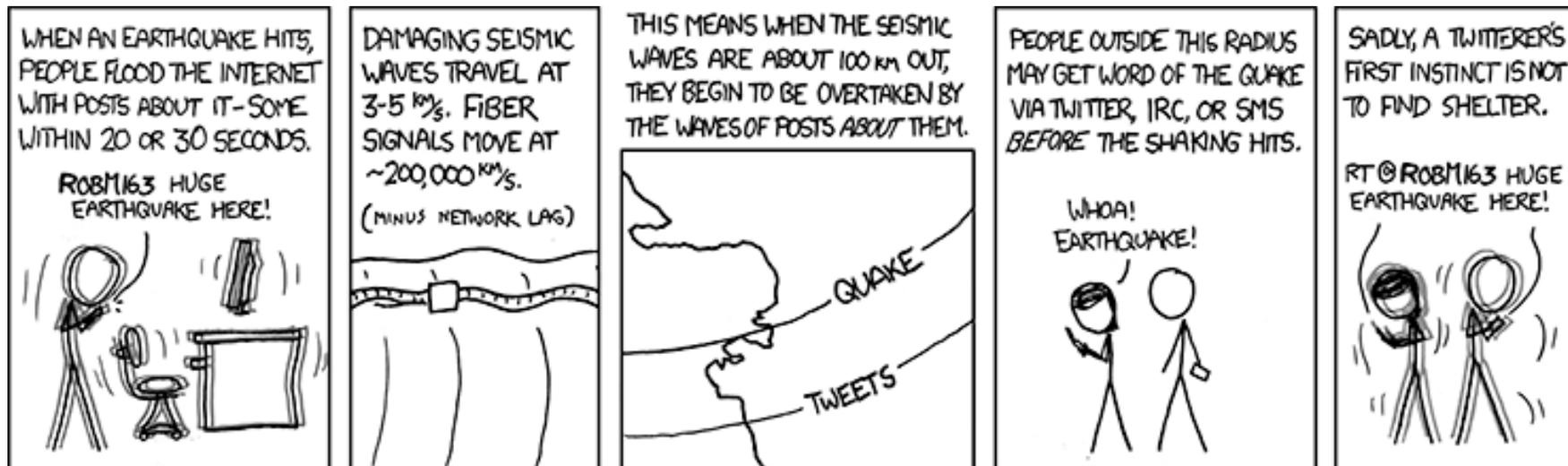


Wellen

Physik 1 für Chemiker und Biologen 10. Vorlesung



<https://xkcd.com/723/>

Heute: Wellen

- Longitudinal und Transversal
- Harmonische Wellen
- Superpositionsprinzip

Prof. Dr. Ralf Jungmann

Jungmann@physik.lmu.de

Prof. Dr. Jan Lipfert

Jan.Lipfert@lmu.de

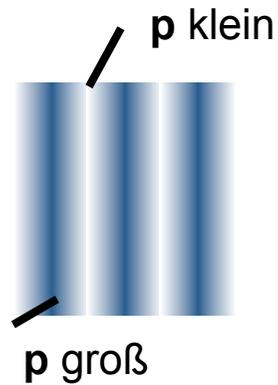
Beispiele für Wellen

Wasserwellen

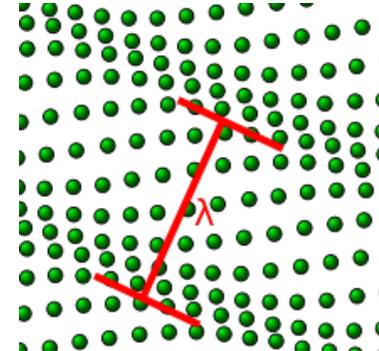


<https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserwelle>

Schallwellen

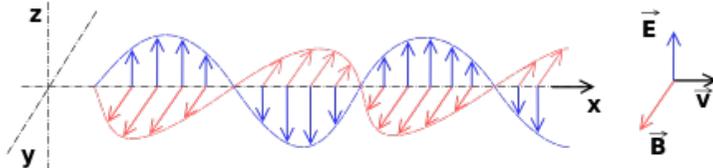


Phononen (Gitterschwingungen im Festkörper)

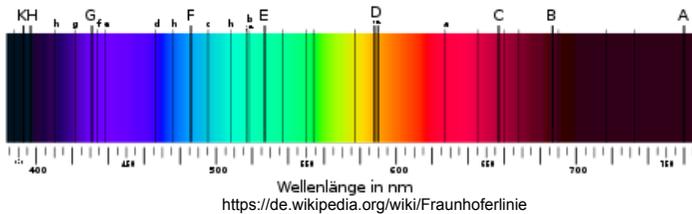


<https://de.wikipedia.org/wiki/Phonon>

Elektromagnetische Wellen



https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische_Welle



Quantenmechanische Wellen

Teilchen als Welle:
de Broglie-Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

