

Physik für Studierende der Medizin im 1. Fachsemester

(PFMF-V); 09410100

Dienstag mit Freitag 8.15-9.00

Akustik & Ultraschall

Am 11.05.2021



Dr. Simon Moser
Lehrstuhl für Exp. Physik IV,
Universität Würzburg
simon.moser@physik.uni-wuerzburg.de



Akustik: Grundlagen

Die **Akustik** behandelt die **Entstehung, Übertragung** und den **Empfang** von Schall.

Als **Schall** bezeichnet man **mechanische Schwingungs- und Wellenvorgänge in elastischen Medien** (Gasen, Flüssigkeiten, Festkörpern). Die Erkenntnis, dass es sich bei Schall um ein Wellenphänomen handelt, ist bereits über 2000 Jahre alt.

Frequenzbereich	Bezeichnung
$\nu < 16 \text{ Hz}$	Infraschall
$16 \text{ Hz} < \nu < 20 \text{ kHz}$	Hörbereich
$20 \text{ kHz} < \nu < 10 \text{ MHz}$	Ultraschall
$\nu > 10 \text{ MHz}$	Hyperschall

Typ. Anwendung: Ultraschall (Echolot, Durchmischung von Emulsionen, Reinigung, Werkstoffanalyse, Bildgebende Untersuchung)

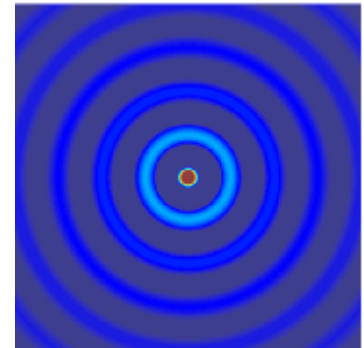
Seilwelle:

Der Prototyp einer mechanischen Welle

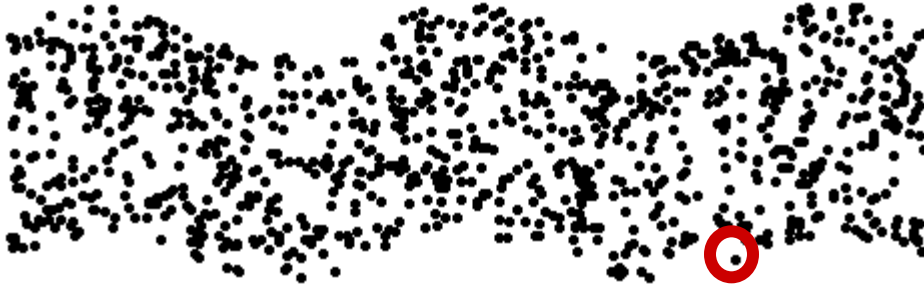


Störung breitet sich mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit aus, die von den mechanischen Eigenschaften des Mediums abhängt.

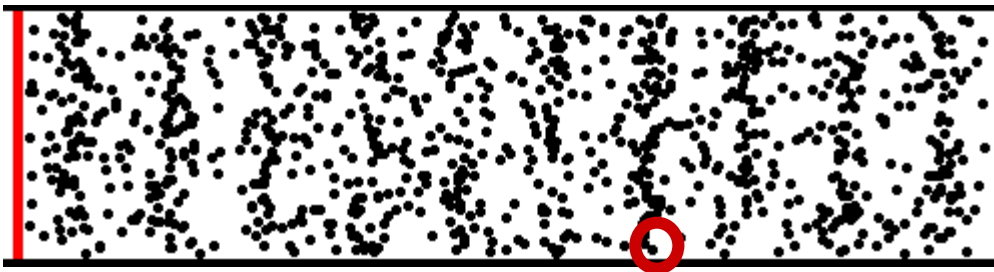
Beispiele: Wasserwellen, Schallwellen, Seilwellen, elektro-magnetische Wellen, Materiewellen u.v.m.



Was sind Wellen?

