnehmung zu gelangen.
Licht ist ein Energiestrom der sich mit einer **messbaren Geschwindigkeit** ausbreitet.
- Anschließend stellte sich die Frage nach dem „Wesen“ des Lichtes. „Was ist Licht?“ Es gibt zwei Möglichkeiten, durch die sich ein Energiestrom ausbreiten kann:
durch **Wellen** oder durch **Teilchen**, die vom Ort des Ereignisses ausgehen.

Demzufolge können also für das Licht grundsätzlich zwei verschiedene Modellvorstellungen entwickelt werden:

- Das **Korpuskelmodell** des Lichtes wurde von NEWTON ¹⁾ entwickelt. Danach gehen von der Lichtquelle kleine, substantielle Partikeln aus, die sich mit Lichtgeschwindigkeit nach allen Richtungen geradlinig ausbreiten.
- Das **Wellenmodell** des Lichtes stammt von HUYGENS. Dieser stellte sich die Lichterscheinungen ähnlich wie die Schallvorgänge vor. Was sich von einer tönenden Glocke aus in der Luft ausbreitet, sind nicht die einzelnen Luftteilchen, sondern Wellen, die hier aus Verdichtungen und Verdünnungen bestehen; es ist also nicht die Materie, die sich im Raume ausbreitet, sondern ein bestimmter Zustand der Materie. Jede mechanische Wellenbewegung erfordert aber einen Träger, d.h. es müssen Teilchen vorhanden sein, die die sich ausbreitenden Schwingungen ausführen. Da das Licht sich aber auch durch den leeren Weltraum ausbreitet, stellte sich HUYGENS einen feinen, alles durchdringenden Stoff, den *Lichtäther* vor, der als transportierendes Medium wirkt.

Wesentliche Merkmale von Teilchen bzw. Wellen sind in Abb.46 festgehalten.

Teilchen	Wellen
- Befinden sich zu jedem Zeitpunkt an einem bestimmten Ort und haben eine bestimmte Geschwindigkeit	- beruhen auf räumlichen und zeitlich periodischen Veränderungen physikalischer Größen
- Bewegen sich auf bestimmten Bahnen	- sind räumlich ausgedehnt
- bei Wechselwirkungen gelten die Erhaltungssätze für Energie und Impuls	- an Hindernissen kommt es zu Beugung und Reflexion
	- Interferenz kann zu Verstärkung oder Auslöschung führen

Abb.46: Vergleich Teilchen-/Welleneigenschaften

Durch keine der beiden Modellvorstellungen werden sämtliche Eigenschaften des Lichtes vollständig beschrieben. Ein Teil der Erscheinungen wird durch das Wellenbild und ein anderer Teil durch das Korpuskelbild richtig wiedergegeben.

Zu vollständiger Erfassung der Eigenschaften des Lichtes müssen **beide Modellvorstellungen nebeneinander** benutzen werden. Man spricht vom **Dualismus des Lichtes**.

Licht wurde bereits zu frühen Zeiten ebenso wie heute noch in Form von Strahlen dargestellt. Die Strahleneigenschaften des Lichtes sind aus der Optik bekannt (geradliniges Ausbreiten, Reflexion an ebenen Flächen). Sie lassen sich, ähnlich wie Wasserwellen, mit Hilfe eines Wellenmodells erklären. Sie lassen sich aber auch durch das Korpuskelmodell erklären (kleine Partikel reflektieren wie Billardkugeln an ebenen Wänden).

Wellentypische Eigenschaften sind Beugung und Interferenz, die wir beim **Licht** ebenfalls vorfinden.

¹⁾ Sir Isaac NEWTON (1643-1727):
englischer Physiker



8.2 Abweichendes Verhalten von der Strahlenoptik

Interferenzerscheinungen beim Licht sind öfters zu sehen. Beispielsweise sind farbige Ringe auf der Asphaltstraße zu finden. Sie werden durch dünne Ölschichten verursacht.

Auch Seifenblasen (Abb.47) zeigen wechselnde Farben. Hier ist eine sehr dünne Schicht Seifenwasser die Ursache.