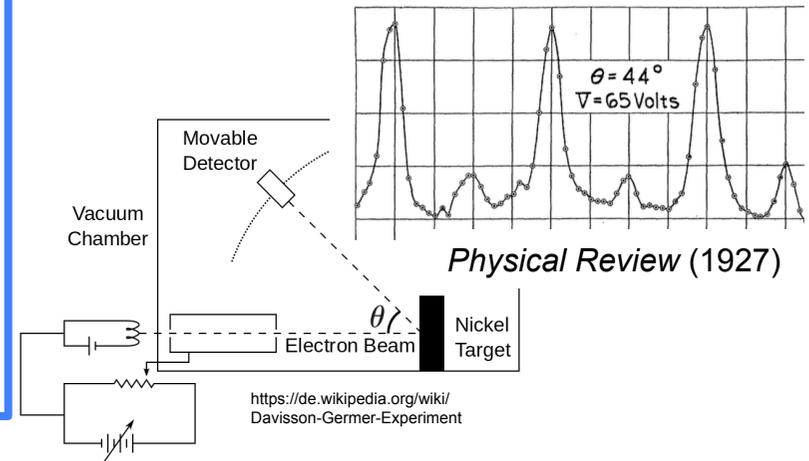
$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

(Planksches Wirkungsquantum) Louis-Victor de Broglie
(1892-1987)

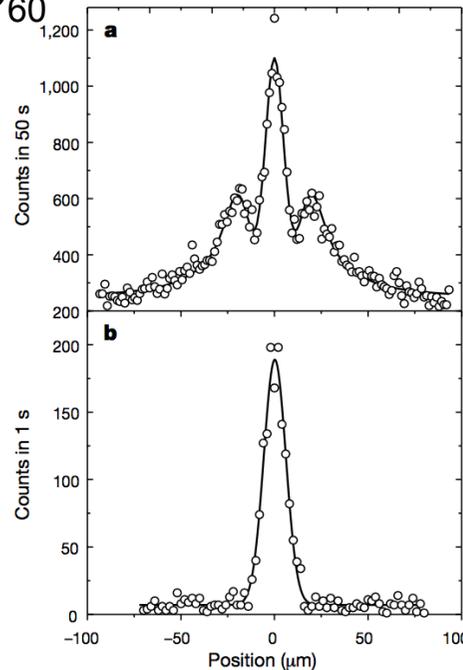
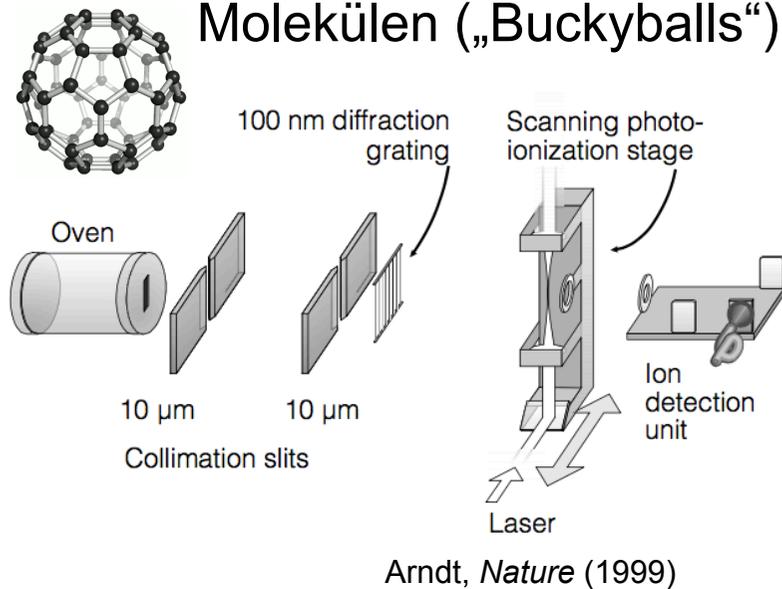


https://de.wikipedia.org/wiki/Louis_de_Broglie

Wellenverhalten von Elektronen:
Davisson & Germer (1927)



Interferenzexperiment mit C_{60}
Molekülen („Buckyballs“)



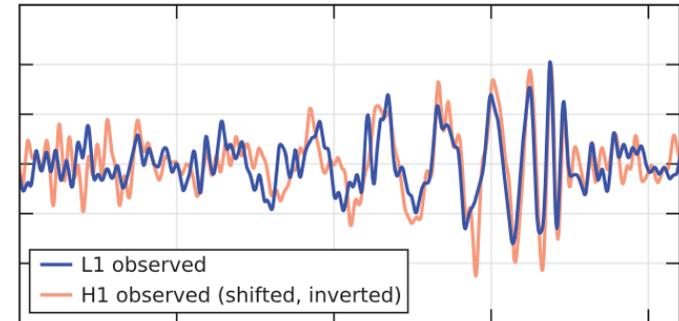
Gravitationswellen

Abbott et al., *Phys. Rev. Letters* (2016)