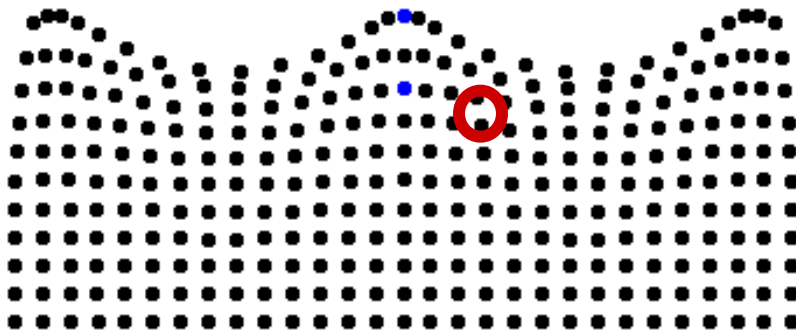


Transversale Welle



Longitudinale Welle

Es gibt longitudinale (Oszillatoren schwingen in Ausbreitungsrichtung) & transversale (Oszillatoren schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung)



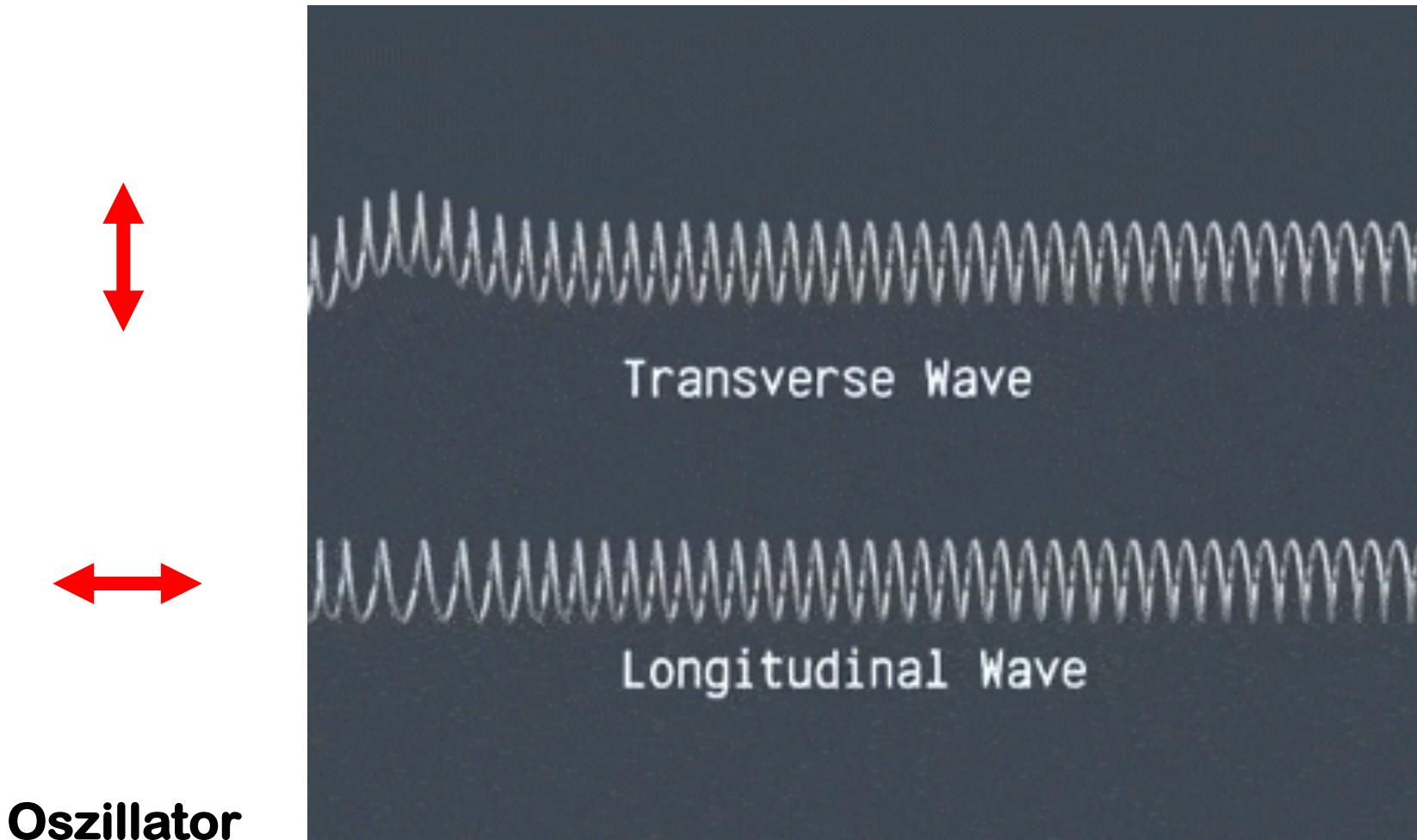
Normalschwingungen

Wasseroberfläche (Mischung)

©1999, Daniel A. Russell

Was sind Wellen?

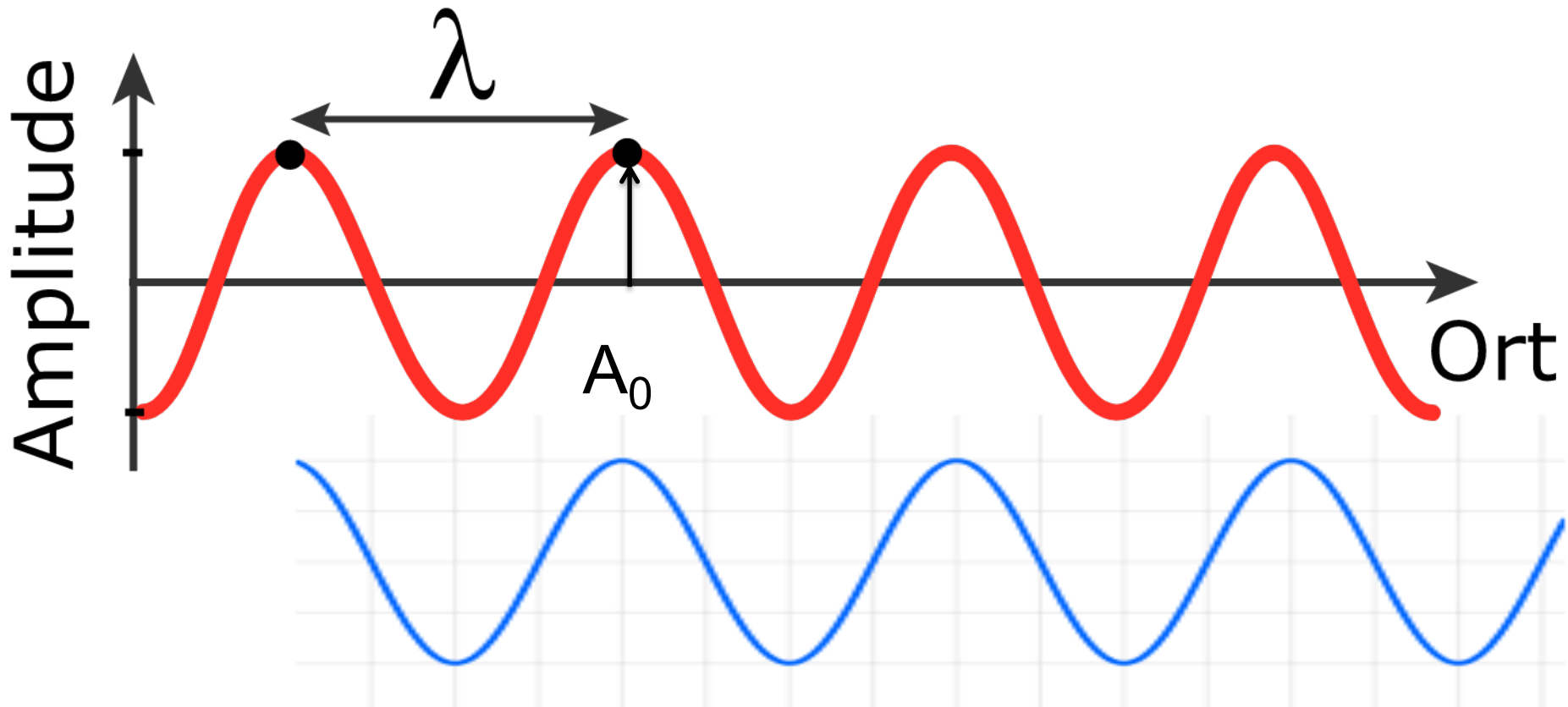
Lokale Schwingungen, die sich räumlich ausbreiten nennt man **Wellen**:



Was sind Wellen?

Beschreibung einer sinusförmigen Welle

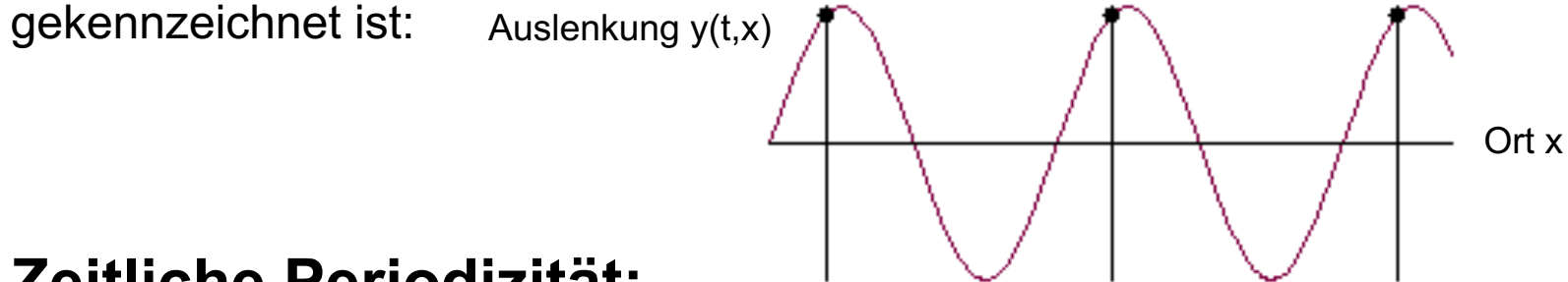
- ① Wellenlänge λ
- ② Amplitude A_0



Wellenausbreitung

Fakten:

Bei einer sinusförmigen Anregung einer Kette von gekoppelten Oszillatoren entsteht eine Welle, die durch eine **zeitliche** und **räumliche** Periodizität gekennzeichnet ist:



Zeitliche Periodizität:

Man findet denselben Schwingungszustand in regelmäßigen zeitlichen Abständen T am gleichen Ort wieder (Frequenz ν)

Räumliche Periodizität:

Man findet denselben Schwingungszustand in regelmäßigen räumlichen Abständen λ zur gleichen Zeit wieder