Abb.47: Farbige Bereich bei Seifenblasen

Versuch:

In den Weg eines durch einen sehr schmalen Spalt (Abb.48 (a)) begrenzten, fast parallelen Lichtbündels (Laserlicht) bringen wir einen Draht (b) (Durchmesser in der Größenordnung 1 mm),

Nach der Strahlenoptik müsste der Lichtbündel von dem Draht ein scharfes Schattenbild erzeugen.

Auf einem Schirm (c) beobachten wir innerhalb des geometrischen Schattenraumes in der Längsachse des Schattens einen hellen Streifen (Abb.49). Abwechselnd schliessen sich -je nach Drahtdicke- mehr oder weniger eng nebeneinander liegende, parallele, dunkle und helle Streifen im Wechsel an. Ähnlich aussehende Streifen, allerdings schwächer, treten außerhalb des Schattens auf.

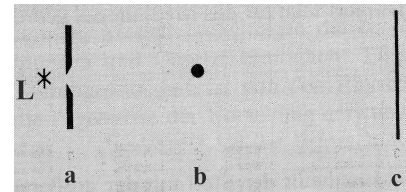


Abb.48: Anordnung zur Beugung am Draht

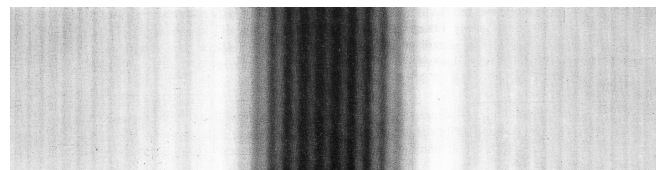


Abb.49: Helle und dunkle Beugungsstreifen

Bei Verwendung von weissem Licht entstehen farbige Streifen.

Ähnliche Erfahrungen hatte bereits F.M.GRIMALDI ¹⁾ gemacht. Er wusste schon, daß das weiße Licht alle Spektralfarben enthält, und beobachtete, daß die durch enge Öffnungen hindurch fallenden parallelen Sonnenstrahlen keine scharfen Bilder dieser Öffnungen erzeugen. Vielmehr treten innerhalb der geometrischen Schatten um so deutlicher farbige Ränder auf, je kleiner die benutzten Öffnungen sind.

Diese Erscheinung bezeichnen wir als Lichtbeugung (Diffraktion) und erklären sie mit Hilfe des Wellenmodells für das Licht.

8.3 Interferenz am Doppelspalt

Zur näheren Untersuchung des Interferenzbildes wollen wir den **Doppelspaltversuch von YOUNG** ²⁾ nachvollziehen.

Versuch:

Teil 1

Von einer Glühlampe ausgesendetes Licht (Abb.50) durchdringt zunächst einen schmalen Leuchtspalt. Dadurch wird ein sehr enges Lichtbündel ausgeblendet. Dieses Lichtbündel trifft auf den Doppelspalt. Das entstehende Interferenzbild wird auf dem Schirm beobachtet.

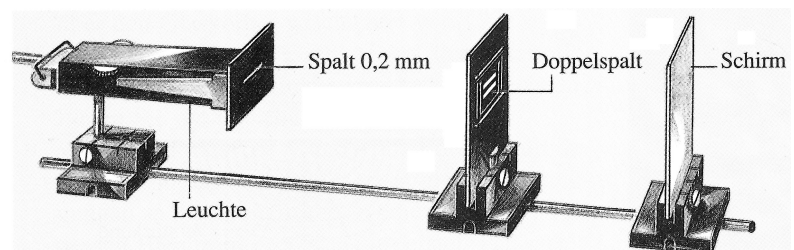


Abb.50: Versuchsaufbau Doppelspaltversuch von Young

¹⁾ Francesco Maria GRIMALDI (1618-1663): italienischer Mathematiker und Physiker



²⁾ Thomas YOUNG (1773-1829): englischer Augenarzt



Beobachtungen:

Es entstehen helle und dunkle Interferenzstreifen (Abb.51). Der mittlere Streifen ist weiß, die übrigen sind mehrfarbig. Auf der Seite, die dem mittleren Streifen zugewandt ist, sind sie blau, auf der abgewendeten Seite rot.

Abb.51: Interferenzmuster beim Doppelspaltversuch

Erklärung:

Der Doppelspalt blendet aus dem ankommenden Licht zwei schmale, parallele Lichtbündel aus. Diese verlaufen sehr dicht nebeneinander. Infolge der **Beugung** gelangt das Licht auch an Stellen, die es bei streng geradliniger Ausbreitung nicht erreichen würde. Dadurch überlagern sich die Lichtbündel (ähnlich Wasserwellen), es entsteht ein Interferenzbild.