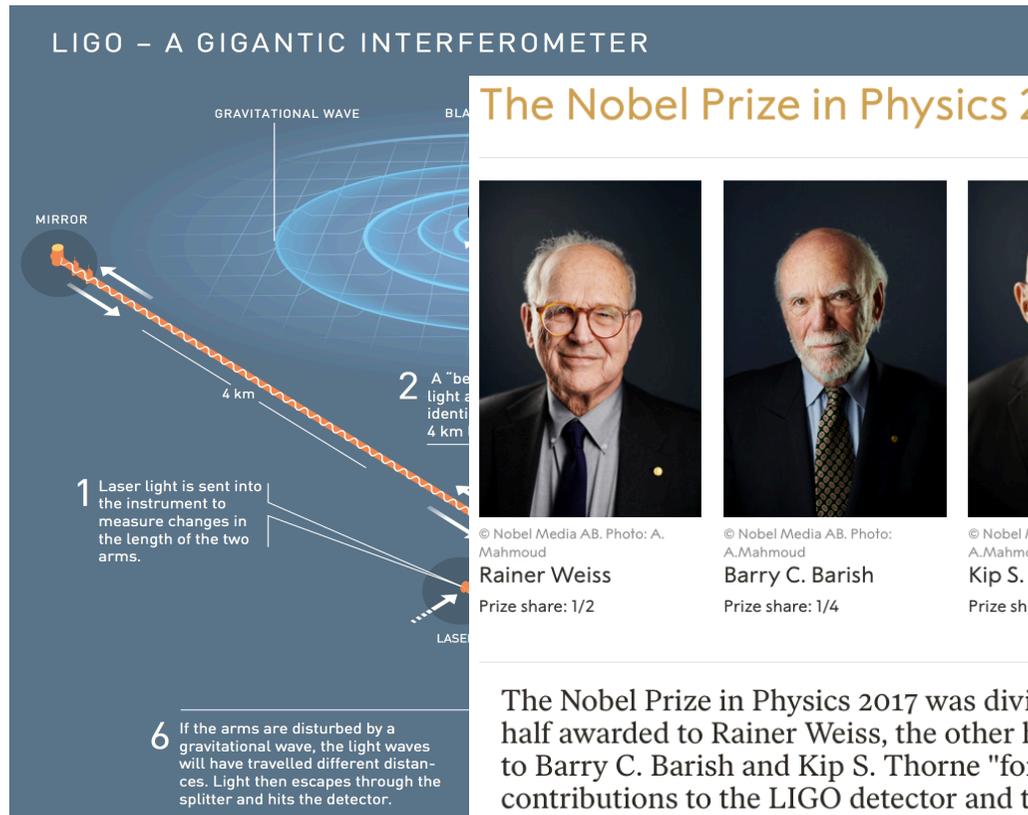
Gravitationswellen sind Schwingungen der Raumzeit

- Breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus
- 1916 Vorhersage durch Albert Einstein
- 2016 Erste Detektion durch den LIGO Detektor

Auslenkung



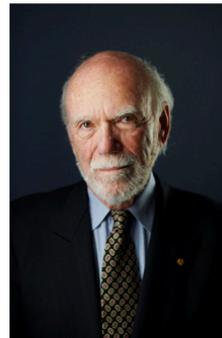
Zeit



The Nobel Prize in Physics 2017



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Rainer Weiss
 Prize share: 1/2



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Barry C. Barish
 Prize share: 1/4



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Kip S. Thorne
 Prize share: 1/4

The Nobel Prize in Physics 2017 was divided, one half awarded to Rainer Weiss, the other half jointly to Barry C. Barish and Kip S. Thorne "for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves."

Von der Schwingung zur Welle

Bisher: 1 Masse an 1 Feder

Jetzt: Viele (gleiche) Massen und Federn

Abstoßende Kraft zwischen Magnetrollen sorgt für nahezu harmonisches Kraftgesetz.



Longitudinale und transversale Wellen

Longitudinal

- Richtungen von Auslenkung und Ausbreitung sind parallel
- Einzig mögliche Wellenform in Gasen und Flüssigkeiten (z.B. Schallwellen)



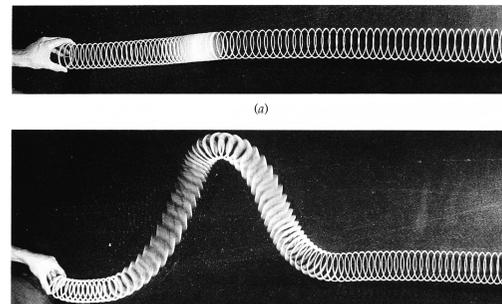
<http://footage.framepool.com/de/shot/337653757>
-schunkeln-dirndl-lederhose-theresienwiese

