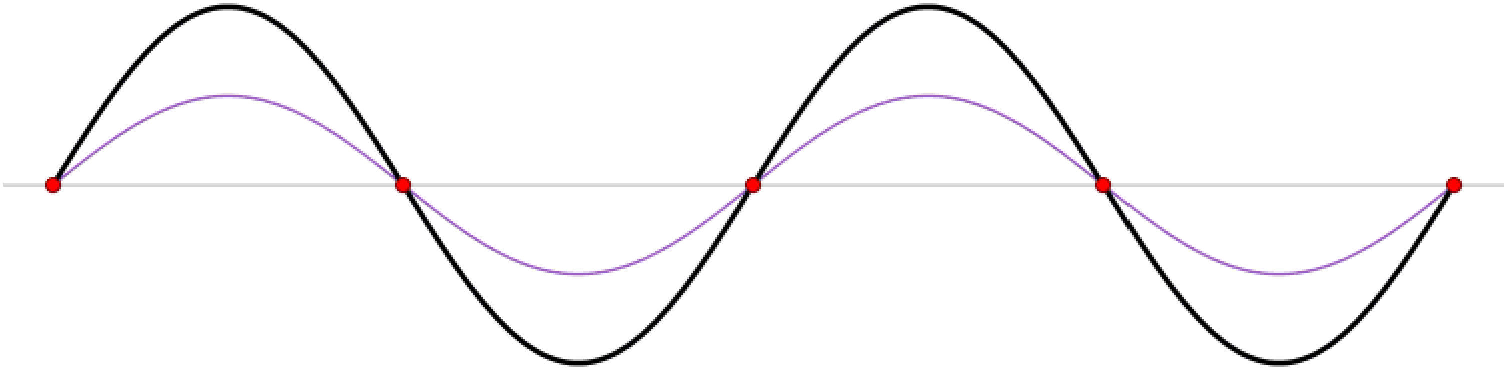
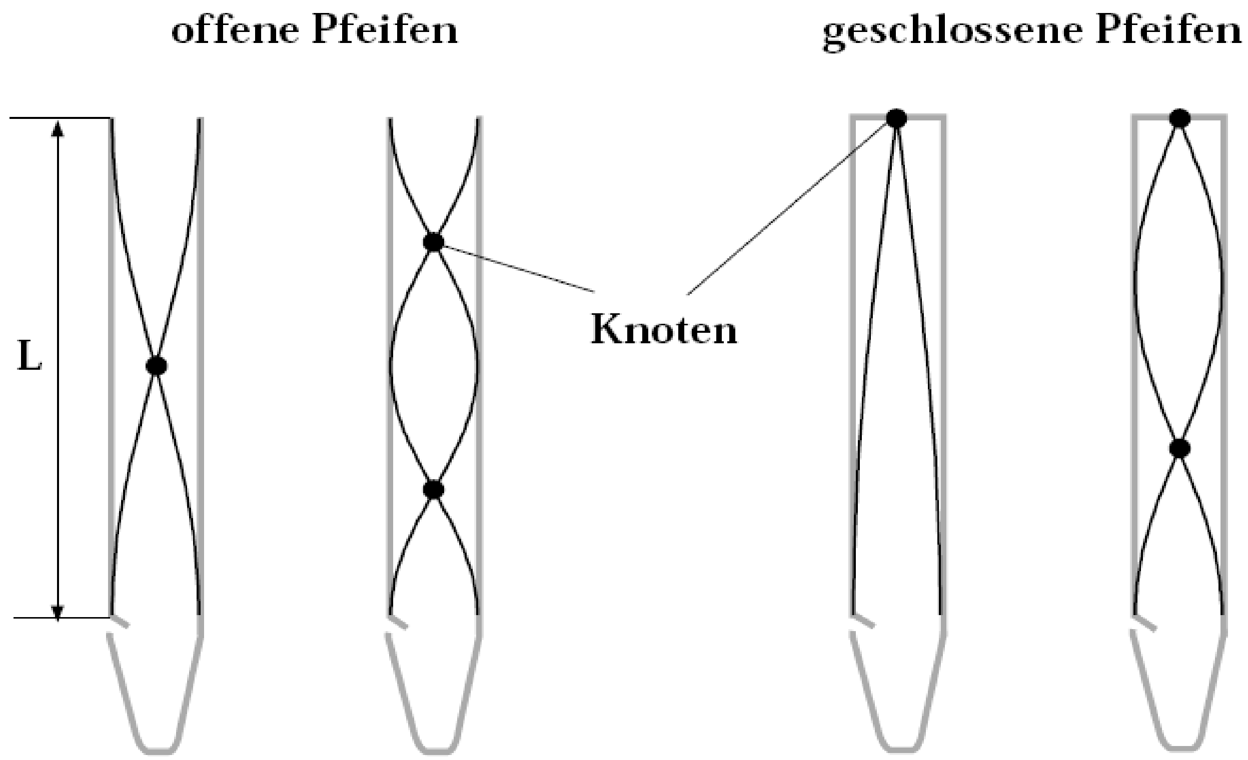
Introduction to Physics I

For Biologists, Geoscientists, & Pharmaceutical Scientists



• stehende Wellen in Luftsäulen (Pfeifen)

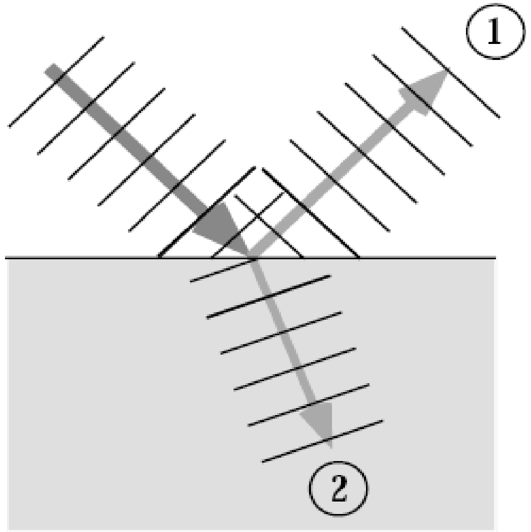
Betrachten Auslenkungen der Luftmoleküle



9.6 Wellen an Grenzflächen

Trifft eine Welle (z. B. Schallwelle) auf eine Grenzfläche (z. B. Luft - Wasser), dann wird die Welle in zwei Anteile aufgeteilt:

- **reflektierte Welle (1)**
- **gebrochene Welle (2)**



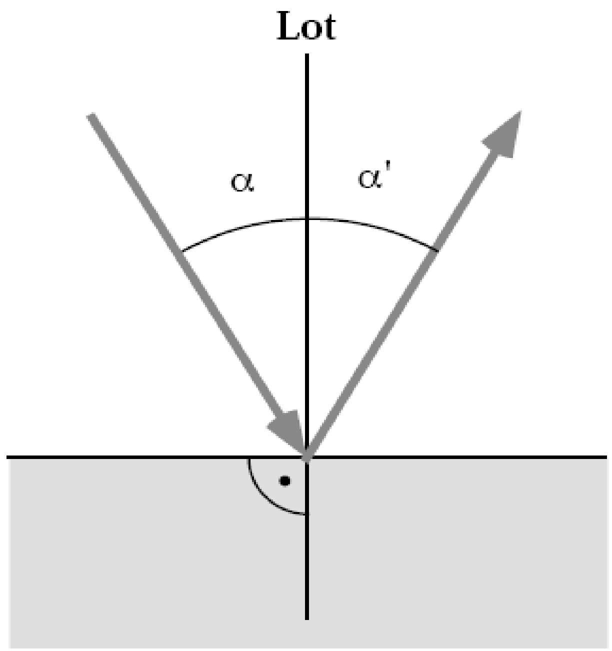
Wellenreflexion

Reflexionsgesetz:

Der Reflexionswinkel α' ist gleich dem Einfallswinkel α

$$\alpha' = \alpha$$

Einfallender Strahl, reflektierter Strahl und Lot liegen in einer Ebene.



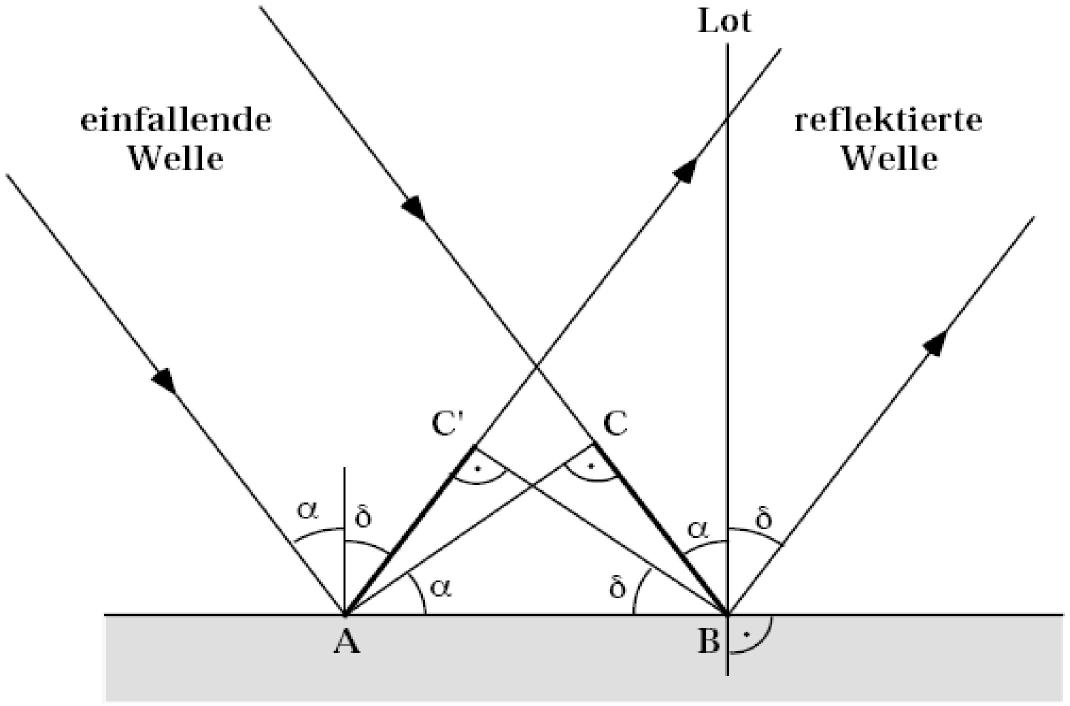
Wellenreflexion

Begründung:

- Die Richtung der reflektierten Welle α' ergibt sich nach dem Huygensschen Prinzip.

- In der Zeit, in der sich die einfallende Welle von C $\rightarrow$ B fortbewegt, breitet sich von A eine Kugelwelle mit dem Radius $\overline{AC'}$ (= $\overline{BC}$) aus. Die Richtung der Wellenfront der reflektierten Welle ergibt sich durch Tangentenbildung von B aus an die Kugelwelle. Dadurch ergibt sich das Dreieck ABC' welches kongruent zu ABC ist. Somit ist

$$\alpha = \delta$$



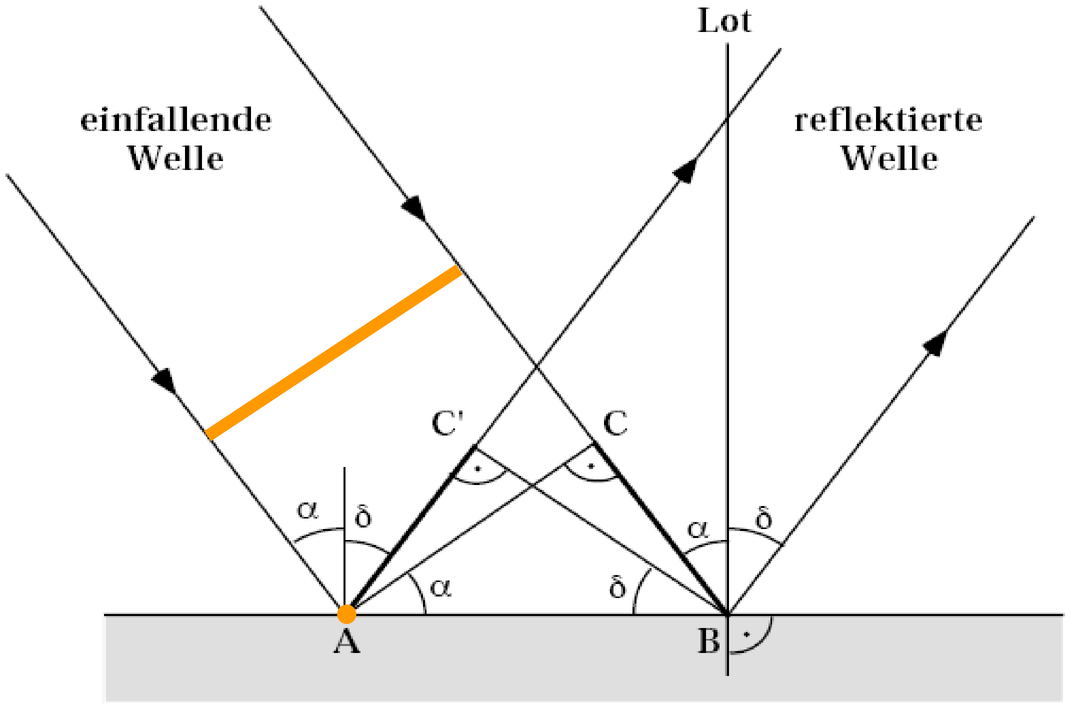
Wellenreflexion

Begründung:

- Die Richtung der reflektierten Welle α' ergibt sich nach dem Huygensschen Prinzip.