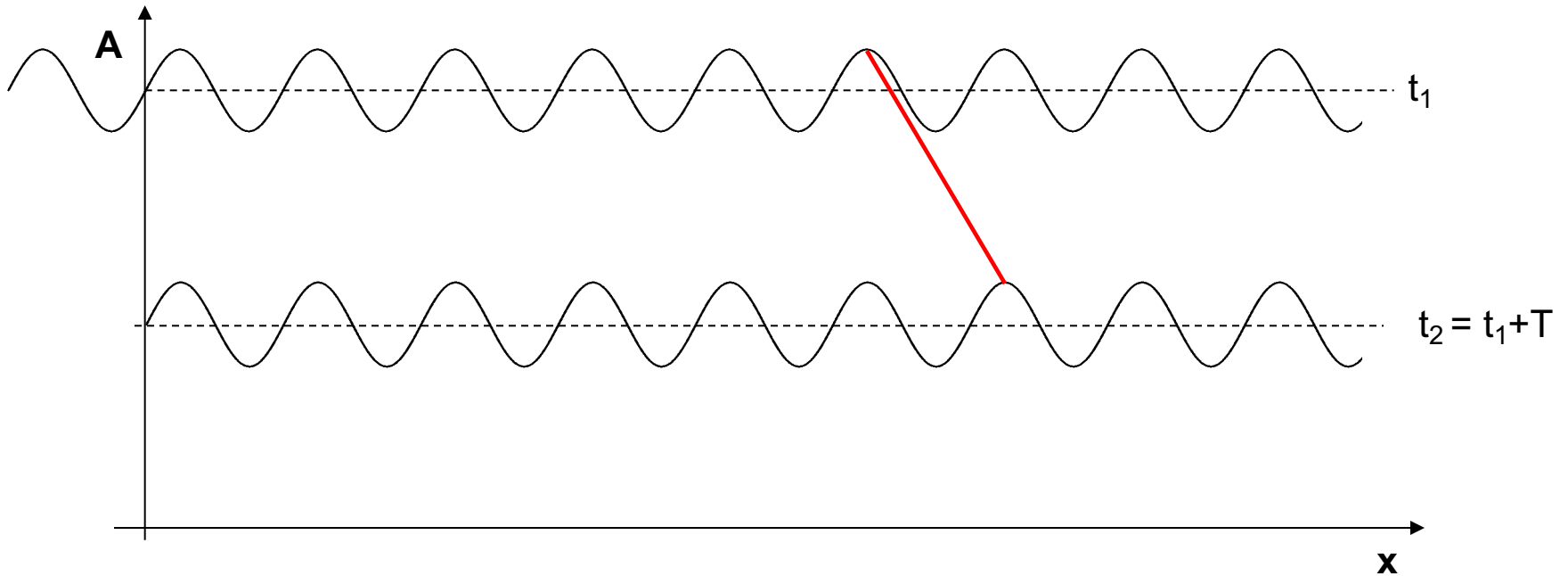
Lineare harmonische Welle

$$y(t, x) = A_0 \sin \left[\omega \left(t \pm \frac{x}{c} \right) \right]$$

Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu$$

Wellenausbreitung



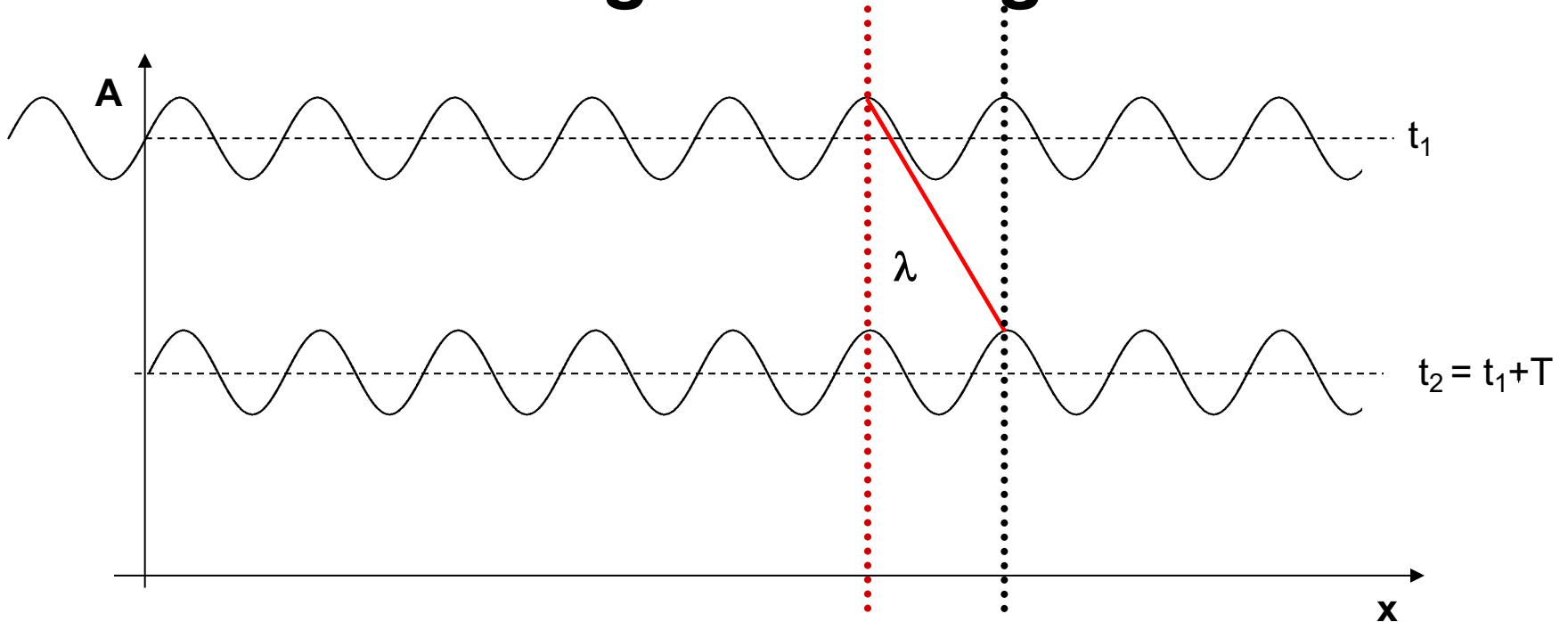
Welle, die sich mit der **Geschwindigkeit c** nach **rechts bewegt**:

$$y(t, x) = A_0 \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right]$$

Andere Darstellungen möglich

Der Ausdruck liefert die Auslenkung der Welle an jedem beliebigen Ort x zu jeder beliebigen Zeit t .

Wellenlänge, Wellenfrequenz, Wellengeschwindigkeit