Die hellen Streifen sind die Stellen an denen Wellenberge bzw. Wellentäler zusammentreffen. Dort tritt Verstärkung auf. An den dazwischen liegenden Stellen liegt Auslöschung vor. Dort treffen Wellenberge mit Wellentälern zusammen.

Teil 2

Dann wird ein Blaufilter (Abb.52) in den Lichtweg gebracht, anschließend ein Rotfilter.

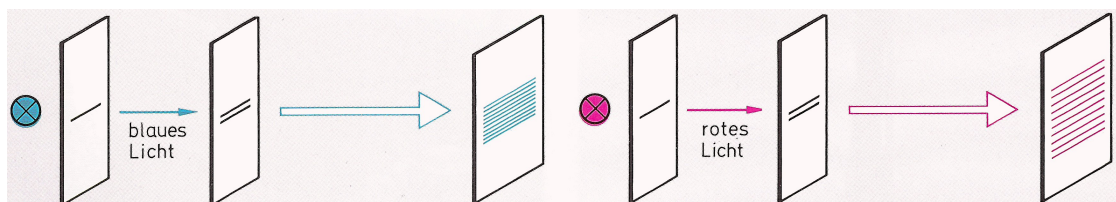


Abb.52: Interferenzmuster bei Lichtfiltern

Beobachtungen:

Alle Interferenzstreifen sind nun einfarbig. Bei blauem Licht ist der Abstand der Streifen kleiner als bei rotem Licht.

Erklärung:

Trifft das vom Leuchtpalt kommende blaue Licht senkrecht auf den Doppelspalt (Abb.53), so ist der Weg bis zum mittleren Interferenzstreifen auf dem Schirm für jeden Teil des Wellenzuges gleich lang (Abb.53 (a)). Dort tritt Verstärkung auf, da kein Gangunterschied zwischen den Wellenzügen vorliegt.

Für alle anderen unterscheiden sich die Wege der Wellenzüge. Dort wo der Gangunterschied genau eine halbe Wellenlänge beträgt, tritt Auslöschung auf (Abb.53 (b)). Bei einem Gangunterschied von einer Wellenlänge ist Verstärkung zu beobachten (Abb.53 (c)).

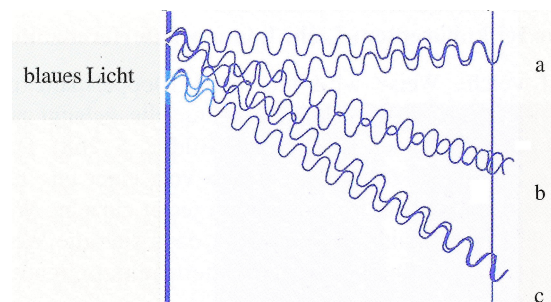


Abb.53: Wellenzüge bei blauem Licht

Beim rotem Licht liegen die Interferenzstreifen weiter auseinander (Abb.54). Der Gangunterschied von einer Wellenlänge entspricht einer größeren Entfernung. Das rote Licht besitzt eine größere Wellenlänge.

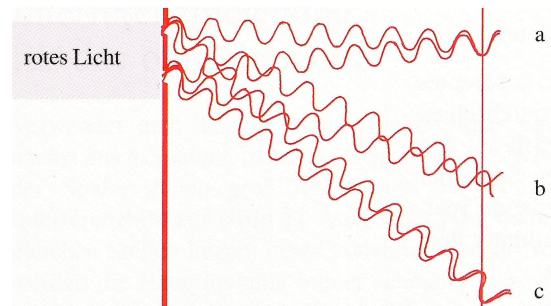


Abb.54: Wellenzüge bei rotem Licht

Die Bilder, die bei der Beugung und Interferenz am Doppelspalt auftreten, sind ein sicherer Beleg für die **Welleneigenschaften des Lichtes**.

8.4 Lichtgeschwindigkeit

Die Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes ist interessant, da die Lichtgeschwindigkeit c (im Vakuum) als Naturkonstante eine universelle Bedeutung hat.

