

## Letzte Stunde

- Harmonische Wellenfunktion für periodische, harmonische Wellen  
$$u(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$$
  - Wellenzahl  $k = 2\pi/\lambda$
  - Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 2\pi/\nu$
- Ausbreitungsgeschwindigkeit / Phasengeschwindigkeit einer Welle  $v = \nu \lambda = \omega/k$ 
  - Longitudinale Wellen im Festkörper  $v_L = \sqrt{E/\rho}$
  - In Gasen (immer longitudinal)  $v_{\text{Schall}} = \sqrt{K/\rho_0} = \sqrt{c_p/c_v \cdot p/\rho_0}$
- Schallgeschwindigkeit in Luft  $v = 330 \text{ m/s}$  (bei  $0^\circ\text{C}$ )

## Heute

- 9.3 Energietransport durch Wellen, Lautstärke
- 9.4 Stehende Wellen

<http://www.ep1.rub.de/lehre/veranstaltungen/ws0910/physikcbg/>

## 9.3 Energietransport durch Wellen

Wellenfunktion  $u(x, t) = A \cdot \sin(\omega x - \omega t)$

Kinetische Energie:  $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \Delta m \dot{u}^2 = \frac{1}{2} \Delta m A^2 \omega^2 \cos^2(\omega x - \omega t)$

im zeitl. Mittel

$$\langle E_{\text{kin}} \rangle = \frac{1}{4} \Delta m A^2 \omega^2$$

Potenzielle Energie:

Arbeit gegen die rückstellende Kraft  
( $F = -c u$ , Hookesche Gesetz)

$$E_{\text{pot}} = - \int F du = \frac{1}{2} c u^2 = \frac{1}{2} c A^2 \underbrace{\sin^2(\omega x - \omega t)}_{\text{zeitliches Mittel} = \frac{1}{2}}$$

$$\omega^2 = \frac{c}{\Delta m}$$

$$\langle E_{\text{pot}} \rangle = \frac{1}{4} \Delta m \omega^2 A^2$$

$$\langle \Delta E \rangle = \langle E_{\text{kin}} \rangle + \langle E_{\text{pot}} \rangle = \frac{1}{2} \Delta m A^2 \omega^2$$

mit  $\Delta m = \rho \Delta V$

$$\langle \Delta E \rangle = \frac{1}{2} \rho \Delta V \cdot \omega^2 A^2 \quad \text{max. Amplitude}$$

Intensität einer Welle

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

$$I = \frac{\text{mittl. Leistung}}{\text{Fläche}} = \frac{\langle P \rangle \cdot \Delta x}{\Delta V} = \frac{\langle \Delta E \rangle \cdot \Delta x / \Delta t}{\Delta V}$$

$$\langle \Delta E \rangle = \frac{1}{2} \rho \Delta V \cdot \omega^2 A^2$$

$$= \frac{\langle \Delta E \rangle}{\Delta V} V$$

$$I = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 \cdot v$$

Intensität

gilt auch für Schallwellen

$$A = P_{\max} / (\rho \cdot \omega \cdot v) \quad ; \quad I = \frac{1}{2} \frac{P_{\max}^2}{\rho v}$$

Angabe der Lautstärke  
(Schallpegel)