- In der Zeit, in der sich die einfallende Welle von C $\rightarrow$ B fortbewegt, breitet sich von A eine Kugelwelle mit dem Radius $\overline{AC'}$ (= $\overline{BC}$) aus. Die Richtung der Wellenfront der reflektierten Welle ergibt sich durch Tangentenbildung von B aus an die Kugelwelle. Dadurch ergibt sich das Dreieck ABC' welches kongruent zu ABC ist. Somit ist

  $\alpha = \delta$



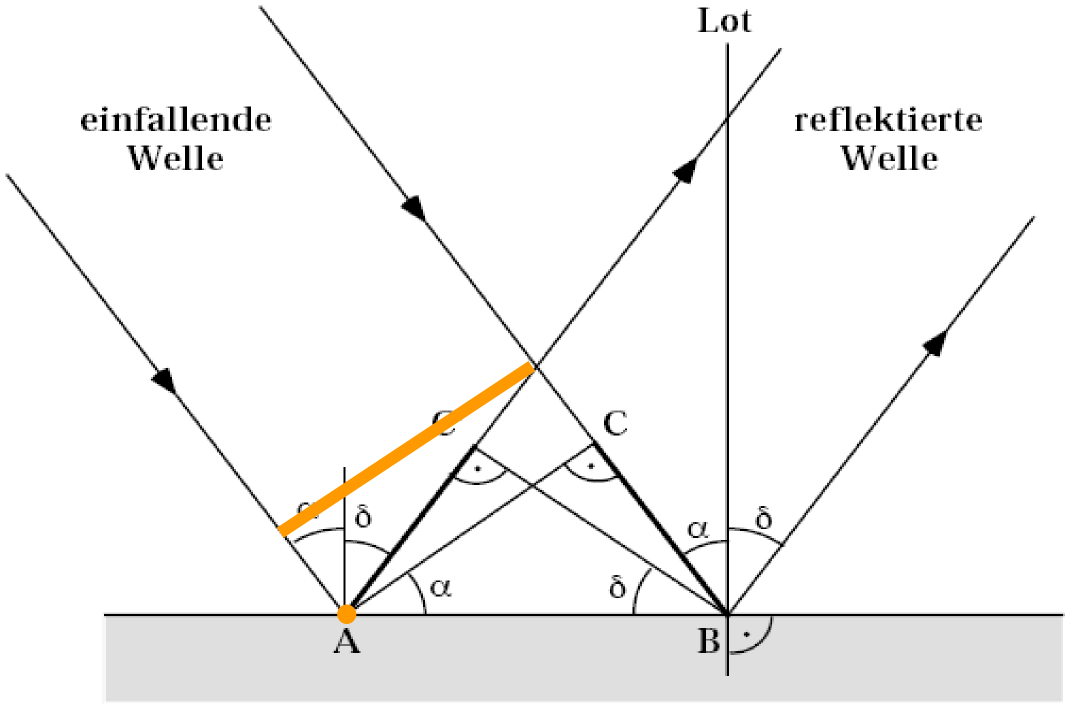
Wellenreflexion

Begründung:

- Die Richtung der reflektierten Welle α' ergibt sich nach dem Huygensschen Prinzip.

- In der Zeit, in der sich die einfallende Welle von $C \rightarrow B$ fortbewegt, breitet sich von A eine Kugelwelle mit dem Radius $\overline{AC'}$ (= $\overline{BC}$) aus. Die Richtung der Wellenfront der reflektierten Welle ergibt sich durch Tangentenbildung von B aus an die Kugelwelle. Dadurch ergibt sich das Dreieck ABC' welches kongruent zu ABC ist. Somit ist

$\alpha = \delta$



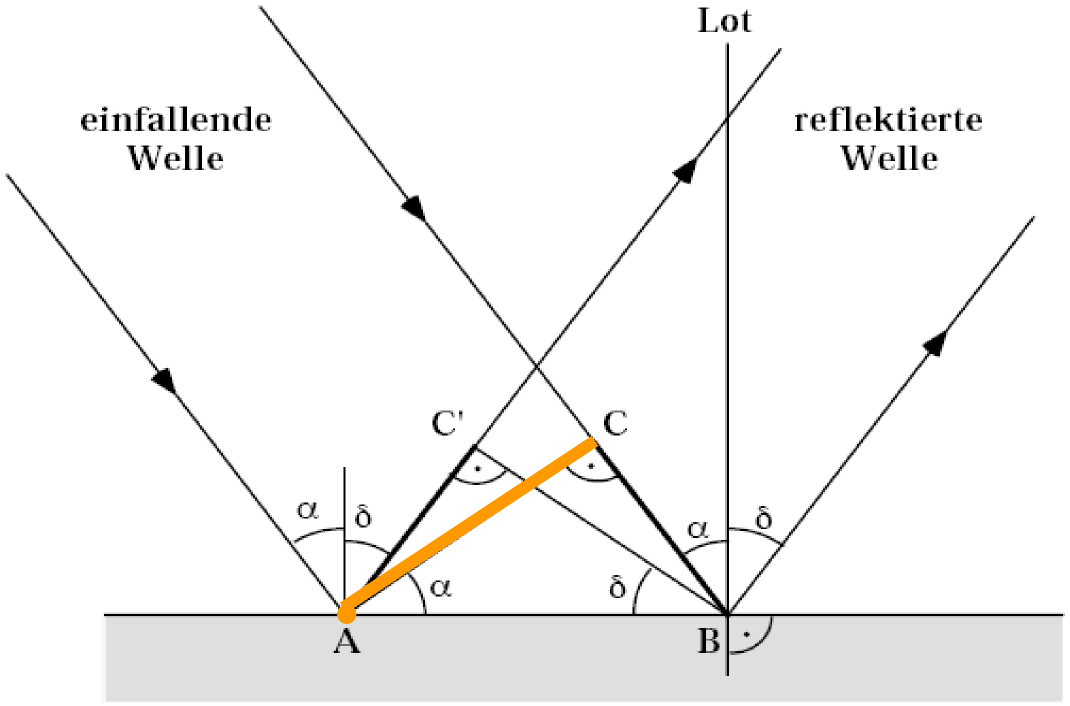
Wellenreflexion

Begründung:

- Die Richtung der reflektierten Welle α' ergibt sich nach dem Huygensschen Prinzip.

- In der Zeit, in der sich die einfallende Welle von $C \rightarrow B$ fortbewegt, breitet sich von A eine Kugelwelle mit dem Radius $\overline{AC'}$ ($= \overline{BC}$) aus. Die Richtung der Wellenfront der reflektierten Welle ergibt sich durch Tangentenbildung von B aus an die Kugelwelle. Dadurch ergibt sich das Dreieck ABC' welches kongruent zu ABC ist. Somit ist

  $\alpha = \delta$



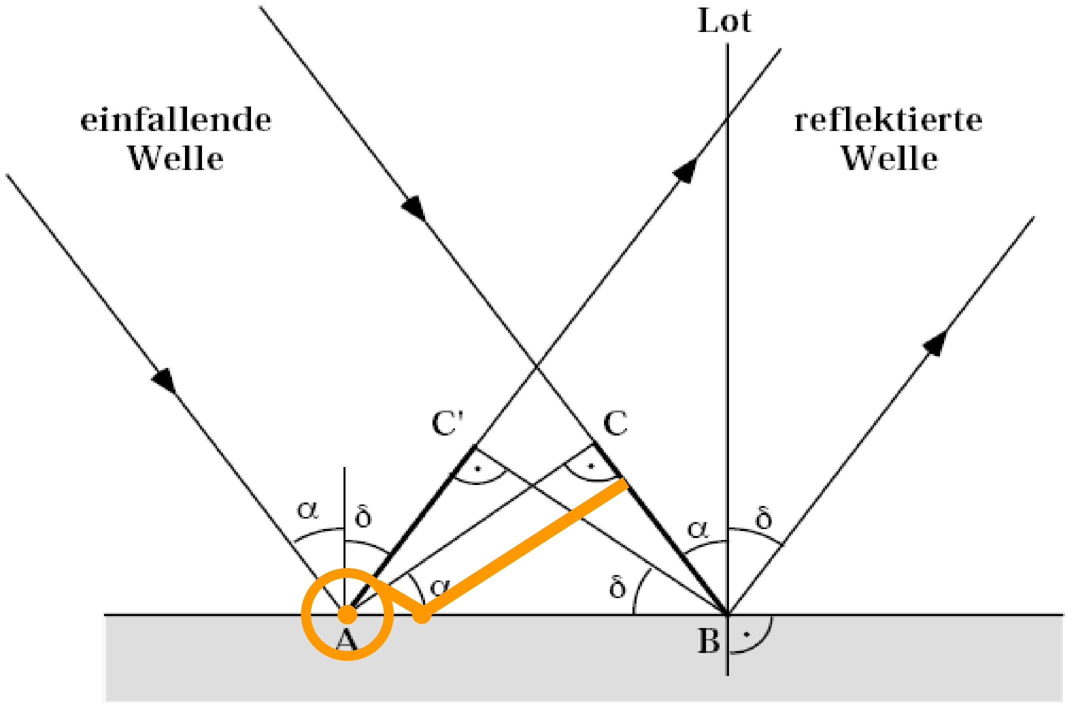
Wellenreflexion

Begründung:

- Die Richtung der reflektierten Welle α' ergibt sich nach dem Huygensschen Prinzip.

- In der Zeit, in der sich die einfallende Welle von C $\rightarrow$ B fortbewegt, breitet sich von A eine Kugelwelle mit dem Radius $\overline{AC'}$ (= $\overline{BC}$) aus. Die Richtung der Wellenfront der reflektierten Welle ergibt sich durch Tangentenbildung von B aus an die Kugelwelle. Dadurch ergibt sich das Dreieck ABC' welches kongruent zu ABC ist. Somit ist

$$\alpha = \delta$$



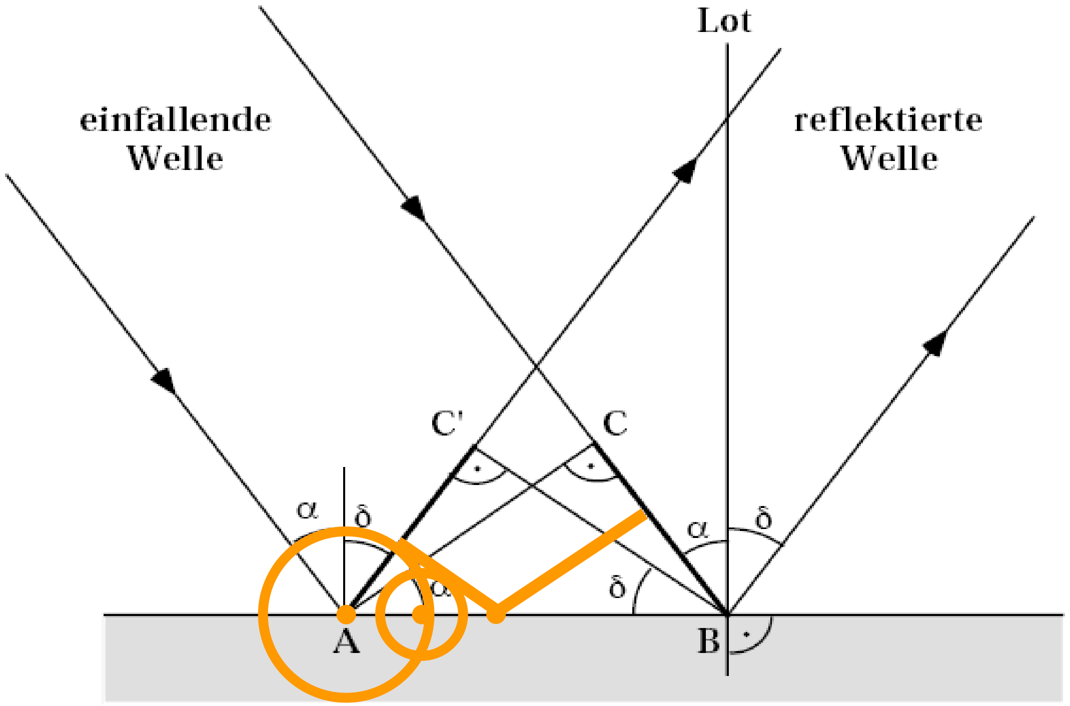
Wellenreflexion

Begründung:

- Die Richtung der reflektierten Welle α' ergibt sich nach dem Huygensschen Prinzip.