Die Lichtgeschwindigkeit im **Vakuum** ist von der **Frequenz unabhängig** und somit für alle elektromagnetischen Wellen (sichtbares Licht, Röntgenstrahlen, Radiowellen) gleich.

Die Lichtgeschwindigkeit hat im Vakuum den grössten Wert und beträgt dort:

$$c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

In Materie ist die Lichtgeschwindigkeit jedoch geringer als im Vakuum. Das Verhältnis der Vakuumlichtgeschwindigkeit zur Geschwindigkeit des Lichtes in einem Stoff ist durch die **Brechzahl n** des Stoffes gekennzeichnet.

Die Brechzahl ist von **Stoff** zu Stoff verschieden und ist außerdem von der **Frequenz abhängig**:

In **Gasen**, z.B. in Luft, ist die Geschwindigkeit des sichtbaren Lichtes nur wenig geringer (Abb.55) als im Vakuum. In **festen** und **flüssigen** Stoffen beträgt die Geschwindigkeit des sichtbaren Lichtes nur die Hälfte oder ein Drittel von der Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Lichtgeschwindigkeit c in m/s	Aggregatzustand:
Vakuum	$3,00 \cdot 10^8$
Luft	$3,00 \cdot 10^8$
Kohlenstoffdioxid	$2,66 \cdot 10^8$
Ethanol	$2,20 \cdot 10^8$
Wasser	$2,24 \cdot 10^8$
Diamant	$1,22 \cdot 10^8$
Glas	$(1,70-2,00) \cdot 10^8$
Kupfer(I)-oxid	$1,11 \cdot 10^8$
Steinsalz	$1,94 \cdot 10^8$

Abb.55: Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Stoffen

Da in Luft die Lichtgeschwindigkeit nur unbedeutend kleiner (etwa 0,03%) ist als im leeren Raum, werden wir in Zukunft für die Lichtgeschwindigkeit im leeren Raum und in Luft im allgemeinen den gerundeten Wert $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ (= 300 000 km/s) benutzen.

9 Laser

9.1 Funktionsweise

Laser ist die Abkürzung für „light amplification by stimulated emission of radiation“, d.h. Lichtverstärkung durch künstlich angeregte Aussendung von Strahlung.

Ein Laser besteht aus einer **Energiequelle** und einem **Resonator** (Abb.56).

Die Energiequelle hat die Aufgabe eine große Anzahl von Atomen des Lasermediums in **metastabile Anregungszustände** zu bringen. Dieser Vorgang wird als **Pumpen** bezeichnet.

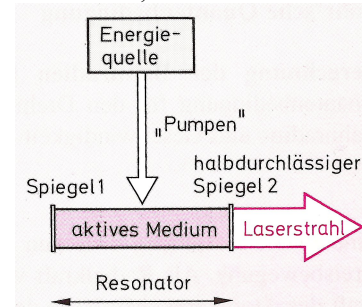


Abb.56: Aufbau eines Lasers

Am Beispiel eines **Rubin-Lasers** (Abb.57) soll der Vorgang etwas detaillierter erklärt werden:

Eine wendelförmige Gasentladungslampe umgibt einen zylinderförmigen Rubinkristall von Bleistiftdicke und 5 bis 10 cm Länge. Die Lampe sendet eine gelb-grüne Strahlung aus, die die Rubin-Ionen aus dem **Grundzustand** (Energieniveau W_1) (Abb.58) auf angeregte Zustände mit einem Energieniveau W_3 anhebt. Diesen Bereich bezeichnet man als **Energieband**, weil es sich um mehrere Energieniveaus handelt.

Nach kurzer Verweilzeit gehen die Elektronen aus dem Energieband unter geringer Energieabgabe (in Form von Wärme) spontan in den exakt definierten **metastabilen Energiezustand** W_2 über.

Bei genügend starker Anregung (**Pumpen**) kann gleichzeitig ein großer Teil der Elektronen auf ein metastabiles Niveau angeregt und somit viel Energie gespeichert werden.