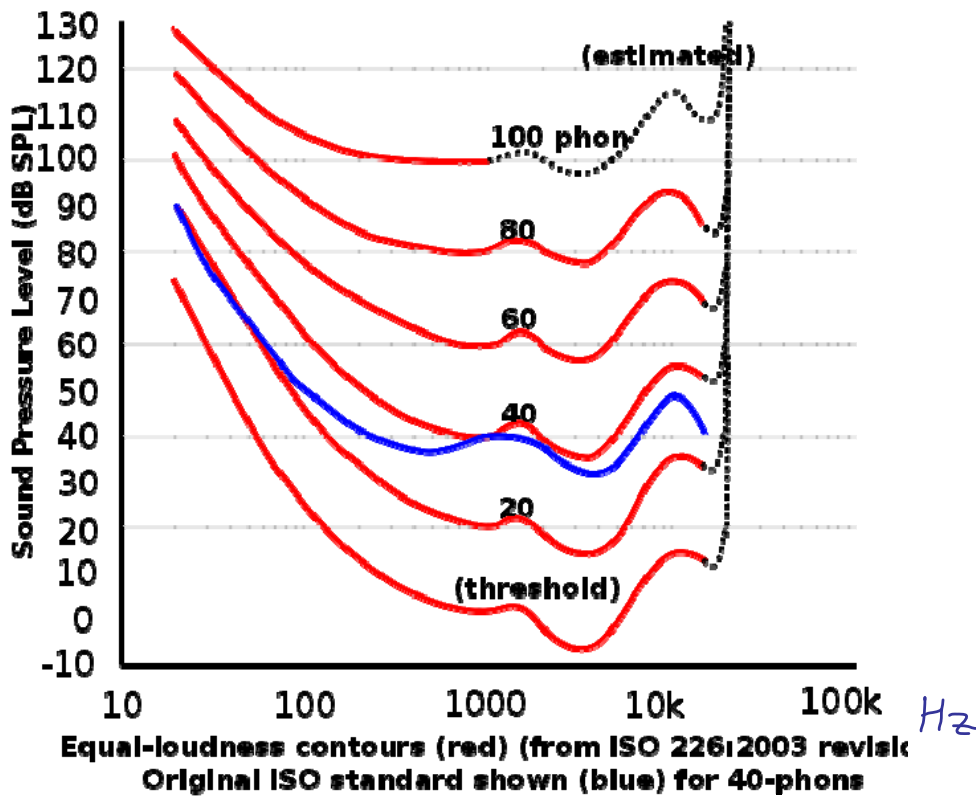
$$= 10 \text{ dB} \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

mit  $I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$  Hörschwelle

Schmerzschwelle  $10 \text{ W/m}^2$   
 $10 \text{ dB} \cdot \log \frac{10}{10^{-12}} = 130 \text{ dB}$

↑ dezi  
↓ Bel  
↑ 10er Logarithmus  
dB dezi

Schallquellen Beispiele mit Abstand	Schalldruck- pegel $L_p$ in dB	Schalldruck $p$ in $N/m^2 = Pa$	Schall-Intensität $I$ in $W/m^2$
Düsenflugzeug in 30 m Entfernung	140	200	100
Schmerzschwelle, Presslufttham.	130	63,2	10
Starten ein. Düsenflugzeugs, 60 m	120	20	1
Baulärm, 3 m	110	6,3	0,1
Disco, 1 m vom Lautsprecher	100	2	0,01
Schwertransporter, 15 m entfernt	90	0,63	0,001
Rand einer Verkehrsstraße 5 m	80	0,2	0,0001
Staubsauger in 1 m Entfernung	70	0,063	0,00001
Normale Sprache in 1 m Abstand	60	0,02	0,000001
Ruhiges Büro	50	0,0063	0,0000001
Ruhige Bibliothek	40	0,002	0,00000001
Leises flüstern (5 m)	30	0,00063	0,000000001
Blätterrascheln	20	0,0002	0,0000000001
Normales Atmen	10	0,000063	0,00000000001
Hörschwelle	0	0,00002	0,000000000001

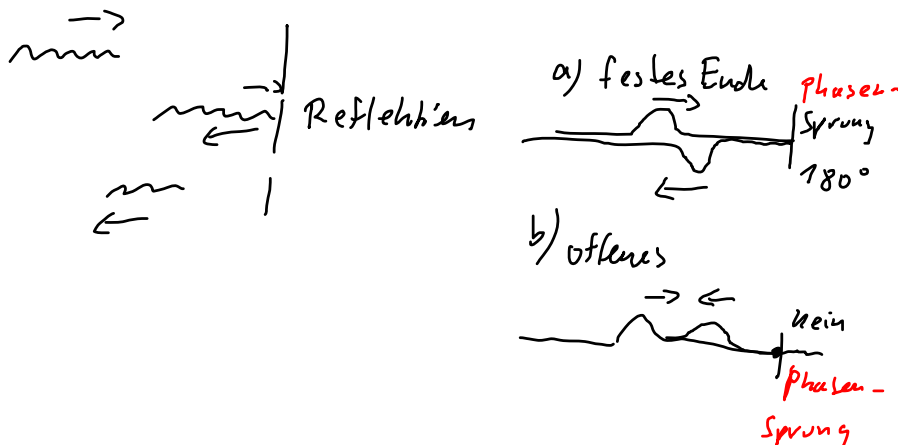


## 9.4 Stehende Wellen

Überlagerung von Wellen

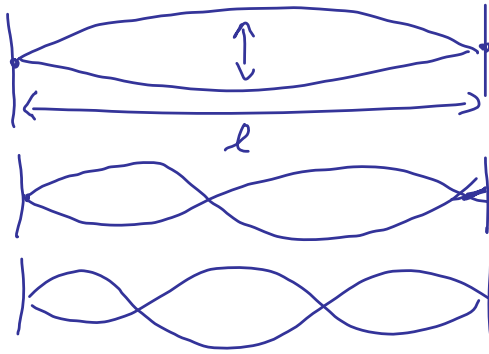
Superpositionsprinzip:

Wenn zwei oder mehr Wellen sich überlagern, ergibt sich die resultierende Welle als algebraische Summe der einzelnen Auslenkungen.



# Stehende Wellen

Bsp. Saite



Grundfrequenz  
Eigenfrequenz

$$l = \frac{\lambda}{2}$$

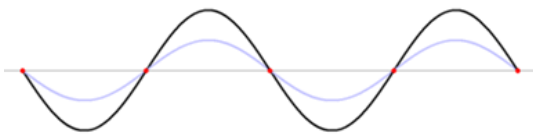
Oberschwingungen

$$l = n \frac{\lambda_n}{2}$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\nu_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{2l/n} = \frac{v}{2l} \cdot n$$

offenes Ende



Stehende Welle (schwarz)  
mit einlaufender und auslaufender Welle

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Standing\\_wave\\_2.gif](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Standing_wave_2.gif)

Luft-  
Säulen



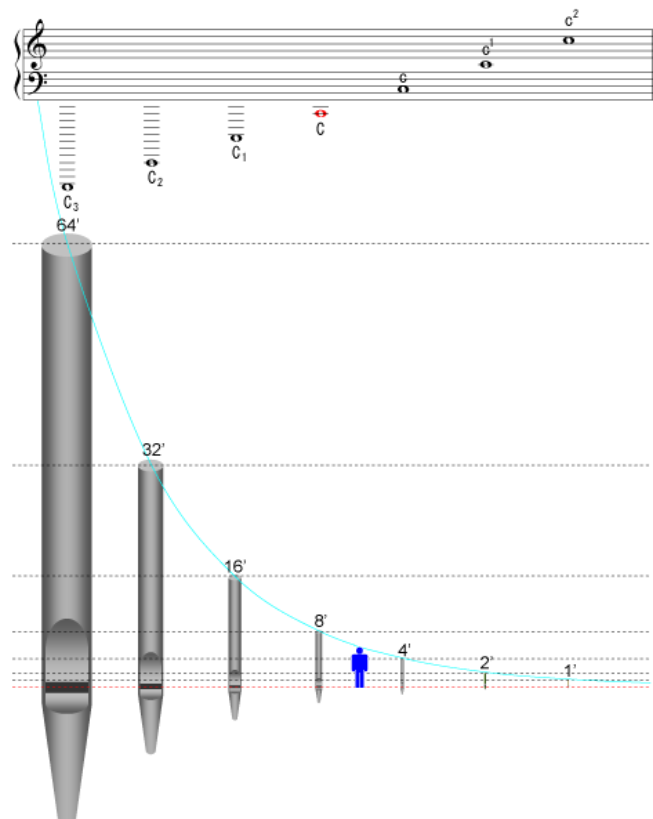
$$l = n \frac{\lambda}{2}$$

$$n = 1, 2, 3$$



$$l = n \frac{\lambda}{4}$$

$$n = 1, 3, 5$$



2011

# Zusammenfassung

- Die Energie einer harmonischen Welle ist proportional zum Quadrat ihrer Amplitude
- Intensität  $I$  einer Welle: mittlere Leistung pro Fläche
- Schallintensitätspegel (Einheit dB):  $10 \text{ dB} \log \frac{I}{I_0}$ 
  - $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  (Hörschwelle)
- Superpositionsprinzip für Wellen (Addition der Amplituden)
- Reflexion von Wellen
  - $180^\circ$  Phasensprung bei festem Ende
  - kein Phasensprung bei offenem Ende
- Stehende Wellen möglich, wenn räumlich begrenzt (Länge  $l$ )
  - Wellenlängen  $\lambda = 2l/n$  bzw.  $\lambda = 4l/(2n-1)$  mit  $n = 1, 2, 3, \dots$