- In der Zeit, in der sich die einfallende Welle von C $\rightarrow$ B fortbewegt, breitet sich von A eine Kugelwelle mit dem Radius $\overline{AC'}$ (= $\overline{BC}$) aus. Die Richtung der Wellenfront der reflektierten Welle ergibt sich durch Tangentenbildung von B aus an die Kugelwelle. Dadurch ergibt sich das Dreieck ABC' welches kongruent zu ABC ist. Somit ist

$\alpha = \delta$



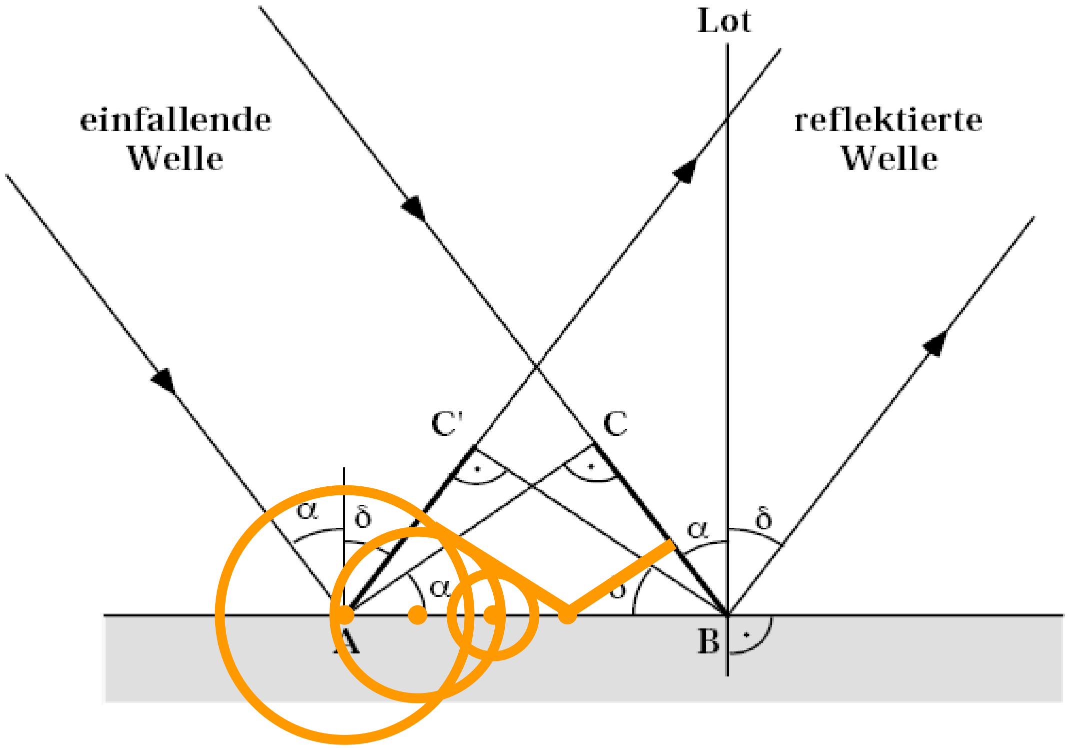
Wellenreflexion

Begründung:

- Die Richtung der reflektierten Welle α' ergibt sich nach dem Huygensschen Prinzip.

- In der Zeit, in der sich die einfallende Welle von $C \rightarrow B$ fortbewegt, breitet sich von A eine Kugelwelle mit dem Radius $\overline{AC'}$ ($= \overline{BC}$) aus. Die Richtung der Wellenfront der reflektierten Welle ergibt sich durch Tangentenbildung von B aus an die Kugelwelle. Dadurch ergibt sich das Dreieck ABC' welches kongruent zu ABC ist. Somit ist

$\alpha = \delta$



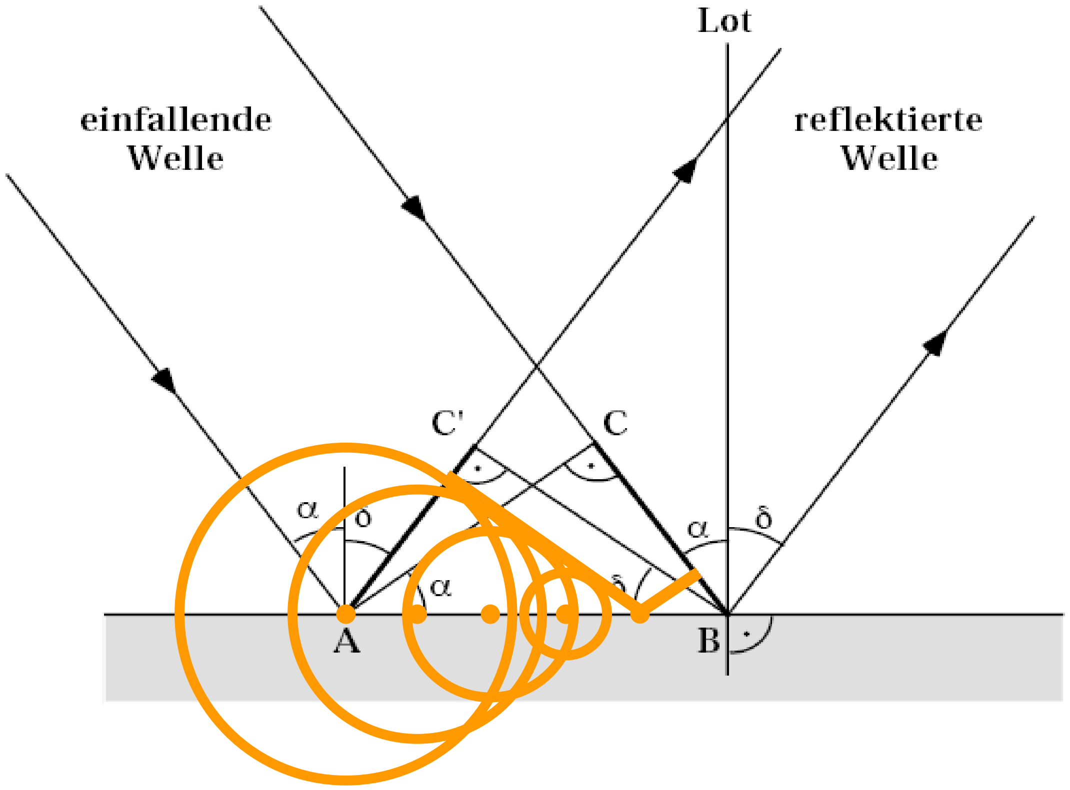
Wellenreflexion

Begründung:

- Die Richtung der reflektierten Welle α' ergibt sich nach dem Huygensschen Prinzip.

- In der Zeit, in der sich die einfallende Welle von C → B fortbewegt, breitet sich von A eine Kugelwelle mit dem Radius $\overline{AC'}$ (= $\overline{BC}$) aus. Die Richtung der Wellenfront der reflektierten Welle ergibt sich durch Tangentenbildung von B aus an die Kugelwelle. Dadurch ergibt sich das Dreieck ABC' welches kongruent zu ABC ist. Somit ist

$\alpha = \delta$



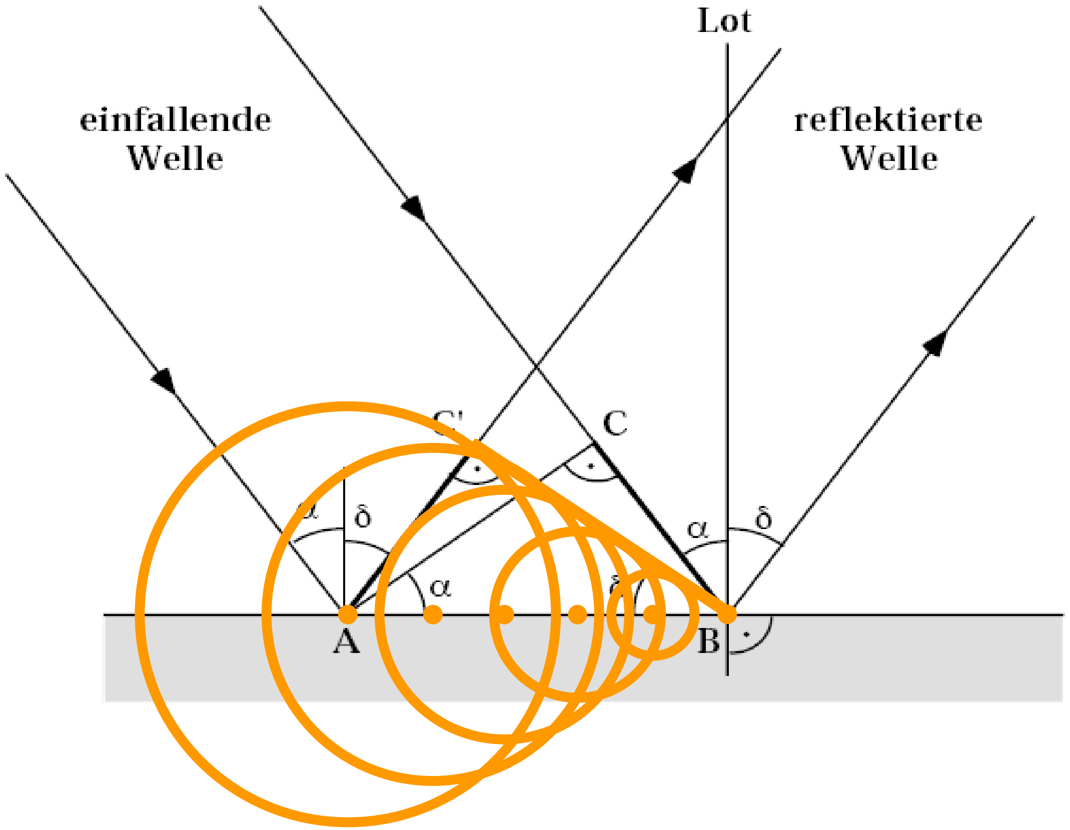
Wellenreflexion

Begründung:

- Die Richtung der reflektierten Welle α' ergibt sich nach dem Huygensschen Prinzip.