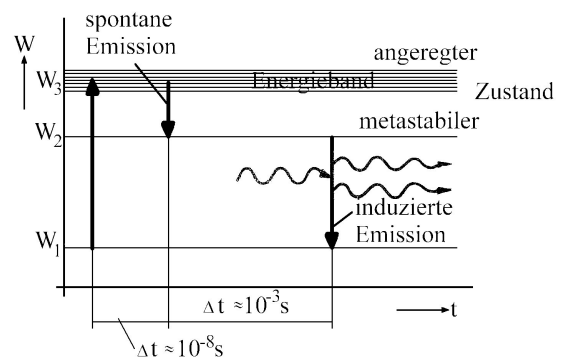
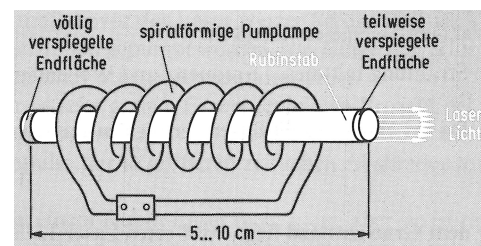


Abb.58: Energieniveaus beim Rubin-Laser

Ein **Lichtquant (Photon)**, das bei einer der seltenen spontanen Emissionen entsteht, löst eine Folge von **induzierten Emissionen** aus. Diese treffen auf weitere Elektronen im metastabilen Zustand, so daß die Zahl der induzierten Lichtquanten rasch ansteigt.

Ein **optischer Resonator** bewirkt, daß die Verstärkung des Lichtes nur in einer Richtung und nur für bestimmte Wellenlängen erfolgt. Der Resonator besteht im einfachsten Fall aus zwei parallelen Planspiegeln. Die Stirnflächen des Resonators müssen mit größter Präzision eben und parallel hergestellt werden, beim Rubin-Lasers beispielsweise durch Schleifen.

Zwischen den Stirnflächen befinden sich zahlreiche Atome im angeregten Zustand. Die Lichtwellen, die nicht achsparallel sind, gehen durch die seitliche Resonatorwand nach außen und sind für den Laser-Prozess bedeutungslos.

Die Lichtwellen, die senkrecht auf den Spiegel treffen, laufen im Medium mehrfach hin- und her, so daß sich **stehende Wellen** bilden. Diese besitzen genau die Energie, die Elektronen zu stimulierten Emissionen veranlaßt. Durch diese werden die Wellen verstärkt.

Zwischen der Wellenlänge λ und dem Abstand l der Spiegel besteht die Beziehung $l = k \cdot \lambda / 2$, wobei k eine sehr große natürliche Zahl ist.

Damit die Laserstrahlung den Resonator verlassen kann, muß einer der Spiegel teildurchlässig sein.

Beim Rubin-Laser beträgt der Energieunterschied $\Delta W (= W_2 - W_1)$ $\Delta W \approx 1,8 \text{ eV}$.
Dies entspricht einer Frequenz $f \approx 435 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ ($= 435 \text{ THz}$)
und einer Wellenlänge $\lambda \approx 689 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ ($= 689 \text{ nm}$).

9.2 Laserarten

Man unterscheidet die Laser nach Art des aktiven Mediums, in dem die Energie gepumpt wird.

Festkörperlaser

Neben dem Rubinlaser gibt es noch weitere Festkörperlaser (z.B. Neodym-Glaslaser oder Yttrium-Aluminium-Granat-Laser), bei denen jeweils Ionen in einem Kristallgitter angeregt werden.

Festkörperlaser werden beispielsweise zum Bohren sehr kleiner Löcher, Schneiden, Schmelzen und Verdampfen verwendet. Durch mehrfache Verstärkung können für den Bruchteil einer Sekunde ca. 1000 Millionen Kilowatt Leistung erzeugt werden.

Gaslaser

Gaslaser enthalten ein Edelgas, Metalldämpfe oder ein anderes Gas, das durch eine elektrische Hochspannung zu Entladungen angeregt wird.

Sie werden beispielsweise für energieaufwendige Schneidaufgaben (Kohlenstoffdioxidlaser) verwendet. Leistungsschwächere Gaslaser werden zum berührungsfreien Messen (z.B. Dickenkontrolle von Blechen) eingesetzt.

Halbleiterlaser

Die auch als **Dioden-Laser** bezeichneten Laser funktionieren mit einem Halbleiterkristall (z.B. Gallium-Arsenid). Diese lassen einen Stromfluß nur in einer Richtung zu. Halbleiterlaser können extrem klein (bis zur Größe eines Staubkorns) gebaut werden.