Transversal

- Richtungen von Auslenkung und Ausbreitung sind senkrecht
- Polarisation möglich
- Beispiele: elektromagnetische Wellen, Seilwellen, „optische“ Phononen im Festkörper



https://de.wikipedia.org/wiki/La_Ola

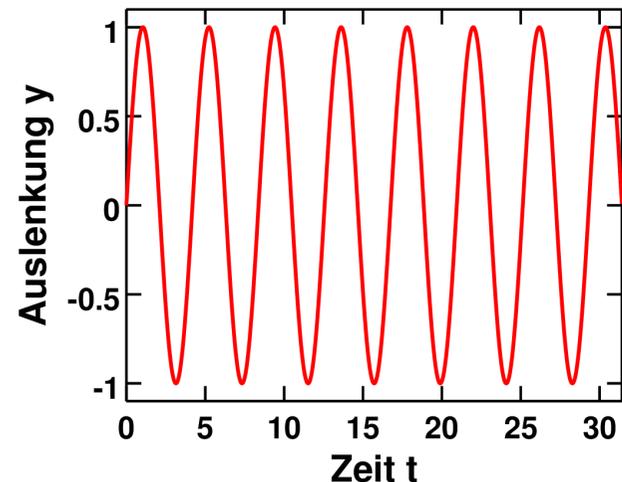
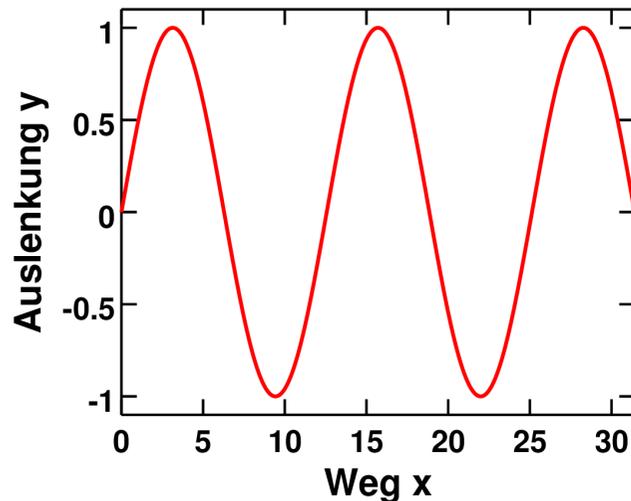


Aus P.A. Tipler, Physik

Wichtiger Spezialfall: Harmonische Wellen

Ein gespanntes Seil werde an einem Ende sinusförmig (bzgl. der Zeit) $y = \sin(\omega t)$ ausgelenkt. **Verhalten des Seiles (ohne Dämpfung):**