- In der Zeit, in der sich die einfallende Welle von C → B fortbewegt, breitet sich von A eine Kugelwelle mit dem Radius $\overline{AC'}$ (= $\overline{BC}$) aus. Die Richtung der Wellenfront der reflektierten Welle ergibt sich durch Tangentenbildung von B aus an die Kugelwelle. Dadurch ergibt sich das Dreieck ABC' welches kongruent zu ABC ist. Somit ist

$\alpha = \delta$



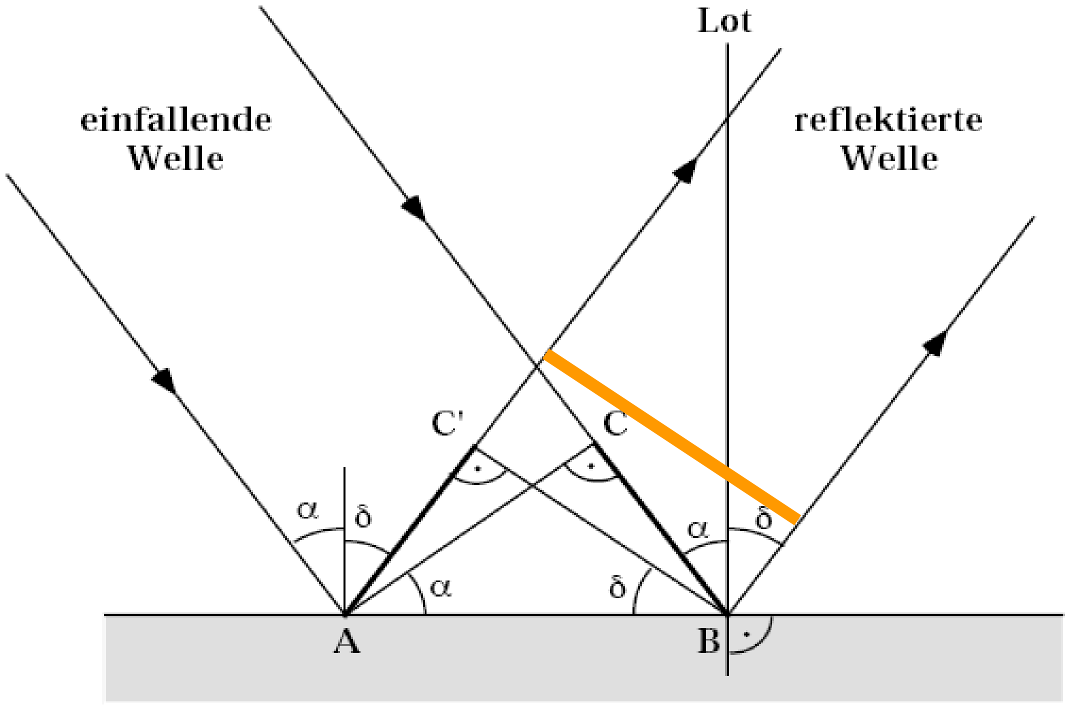
Wellenreflexion

Begründung:

- Die Richtung der reflektierten Welle α' ergibt sich nach dem Huygensschen Prinzip.

- In der Zeit, in der sich die einfallende Welle von $C \rightarrow B$ fortbewegt, breitet sich von A eine Kugelwelle mit dem Radius $\overline{AC'}$ ($= \overline{BC}$) aus. Die Richtung der Wellenfront der reflektierten Welle ergibt sich durch Tangentenbildung von B aus an die Kugelwelle. Dadurch ergibt sich das Dreieck ABC' welches kongruent zu ABC ist. Somit ist

$\alpha = \delta$



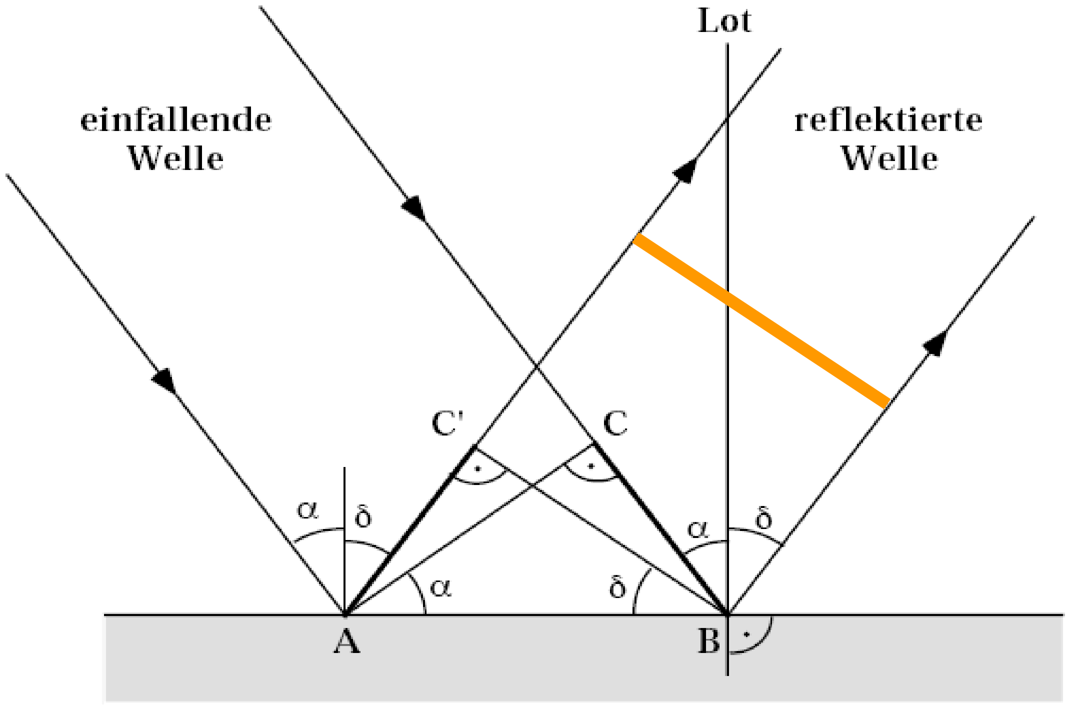
Wellenreflexion

Begründung:

- Die Richtung der reflektierten Welle α' ergibt sich nach dem Huygensschen Prinzip.

- In der Zeit, in der sich die einfallende Welle von C $\rightarrow$ B fortbewegt, breitet sich von A eine Kugelwelle mit dem Radius $\overline{AC'}$ (= $\overline{BC}$) aus. Die Richtung der Wellenfront der reflektierten Welle ergibt sich durch Tangentenbildung von B aus an die Kugelwelle. Dadurch ergibt sich das Dreieck ABC' welches kongruent zu ABC ist. Somit ist

$\alpha = \delta$



Brechungsgesetz

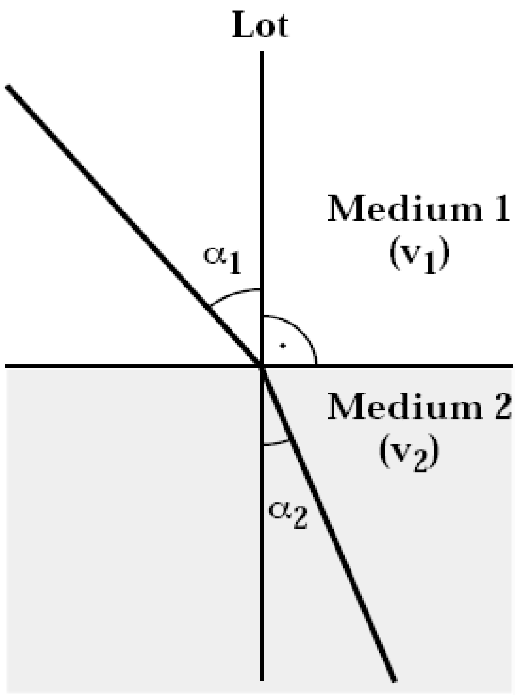
Ursache der Brechung :

zwei verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den beiden Medien (v_1 und v_2).

Brechungsgesetz :

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

einfallender Strahl, gebrochener Strahl und Lot liegen in einer Ebene.



Brechungsgesetz

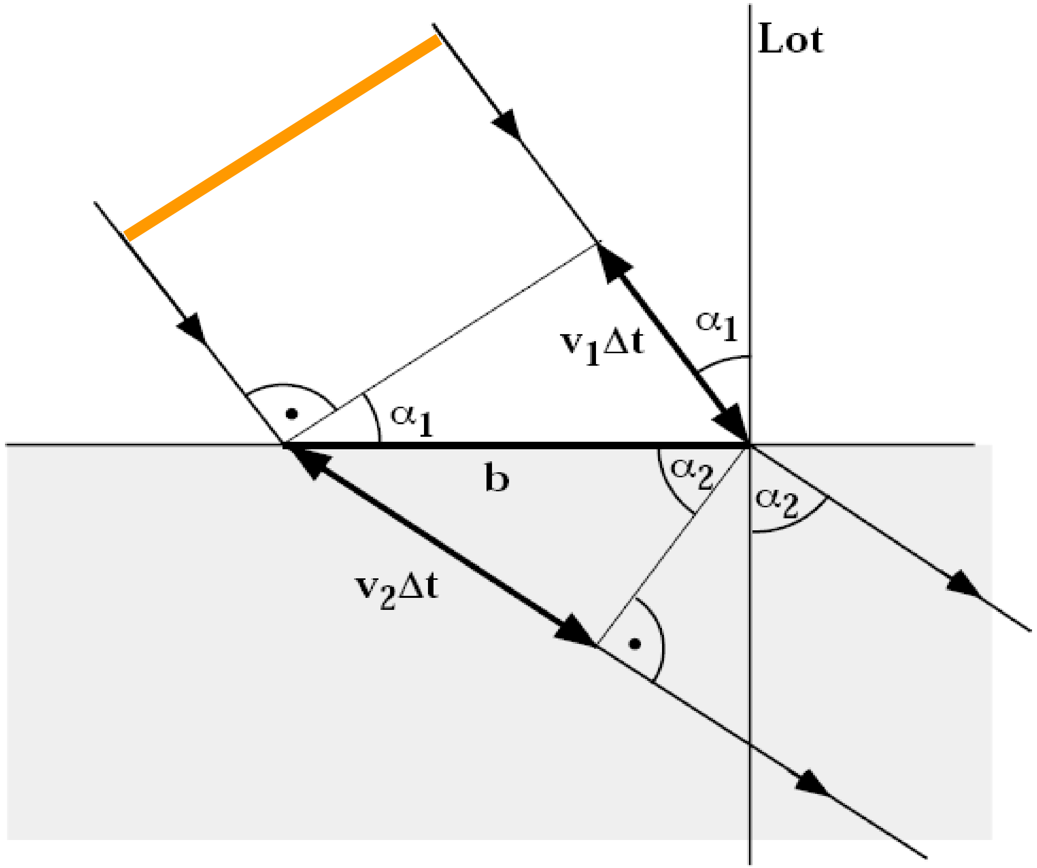
Begründung:

Die Richtung der gebrochenen Welle ergibt sich wieder nach dem Huygensschen Prinzip.

$$\sin \alpha_1 = \frac{v_1 \Delta t}{b}$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{v_2 \Delta t}{b}$$

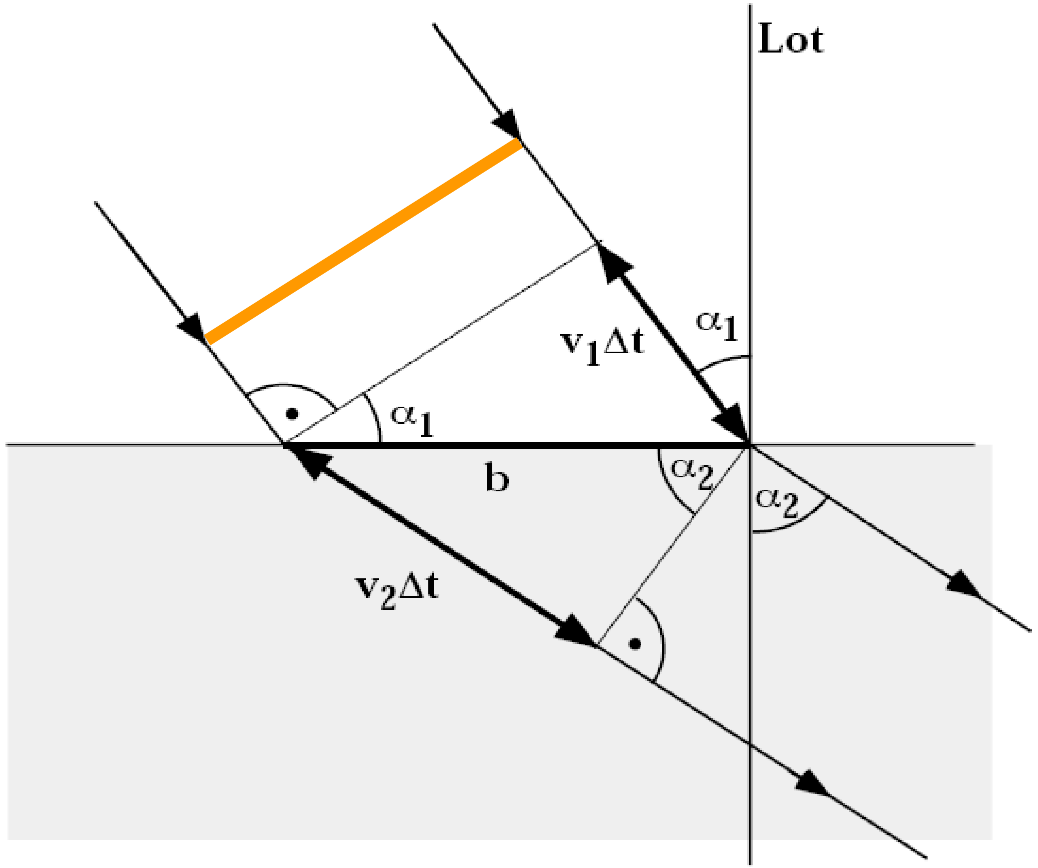
$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$$