Die Hauptanwendung ist die Nachrichtenübertragung (Laserdioden zur Datenübermittlung in Lichtwellenleitern (Glasfasern)). Man findet sie zunehmend in elektronischem Zubehör (z.B. CD-Spieler).

9.3 Aus Wissenschaft und Technik

9.3.1 Laserdrucker

Die zu druckenden Daten (Zeichen und Grafiken) werden mit Hilfe eines Laserstrahls (Abb. 58) auf eine lichtempfindliche Schicht, die sich auf einer rotierenden Trommel befindet, projiziert (Fotoleiter- oder Bildtrommel).

An den vom Laser belichteten Stellen werden in der Entwicklerstation Tonerpartikel freigesetzt. Anschließend wird das Papier an der Fotoleitertrommel vorbeigeführt. Die Tonerpartikel auf der Fotoleitertrommel werden nun auf das Papier übertragen. Das Papier wird im Vorheizsattel auf mehrere 100 C erhitzt und läuft danach durch die Fixierwalzen, in denen der heiße Toner durch Druck in das Papier eingebrannt wird.

Die Fotoleitertrommel wird nun an der Entladestation entladen und an der Reinigungsstation gereinigt.

Nachdem die Fotoleitertrommel am Ladecorotron "vorbeigelaufen" ist, kann sie wieder neue Druckdaten aufnehmen.

Laserdrucker gehören zu den Seitendruckern, d.h. daß immer eine komplette Druckseite in den Druckerspeicher übertragen werden muß. Ein "Teilladen" einer Druckseite, wie z.B. bei Matrix- oder Tintendruckern, ist nicht möglich.

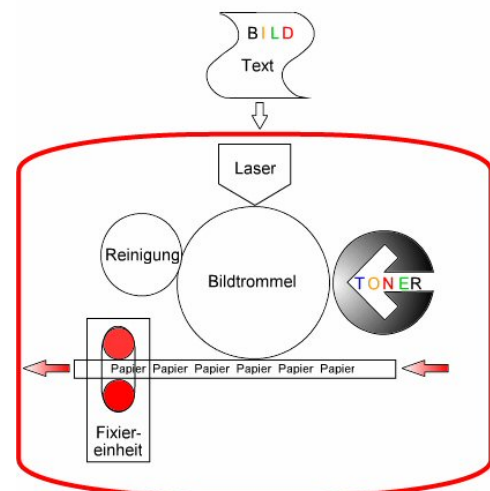


Abb.58: Funktionsschema Laserdrucker

9.3.2 CD-ROM-Laufwerk

Da die Daten auf einer CD („Compact Disc“) in digitaler Form (binär) gespeichert sind, besitzt eine CD eine viel bessere Abspielqualität als Datenträger, auf denen die Informationen analog gespeichert sind (z.B. Langspielplatte).

Die Toninformationen auf der CD sind unterhalb einer transparenten Schutzschicht, der mit einer reflektierenden Aluminiumschicht bedampften CD-Oberfläche, als digitale Signale in Form von einer dichten Folge mikroskopisch feiner **Pits** abgespeichert.

Als Pit bezeichnet man eine in diese CD eingebrannte Vertiefung mit einer Tiefe von $0,1 \mu\text{m}$, einer Breite von $0,5 \mu\text{m}$ und einer Länge von $1 \mu\text{m}$. Diese Pits werden entweder in die CD **gepreßt** (bei der Massenproduktion von CDs) oder sie werden von einem Laserstrahl **eingebrannt**, wie es bei CD-Brennern der Fall ist.

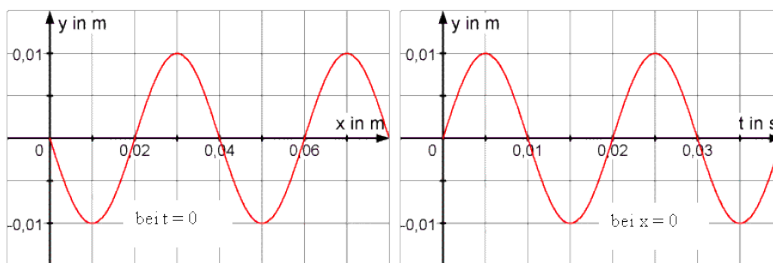
Die Pits sind wie auf einer Schallplatte spiralförmig angeordnet, laufen aber im Gegensatz zur LP von innen nach außen. Die Informationen, die auf eine CD gespeichert werden sollen, müssen vorher in eine 14- bis 16-stellige Binärkombination umgewandelt werden.