$$y(x, t) = A \cdot \sin(kx - \omega t + \phi)$$

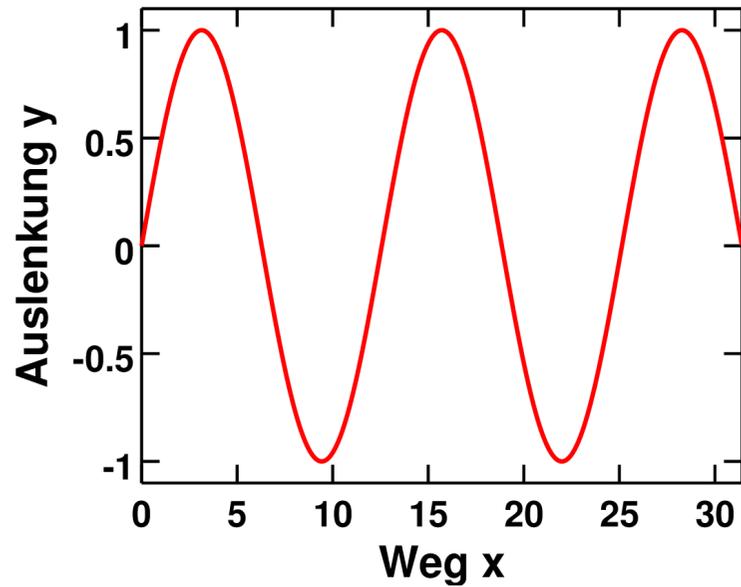


**Harmonisches
Verhalten bezüglich
 x und t !**

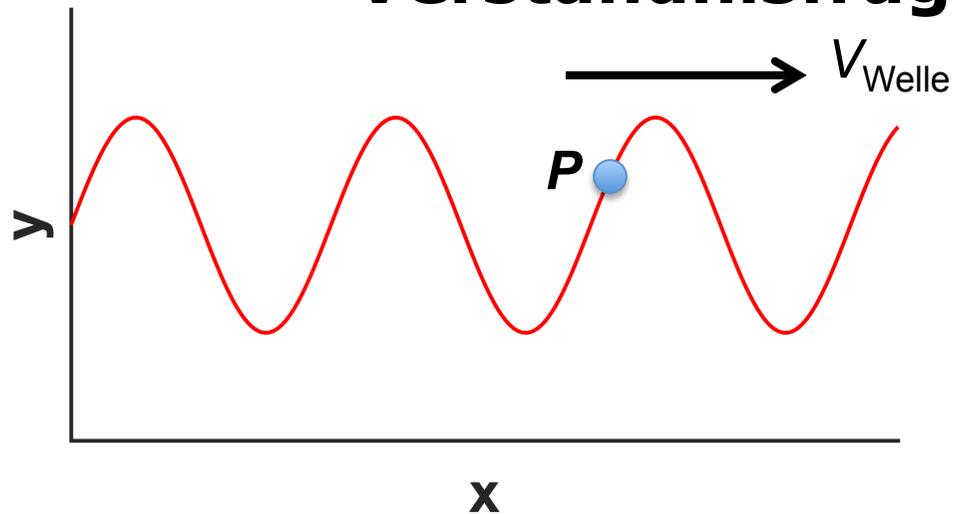
Experiment: Wellenkette

Geschwindigkeit einer Welle

$$y(x, t) = A \cdot \sin(kx - \omega t + \phi)$$

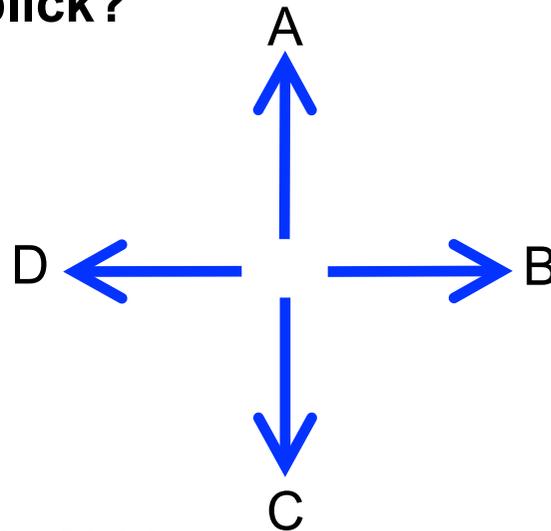


Verständnisfrage Wellen 1



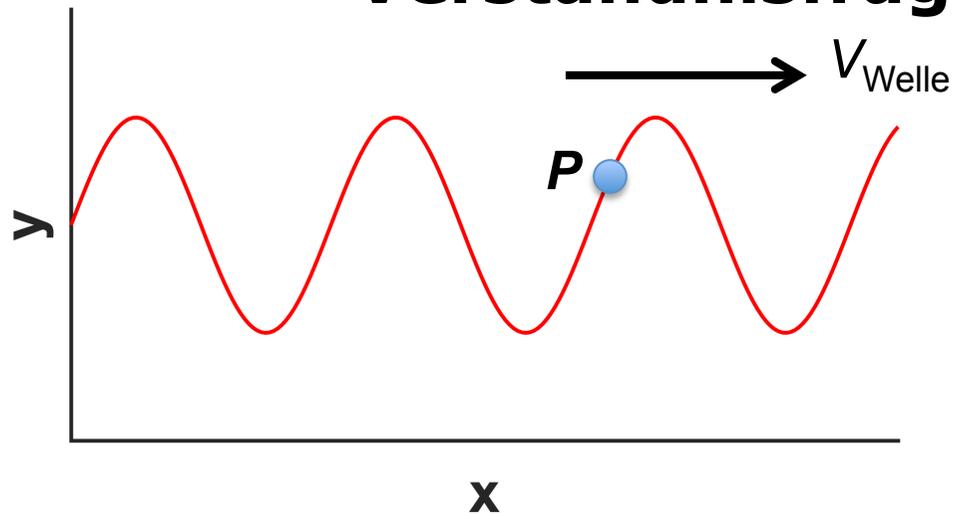
Der Graph zeigt den Schnappschuss einer Seilwelle, die sich nach rechts ausbreitet. Punkt P ist mit Farbe markiert.

In welche Richtung zeigt die Geschwindigkeit des markierten Punktes P in diesem Augenblick?



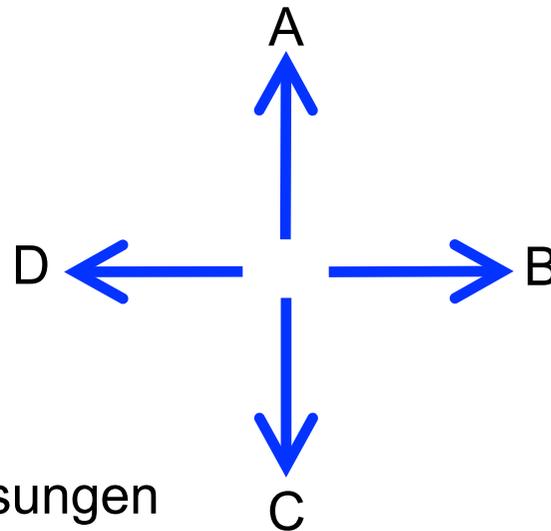
E) Keine dieser Lösungen

Verständnisfrage Wellen 2



Der Graph zeigt den Schnappschuss einer Seilwelle, die sich nach rechts ausbreitet. Punkt P ist mit Farbe markiert.