Brechungsgesetz

Begründung:

Die Richtung der gebrochenen Welle ergibt sich wieder nach dem Huygensschen Prinzip.



$$\sin\alpha_1 = \frac{v_1\,\Delta t}{b}$$

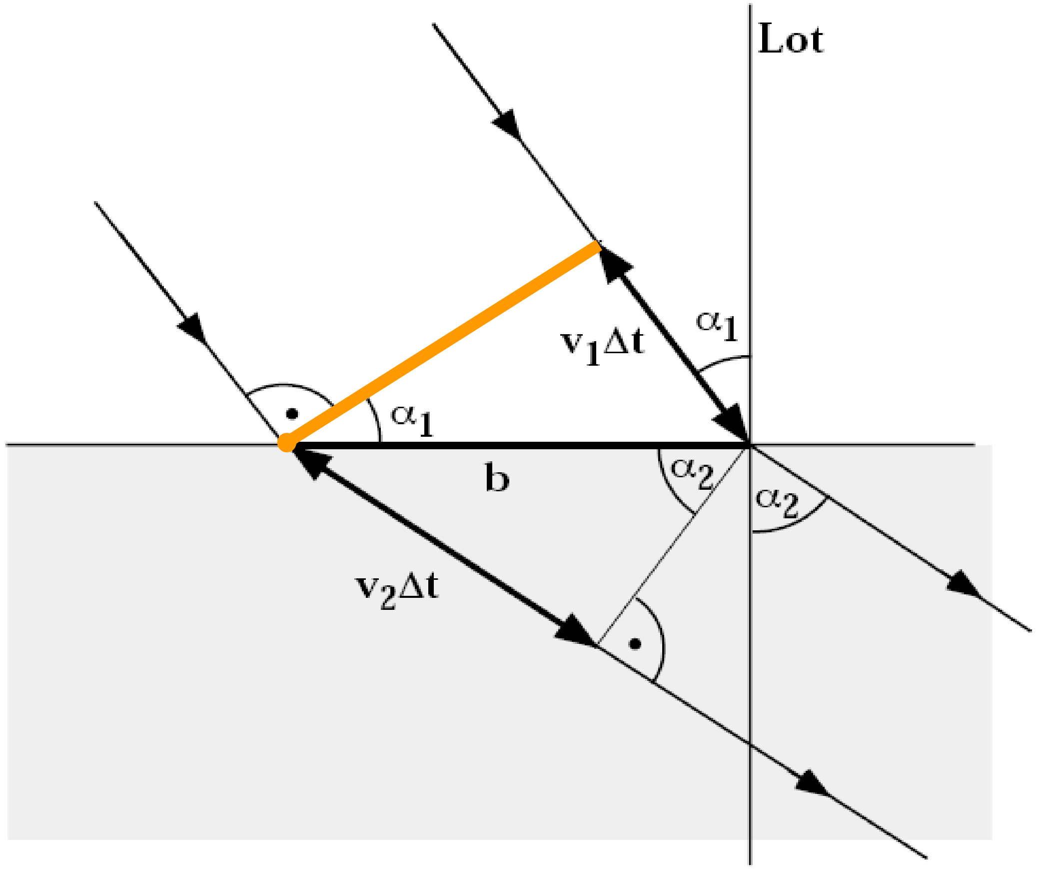
$$\sin\alpha_2 = \frac{v_2\,\Delta t}{b}$$

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Brechungsgesetz

Begründung:

Die Richtung der gebrochenen Welle ergibt sich wieder nach dem Huygensschen Prinzip.



$$\sin\alpha_1 = \frac{v_1\,\Delta t}{b}$$

$$\sin\alpha_2 = \frac{v_2\,\Delta t}{b}$$

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Brechungsgesetz

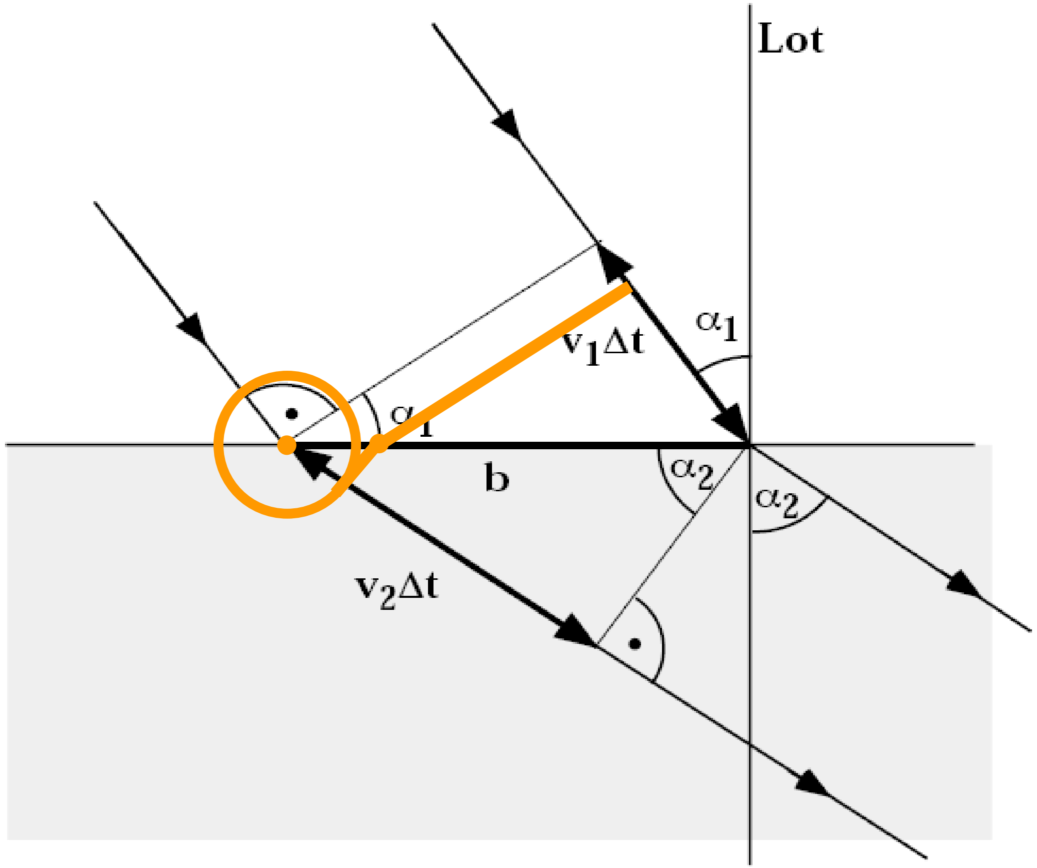
Begründung:

Die Richtung der gebrochenen Welle ergibt sich wieder nach dem Huygensschen Prinzip.

$$\sin\alpha_1 = \frac{v_1\,\Delta t}{b}$$

$$\sin\alpha_2 = \frac{v_2\,\Delta t}{b}$$

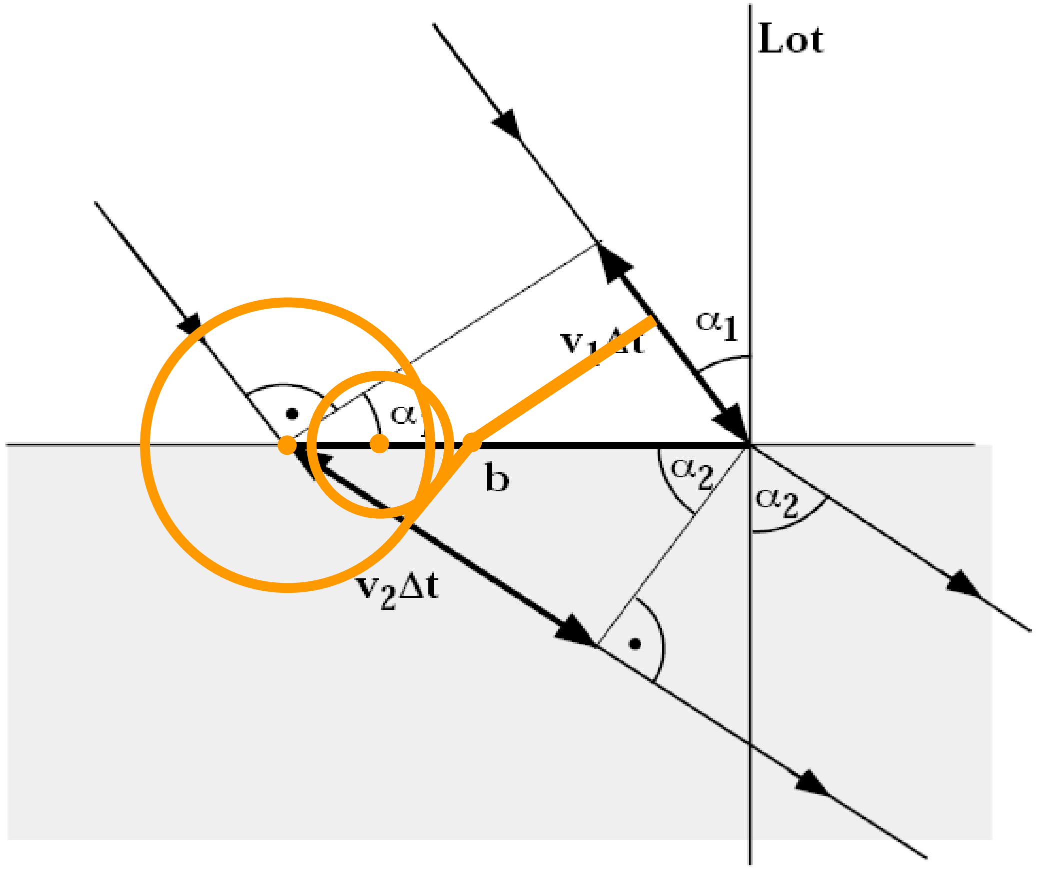
$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$$



Brechungsgesetz

Begründung:

Die Richtung der gebrochenen Welle ergibt sich wieder nach dem Huygensschen Prinzip.



$$\sin\alpha_1 = \frac{v_1\,\Delta t}{b}$$

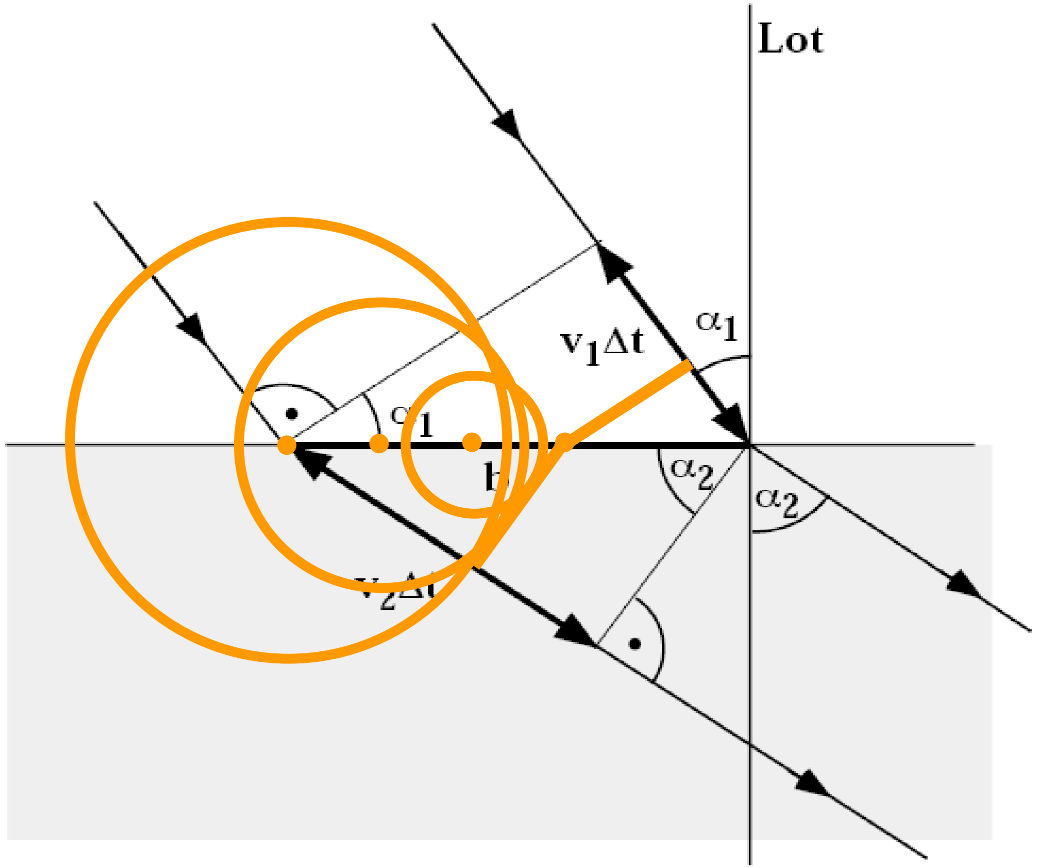
$$\sin\alpha_2 = \frac{v_2\,\Delta t}{b}$$