Beim Abspielen der CD werden die digitalen Informationen mit Hilfe eines **optoelektronischen Tonabnehmersystems** gelesen. Die Pits werden berührungslos mit einem fokussierten Lichtstrahl eines Halbleiterlasers abgetastet, so werden z.B. die gespeicherten Musikinformatoren über einen Digital-Analog-Wandler (D/A-Wandler) in Stereosignale rückgewandelt.

10 Zusatzaufgaben

Aufgabe 1

Gib die Wellengleichung für nachfolgend dargestellte Welle an.



Aufgabe 2

Eine Transversalwelle hat die Amplitude $0,20 \text{ m}$ und die Frequenz 175 Hz .

Das Teilchen im Koordinatenursprung hat zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ s}$ eine Auslenkung von 0 m . Zum Zeitpunkt t_1 hat dieses Teilchen eine Auslenkung von $0,10 \text{ m}$.

Nach welcher Zeit hat das Teilchen wieder eine Auslenkung von $0,10 \text{ m}$?

Aufgabe 3

In der Mittagspause findet an einem Ende einer 500 m langen Konstruktionshalle eine Explosion statt.

Einige Arbeiter dösen am anderen Hallenende, gegen die Wand gelehnt, ein Ohr an der Wand anliegend.

Andere Arbeiter rasten draußen, 500 m von der Explosion entfernt.

Die Explosion wird von den Arbeitern in der Halle $1,375 \text{ Sekunden}$ früher gehört als draußen ($c_{\text{Luft}} = 340 \text{ m/s}$).

- Berechne die Schallgeschwindigkeit des Hallenwerkstoffes.
- Wie lange hätten die Arbeiter draußen gebraucht, um die Explosion zu sehen?
- Welche Wellenlänge hat ein Ton von 800 Hz in dem Hallenwerkstoff?

Aufgabe 4

Eine Transversalwelle breitet sich in Richtung der positiven x -Achse mit der Geschwindigkeit $c = 2,5 \text{ m/s}$ aus. Sie beginnt zur Zeit $t = 0$ im Nullpunkt des Koordinatensystems. Die Frequenz beträgt $f = 50 \text{ Hz}$, die Amplitude 2 cm .

- Zeichne die Welle zu den Zeitpunkten $t_1 = 0,050 \text{ s}$ und $t_2 = 0,055 \text{ s}$.
- Zeichne die Welle an der Stelle $x = 3,75 \text{ cm}$.
- Ein zweite Transversalwelle mit gleicher Wellenlänge, Frequenz und Amplitude läuft der ersten um den Gangunterschied $\lambda/4$ voraus. Zeichne die zweite Welle an der Stelle $x = 3,75 \text{ cm}$.
- Konstruiere durch Addition die resultierende Welle.
- Stelle die Wellengleichungen dieser beiden Wellen auf.

Aufgabe 5

Ein mittig festgeklemmter Glasstab (Länge 30 cm) wird durch Reibung zu seiner Grundschiwingung erregt. Dabei versetzt er zunächst die Luft in einem Kundt-Rohr in Schwingungen. Ein zweiter Versuch wird mit Leuchtgas wiederholt.

Die Länge von 24 Knoten beträgt in Luft 49,0 cm, in Leuchtgas 74,8 cm.

Wie groß sind die Schallgeschwindigkeiten im Glas und im Leuchtgas? ($c_{\text{Luft}} = 340 \text{ m/s}$)

Aufgabe 6

Eine oben offene Orgelpfeife sendet den Kammerton „la“ (440 Hz) aus.

a) Wie groß ist die Luftsäule? (*Erg.: 0,386 m*)

b) Wie lang müssen Orgelpfeifen sein, damit sie das zwei Oktaven tiefer liegende „la“ (110 Hz) und die von der Netzwechselfspannung bekannten Brummtöne (50 Hz und 100 Hz) aussenden? (*Erg.: 1,545 m; 3,4 m; 1,7 m*)

c) Welche Töne würden die vier Orgelpfeifen aussenden, wenn sie oben geschlossen wären? (*Erg.: 220 Hz, 55 Hz; 25 Hz; 50 Hz*)