In welche Richtung zeigt die **BESCHLEUNIGUNG** des markierten Punktes P in diesem Augenblick?



E) Keine dieser Lösungen

Wellengleichung und Wellengeschwindigkeit

Allgemein gehorchen Wellen der Gleichung:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

(Wellengleichung oder
d'Alembert Gleichung)

Die Phasengeschwindigkeit der Welle c hängt von den physikalischen Eigenschaften des Systems ab:

Seilwellen:

Schallwellen:

$$\text{Allgemein: } c^2 = \frac{\text{Elastische Eigenschaft}}{\text{Trägheitseigenschaft}}$$



https://de.wikipedia.org/wiki/Jean-Baptiste_le_Rond_d'Alembert

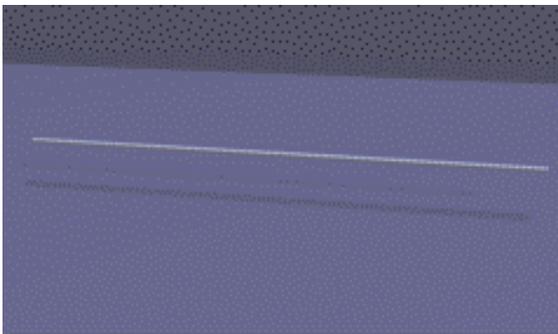
Jean Baptiste
le Rond d'Alembert
(1717-1783)

Superposition von Wellen

Superpositionsprinzip: Wenn sich Wellen im gleichen Medium ausbreiten (und sich das Medium linear verhält), ergibt sich eine **resultierende Welle** (oder **Gesamtwelle**), die der Summe der einzelnen Wellen entspricht.



https://en.wikipedia.org/wiki/File:Anas_platyrhynchos_with_ducklings_reflecting_water.jpg



https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Standing_waves1.gif

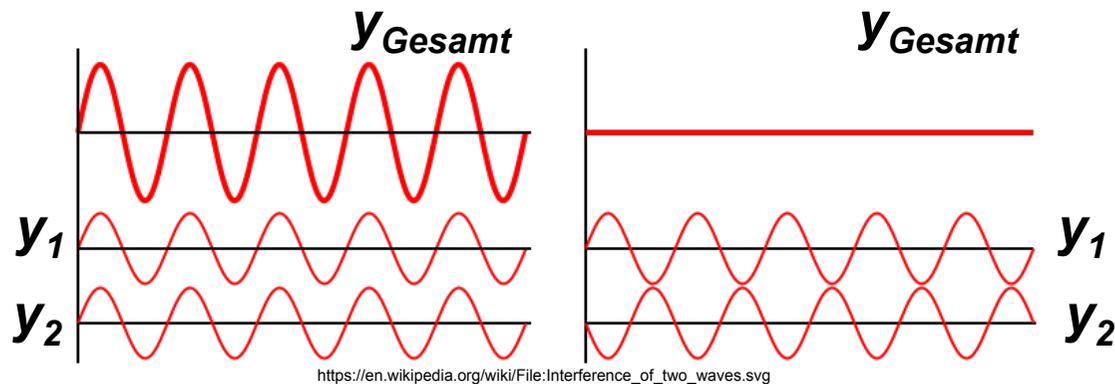
Aus der Linearität der Wellengleichung

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

folgt, dass wenn y_1 und y_2 Lösungen sind, $y_{\text{Gesamt}} = y_1 + y_2$ ebenfalls eine Lösung ist!

Superposition von Wellen gleicher Amplitude, Frequenz und Richtung mit Phasenunterschied ϕ

Häufiger Fall in der Optik, z.B. in einem Interferometer



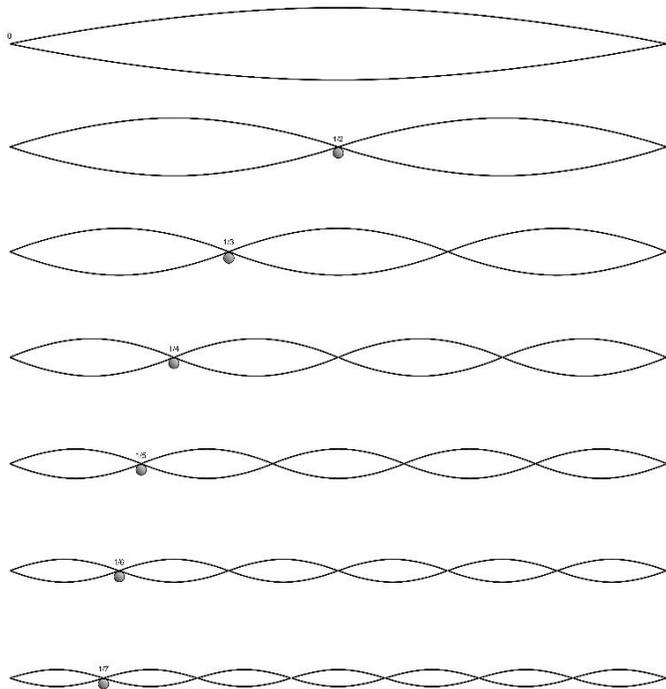
Stehende Wellen

Superposition von Wellen gleicher Frequenz & entgegengesetzter Richtung
(z.B. bei schwingenden Saiten, durch Reflektion an einem festen Ende)