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Brechungsgesetz

Begründung:

Die Richtung der gebrochenen Welle ergibt sich wieder nach dem Huygensschen Prinzip.



$$\sin\alpha_1 = \frac{v_1\,\Delta t}{b}$$

$$\sin\alpha_2 = \frac{v_2\,\Delta t}{b}$$

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Brechungsgesetz

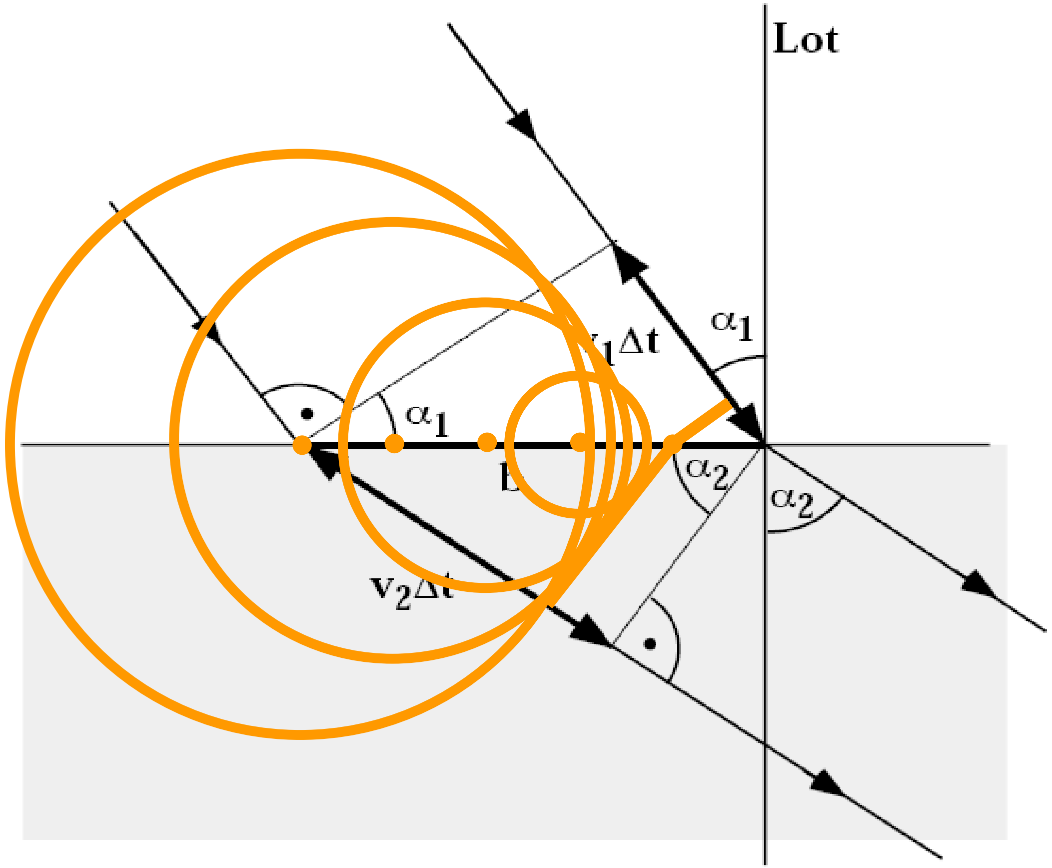
Begründung:

Die Richtung der gebrochenen Welle ergibt sich wieder nach dem Huygensschen Prinzip.

$$\sin\alpha_1 = \frac{v_1\,\Delta t}{b}$$

$$\sin\alpha_2 = \frac{v_2\,\Delta t}{b}$$

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$$



Brechungsgesetz

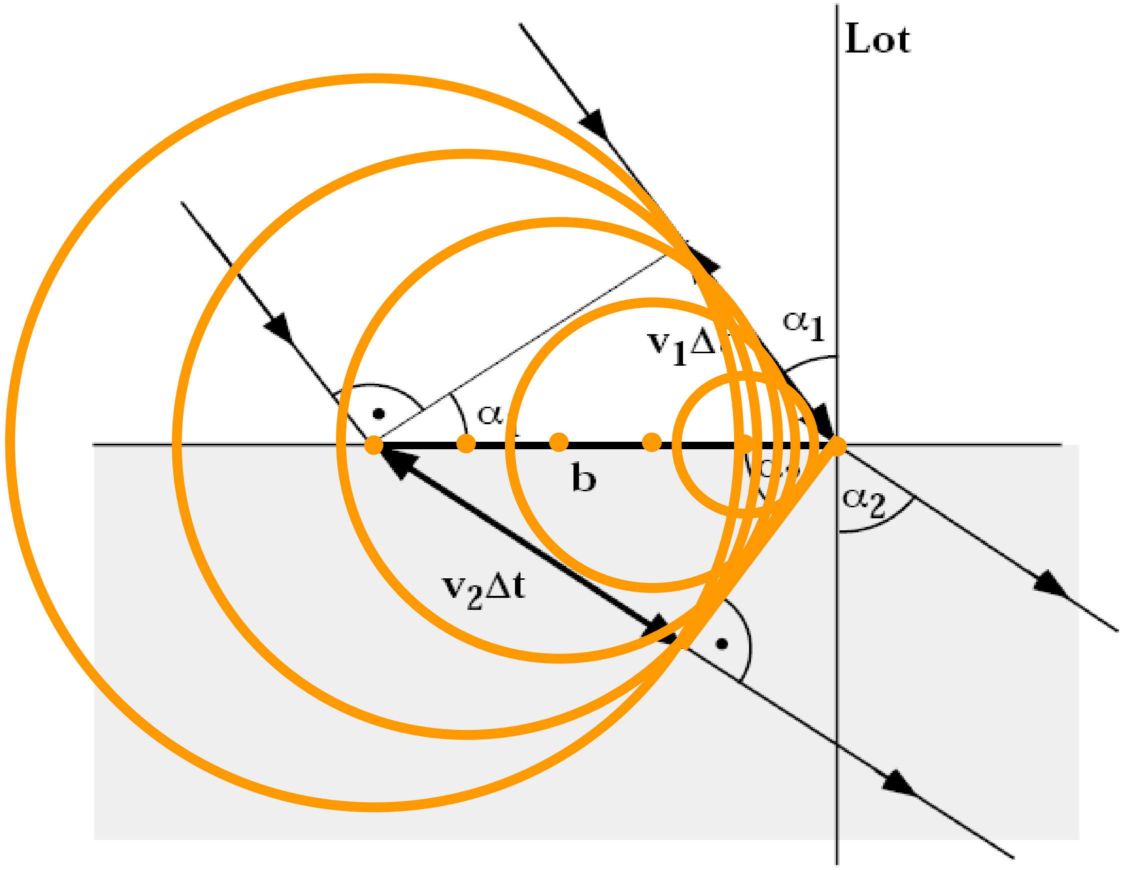
Begründung:

Die Richtung der gebrochenen Welle ergibt sich wieder nach dem Huygensschen Prinzip.

$$\sin \alpha_1 = \frac{v_1 \Delta t}{b}$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{v_2 \Delta t}{b}$$

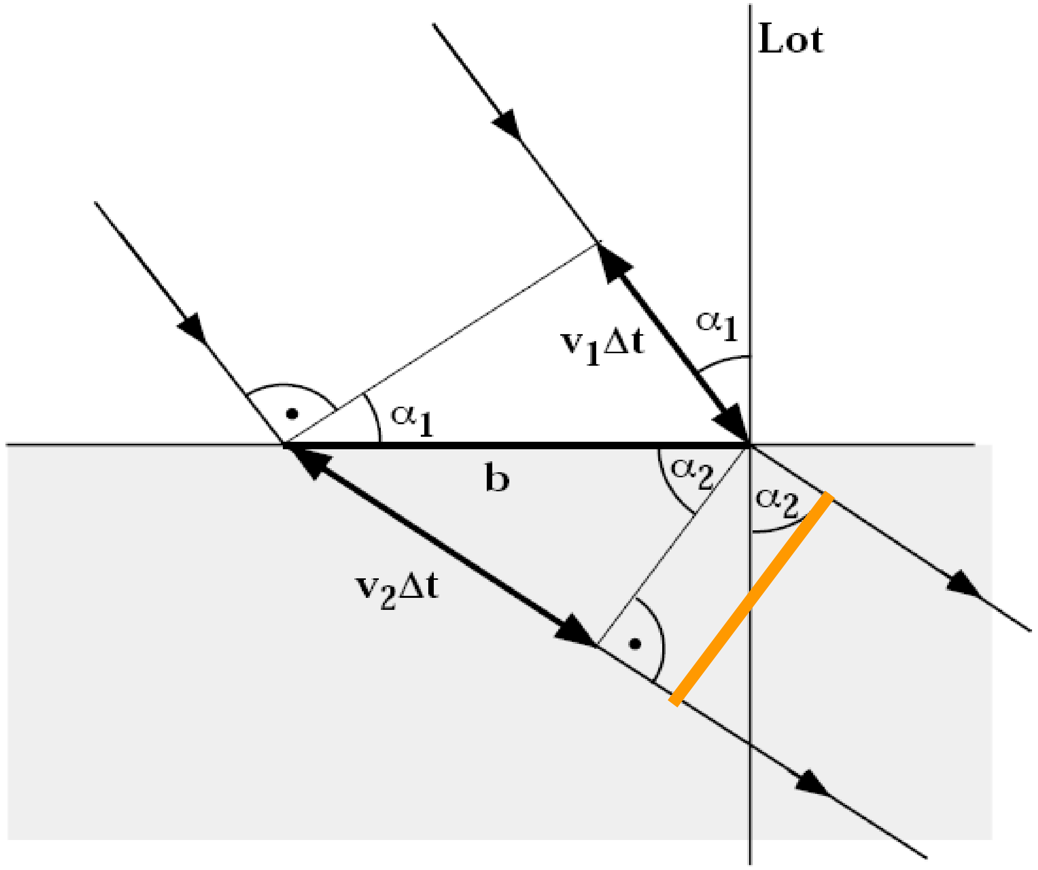
$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$$



Brechungsgesetz

Begründung:

Die Richtung der gebrochenen Welle ergibt sich wieder nach dem Huygensschen Prinzip.



$$\sin \alpha_1 = \frac{v_1 \Delta t}{b}$$

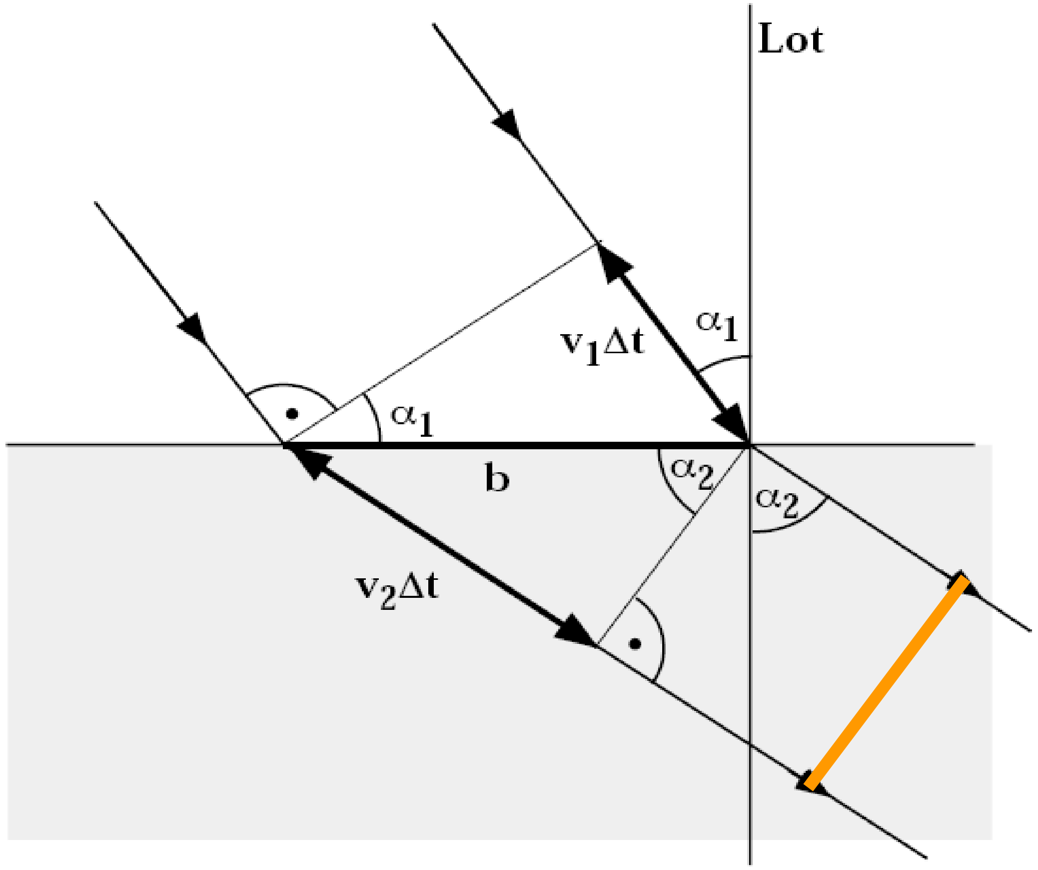
$$\sin \alpha_2 = \frac{v_2 \Delta t}{b}$$

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Brechungsgesetz

Begründung:

Die Richtung der gebrochenen Welle ergibt sich wieder nach dem Huygensschen Prinzip.



$$\sin\alpha_1 = \frac{v_1\,\Delta t}{b}$$

$$\sin\alpha_2 = \frac{v_2\,\Delta t}{b}$$

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

9.7 Akustik

- logarithmische Skala der Schallintensität : Dezibel Skala, Schallpegel

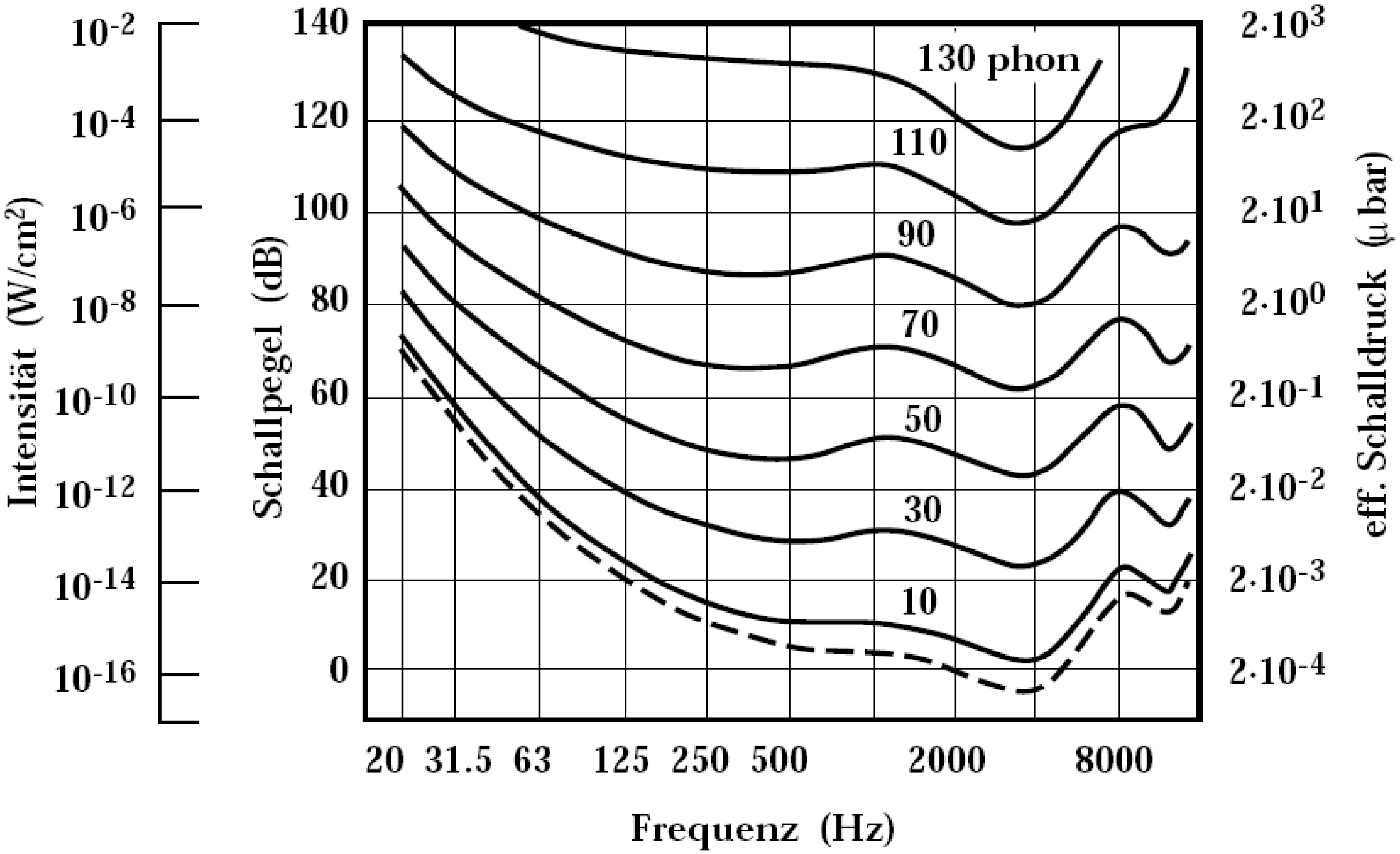
$$L = 10\ {}_{10}\log \frac{I}{I_0} \quad \text{mit} \quad I_0 = 10^{-12}\ W/m^2$$

I_0 : Bezugsintensität (= Hörschwelle bei 1000 Hz)
oder, da I proportional zu p^2 ist

$$L = 20\ {}_{10}\log \frac{p}{p_0} \quad \text{mit} \quad p_0 = 2 \cdot 10^{-5}\ Pa$$

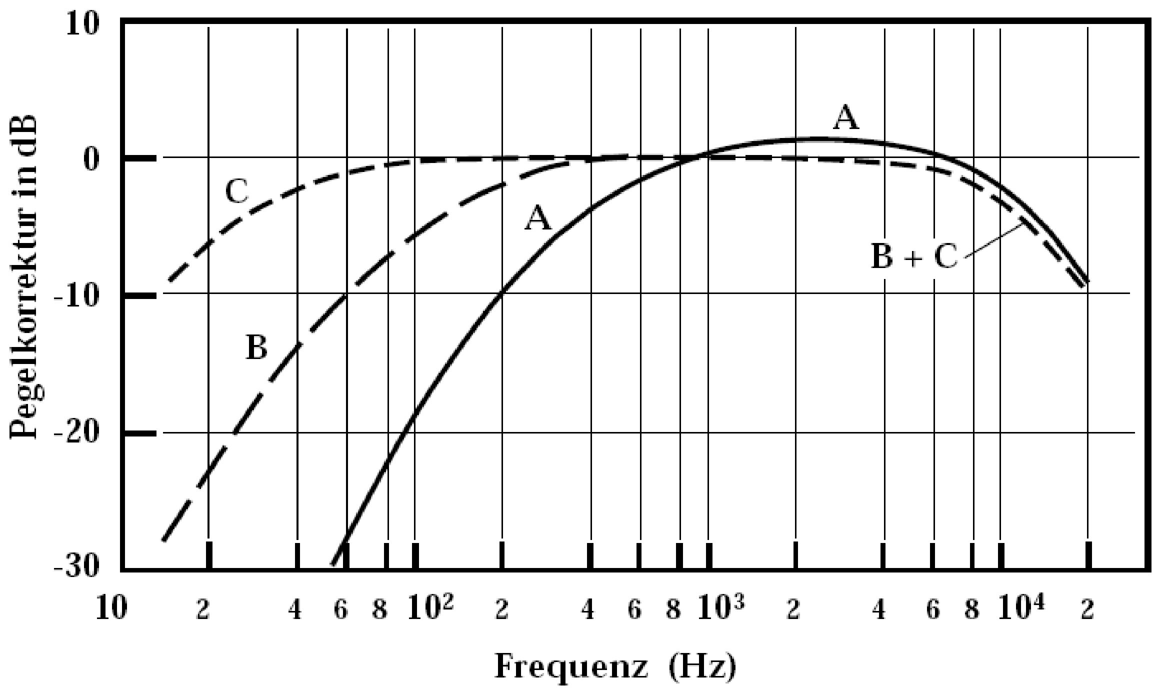
- Physiologisch bewertete Lautstärkepegel
  Um dem Hörbereich des Menschen (von etwa 16 Hz bis 20 kHz) und der Frequenzabhängigkeit der Empfindlichkeit innerhalb des Hörbereichs Rechnung zu tragen arbeitet man mit verschiedenen physiologisch bewerteten Lautstärkepegeln:
  - Phonkurven
  - dB(A), dB(B) und dB(C) Bewertungskurven

Phonkurven (heute kaum noch verwendet)



– – – – Hörschwelle

aktuell verwendete Pegelkorrekturen: dB(A), dB(B), dB(C)



Die logarithmischen Skalen der Schallpegel tragen auch dem logarithmischen Empfinden des menschlichen Ohrs Rechnung.

Nach dem **Weber-Fechnerschen** Gesetz ist die subjektiv empfundene **Lautstärke proportional zum Logarithmus der Schallintensität**, $L \propto \log I$.

Auch für die Tonfrequenz (Tonhöhe) hat das Ohr eine logarithmische Empfindung.

Lautstärken einiger Geräusche in dB(A)

Geräusch	dB(A)	Geräusch	dB(A)
Pressluft-Sirene (7 m)	131	Büro mit Buchungsmaschinen	75
Kesselschmiede	125	Mittlerer Strassenverkehr	70
Presslufthammer (1 m)	120	Unterhaltungssprache (1 m)	65
Sandstrahlgebläse (1 m)	115	Schwacher Strassenverkehr	50
Düsen - Flugzeug (200 m)	115	Niedrigster Geräuschpegel in Wohnvierteln bei Nacht	40
Hupe (1 m)	110	Blätterrauschen	30
Weberei	100	Rundfunksprecherstudio	20
LKW (7 m)	90	Schalltoter Raum (gut isoliert)	10
Motorrad (7 m)	85	Hörschwelle (jugendliches Ohr)	0
PKW (7 m)	80		

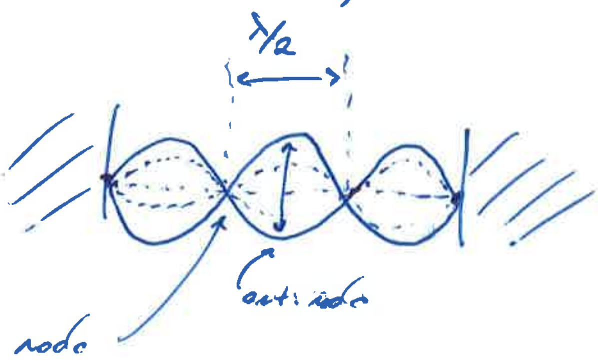
EXP: db-Meter

Standing Waves (Stationary Waves)

- Wave in which each point on the axis of the wave has an associated constant amplitude.

Where the amplitude is maximum → antinodes

Where the amplitude is minimum → nodes



Exp: Rubber tube

- Standing waves are the result of the superposition (sum) of two identical waves travelling in the opposite direction.

In the case of the rubber tube experiment, or in a cavity, this superposition occurs between waves reflected back and forth from the ends.