Experiment: Stehende Welle an Wellenkette

Oberschwingungen und Moden

Erlaubte Frequenzen einer eingespannten Saite (feste Enden!) ergeben die *Schwingungsmoden*:



Experiment: Seilwellen – Grund und
Oberschwingungen

Verständnisfrage Moden



https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Guitard_Epiphone_03.jpg

Ein Saiteninstrument spielt ein a' (440 Hz), wenn man es zupft.

Wenn man den Finger genau auf die Mitte der Saite legt und wieder zupft, welchen Ton hört man nun?

- A) Eine Oktave höher (880 Hz)
- B) Eine Oktave tiefer (220 Hz)
- C) Den gleichen Ton (440 Hz)
- D) Keinen der oben genannten Töne.

Schwebungen

Interferenz von Wellen mit ähnlicher (aber nicht identischer) Frequenz:

Zur Erinnerung:

$$\sin(\alpha) + \sin(\beta) = 2 \cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right) \sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)$$

Experiment: Schwebung mit Orgelpfeifen

Fourieranalyse

Analysiere Schwingungen, die aus verschiedenen Frequenzen zusammengesetzt sind: **$y(t)$ beliebiger Form, das sich nach Periode T wiederholt**



https://de.wikipedia.org/wiki/Joseph_Fourier

Joseph Fourier
(1768-1830)

Experiment: Fourieranalyse mit Lautsprecher

Interferenz von Wellen

Huygenssches Prinzip: Jeder Punkt einer Wellenfront kann als Ausgangspunkt einer neuen Welle, einer **Elementarwelle**, betrachtet werden.

Die Elementarwellen sind kugelförmig (kreisförmig in 2D) und die neue Lage der Wellenfront ergibt sich durch Überlagerung (Superposition) sämtlicher Elementarwellen.



https://de.wikipedia.org/wiki/Christiaan_Huygens

Christiaan
Huygens
(1629-1695)



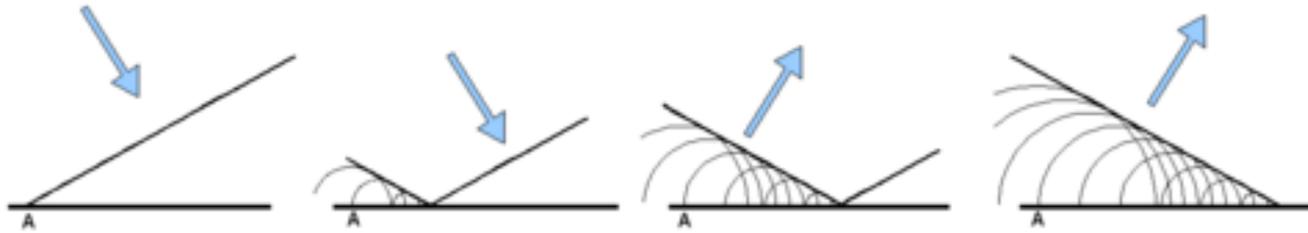
Experiment: Wellenwanne –
Elementarwellen

28.01.2019

Prof. Dr. Jan Lipfert

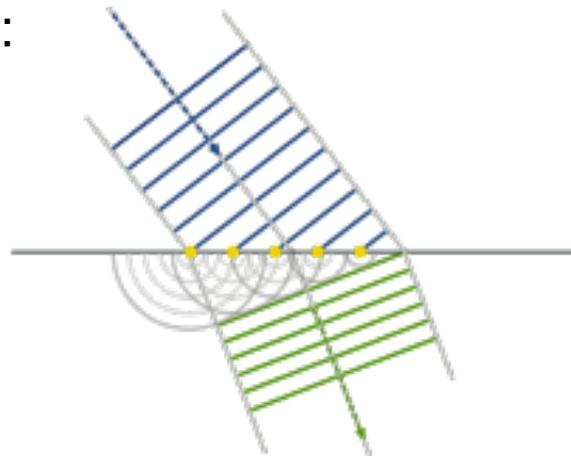
Interferenz von Wellen

Reflexion à la Huygens



https://de.wikipedia.org/wiki/Huygensches_Prinzip

Brechung (zwei Medien mit Geschwindigkeiten c_1 und c_2) à la Huygens:

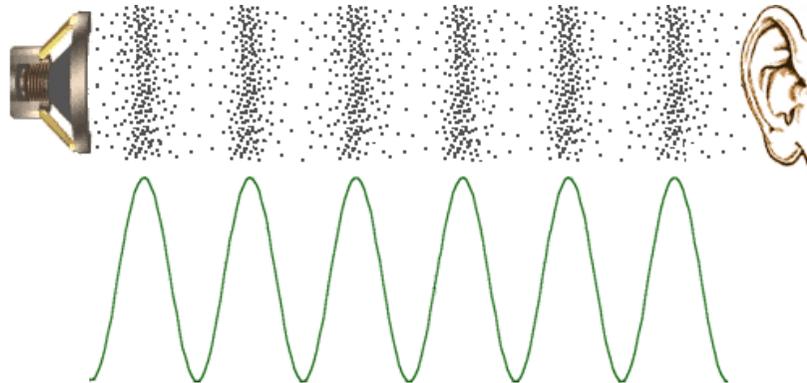


https://de.wikipedia.org/wiki/Huygensches_Prinzip

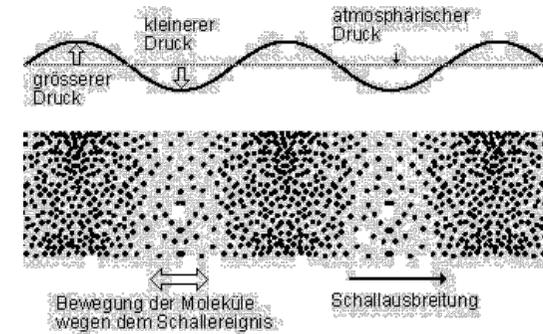
Experiment: Wellenwanne – Spalt und Spiegel

Schallwellen

Longitudinale Wellen; Druckschwankungen in Gasen & Flüssigkeiten:



<https://scienceconceptions.wikispaces.com/Do+the+Wave>

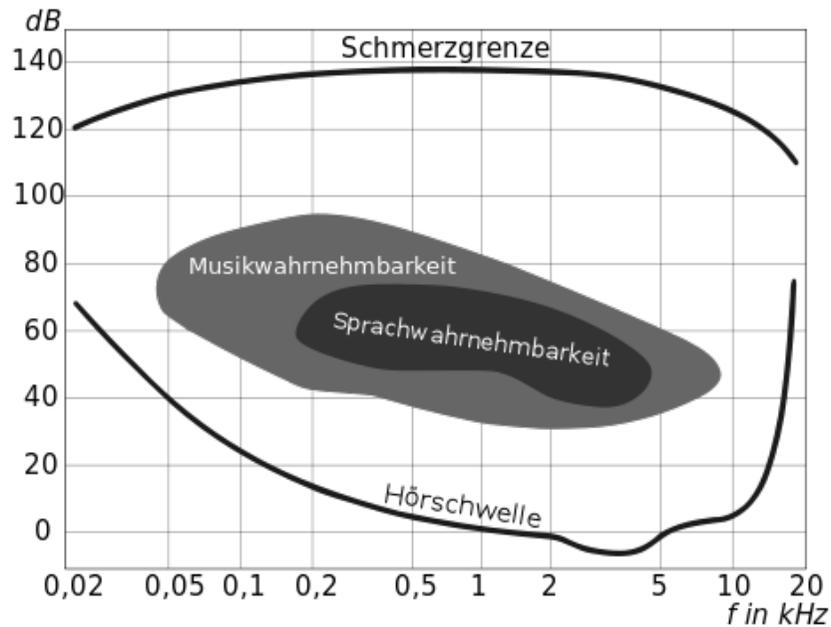


www.kemt.fei.tuke.sk/Predmety/KEMT320_EA/_web/Online_Course_on_Acoustics

Schallgeschwindigkeit

Menschlicher Hörbereich

Dezibel



<https://de.wikipedia.org/wiki/Hörfläche>

Experiment: Hörschwelle bei verschiedenen Frequenzen

Zusammenfassung: Wellen

Wellen: Sich räumlich und zeitlich ausbreitende Schwingungen

Allgemein: $y(x, t) = f(x \pm ct)$

Wichtiger Spezialfall: Harmonische Wellen

$$y(x, t) = A \sin(kx \pm \omega t + \phi)$$

Wellenlänge: λ

Wellenzahl: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Periode: T

Kreisfrequenz: $\omega = \frac{2\pi}{T}$

Frequenz: $f = \frac{1}{T}$

Phasengeschwindigkeit: $c = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$

Zusammenfassung: Wellengleichung und Superposition

Wellengleichung:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

Auslenkung: $y(x,t)$

Phasengeschwindigkeit: c

Superpositionsprinzip:

Wellen können sich überlagern und die resultierende Welle ist die Summe der Einzelwellen (so lange das Medium linear reagiert). Die Summe von Lösungen der Wellengleichung ist wieder eine Lösung der Wellengleichung.

- Wellen mit Phasenverschiebung:
Konstruktive / destruktive Interferenz
- Gegenläufige Wellen: **Stehende Wellen**
- Ähnliche Frequenzen: **Schwebungen**
- Zerlegung von Wellen in verschiedene Frequenzkomponenten: **Fourier- Analyse**
- Zerlegung von Wellen in Elementarwellen:
Huygenssches Prinzip