(show movie of standing wave)

Wave in positive x-direction : $y_1 = y_0 \sin(\omega t - kx)$

Wave in Negative x-direction : $y_2 = y_0 \sin(\omega t + kx + \phi_0)$

$$y = y_1 + y_2 = 2y_0 \underbrace{\sin\left(\omega t + \frac{\phi_0}{2}\right)}_{\text{only time dependent}} \underbrace{\cos\left(kx + \frac{\phi_0}{2}\right)}_{\text{only position dependent}}$$

Nodes :

$$\cos\left(kx + \frac{\phi_0}{2}\right) = 0$$

$$kx + \frac{\phi_0}{2} = \frac{\pi}{2} + n\pi \quad \text{for } n = 0, 1, 2, \ldots$$

$$2kx + \phi_0 = \pi + 2n\pi$$

$$\boxed{x = \frac{(2n+1)\pi - \phi_0}{2k}}$$

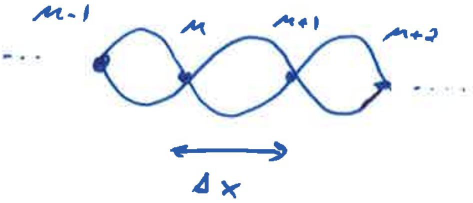
Anti-nodes

$$\cos\left(kx + \frac{\phi_0}{2}\right) = \pm 1$$

$$kx + \frac{\phi_0}{2} = n\pi \quad \text{for } n = 0, 1, 2, \ldots$$

$$\boxed{x = \frac{2n\pi - \phi_0}{2k}}$$

Distance between ~~nodes~~ nodes



$$\Delta x = x_{n+1} - x_n$$

$$x_{n+1} = \frac{[2(n+1)+1]\pi - \phi_0}{2k}$$

$$x_n = \frac{(2n+1)\pi - \phi_0}{2k}$$

$$\Delta x = \frac{2\pi}{2k} = \frac{\pi}{k} = \frac{\pi\lambda}{2\pi} = \frac{\lambda}{2} \longrightarrow \boxed{\Delta x = \frac{\lambda}{2}}$$

Recall that

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

Exp Lecher Lines (Lecherleitung)

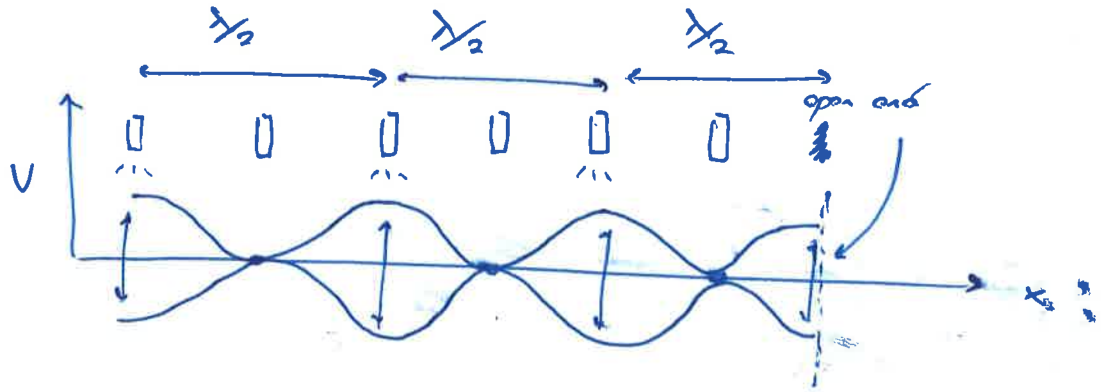
- Parallel wires support standing radio waves.

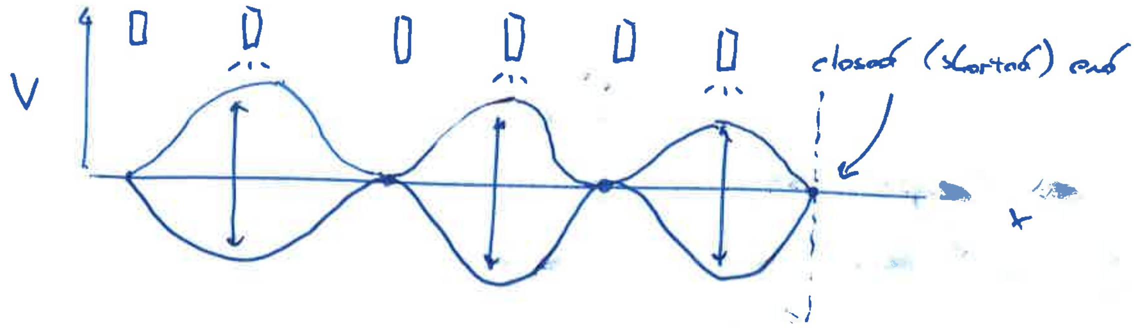
$$v = \lambda \cdot \nu$$

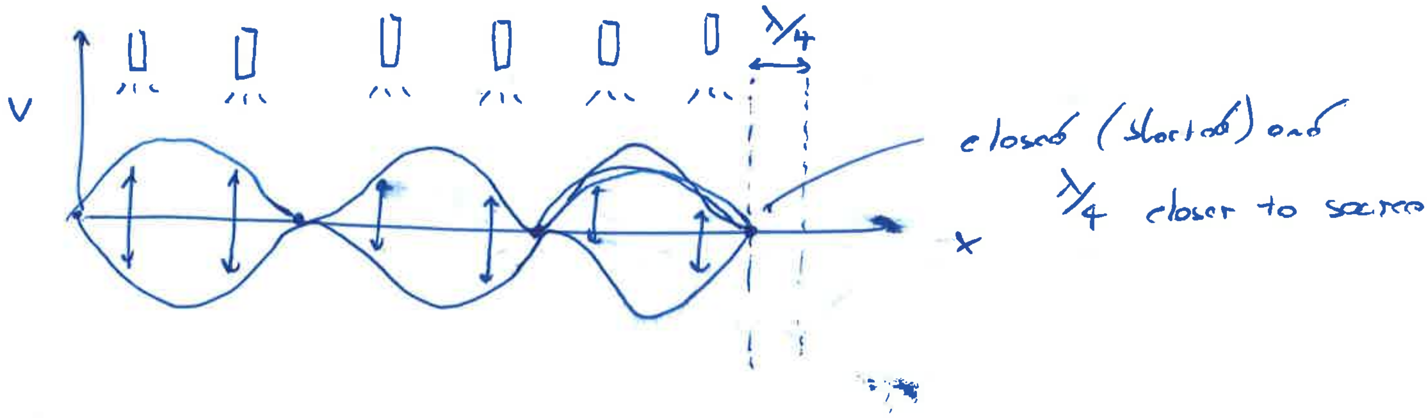
$$v = c = \lambda \cdot \nu$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3.0 \times 10^8 \ m/s}{27 \times 10^6 \ Hz} \approx 11 \ m$$

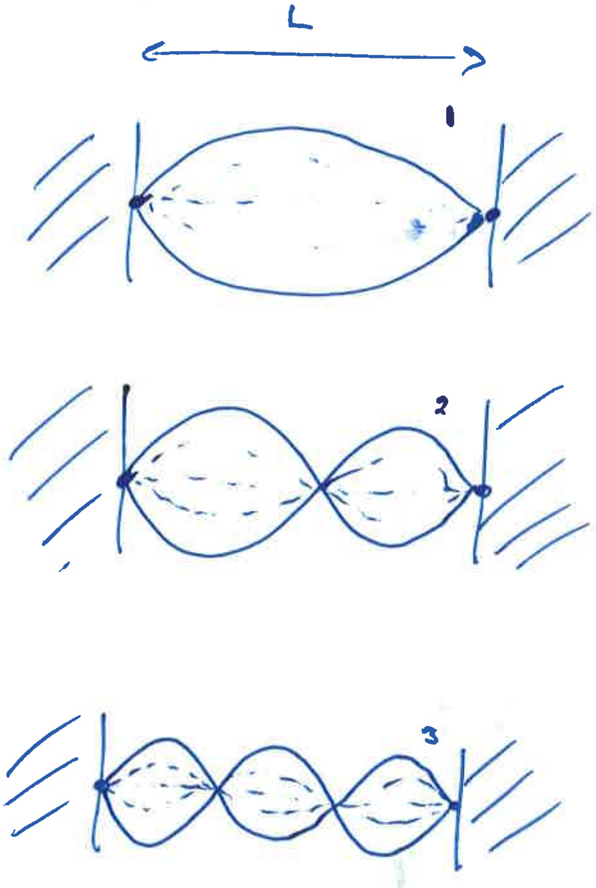
$$\frac{\lambda}{2} \approx 5.5 \ m$$ → distance between nodes and distance between antinodes


λ/2
λ/2
λ/2
V
open end
x


V
closed (shorted) end
x


V
λ/4
closed (shorted) end
λ/4 closer to source
x

Standing waves and Resonances



etc...

- Resonant frequencies of a cavity can be solved using the boundary conditions.

Standing wave :

$$y(x,t) = 2y_0 \sin\left(\omega t + \frac{\phi_0}{2}\right) \cos\left(kx + \frac{\phi_0}{2}\right)$$

$$\left.\begin{aligned} y(0,t) &= 0 \\ y(L,t) &= 0 \end{aligned}\right\} \text{ ends are fixed}$$

$$y(0,t) = 0 = 2y_0 \sin\left(\omega t + \frac{\phi_0}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi_0}{2}\right)$$

$$0 = \cos\left(\frac{\phi_0}{2}\right)$$

$$\phi_0 = (2n+1)\pi$$

$$y(L,t) = 0 = 2y \sin\left(\omega t + \frac{\phi_0}{2}\right) \cos\left(kL + \frac{\phi_0}{2}\right)$$

$$0 = \cos\left(kL + \frac{\phi_0}{2}\right)$$

$$kL + \frac{(2m+1)\cancel{\pi}}{\cancel{2}} = \frac{(2n+1)\cancel{\pi}}{\cancel{2}}$$

$$kL = (m-n)\pi = n'\pi$$

$$k = \frac{n'\pi}{L}$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} = \frac{n'\pi}{L}$$

$$\boxed{L = n'\left(\frac{\lambda}{2}\right)} \quad \text{for} \quad n' = 1, 2, 3, \ldots$$

$$\therefore \boxed{\lambda_{n'} = \frac{2L}{n'}} \quad \text{for} \quad n' = 1, 2, 3, \ldots$$

$$v = \lambda \cdot \nu$$

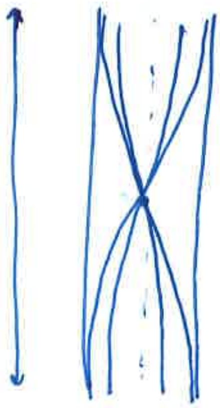
$$\nu = \frac{v}{\lambda}$$

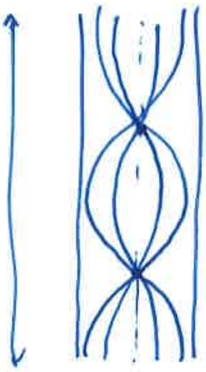
$$\therefore \quad \nu_{n'} = \frac{v}{\frac{2L}{n'}} = \frac{n'v}{2L}$$

$$\boxed{\nu_{n'} = \frac{v}{2L}\, n'} \quad \text{for} \quad n' = 1, 2, 3, \ldots$$

Standing Acoustic Waves in Fifes

2 open ends :

L  $\longrightarrow$ Fundamental : $L = \frac{\lambda}{2}$

L  $\longrightarrow$ 1^{st} harmonic : $L = \lambda$

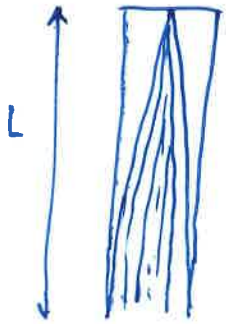
n^{th} harmonic : $L = (n+1)\frac{\lambda}{2}$

$v = \lambda \cdot \nu$

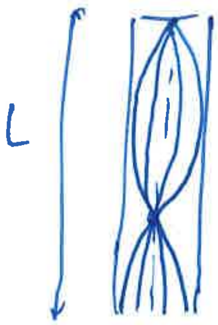
$\lambda = \frac{v}{\nu}$ $\qquad L = (n+1)\frac{v}{2\nu}$

$$\boxed{\nu_n = (n+1)\frac{v}{2L}}$$

1 open end,
1 closed end :



→ Fundamental : $L = \frac{\lambda}{4}$



→ 1st harmonic : $L = \frac{3\lambda}{4}$

nth harmonic : $L = (2n-1)\frac{\lambda}{4}$

$$L = (2n+1)\frac{v}{4\nu}$$

$$\boxed{\nu_n = (2n+1)\frac{v}{4L}}$$

Exps: PET tubes, Fifes, Hu voice

Exp : Chladni Figures