Während einer Schwingungsdauer $T=1/\nu$ läuft die Welle um genau eine Wellenlänge λ weiter

**Ausbreitungsgeschwindigkeit =
Phasengeschwindigkeit:**

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu$$

Reflexion von Wellen

Bisher:

Welle kann sich in einem unendlichen Medium ungestört ausbreiten

Frage:

Was geschieht aber, wenn eine Welle auf ein Hindernis trifft?

Antwort:

Zumindest ein Teil der Welle wird reflektiert

Beispiele: Wasserwellen am Beckenrand, Schallwellen (Echo)



„Reflexion am festen Ende“

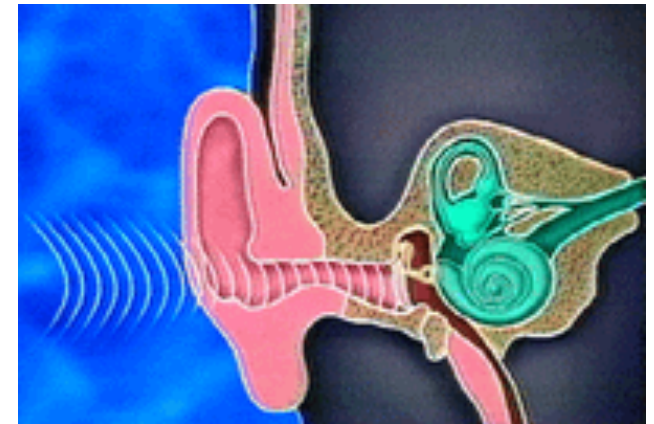


„Reflexion am losen Ende“

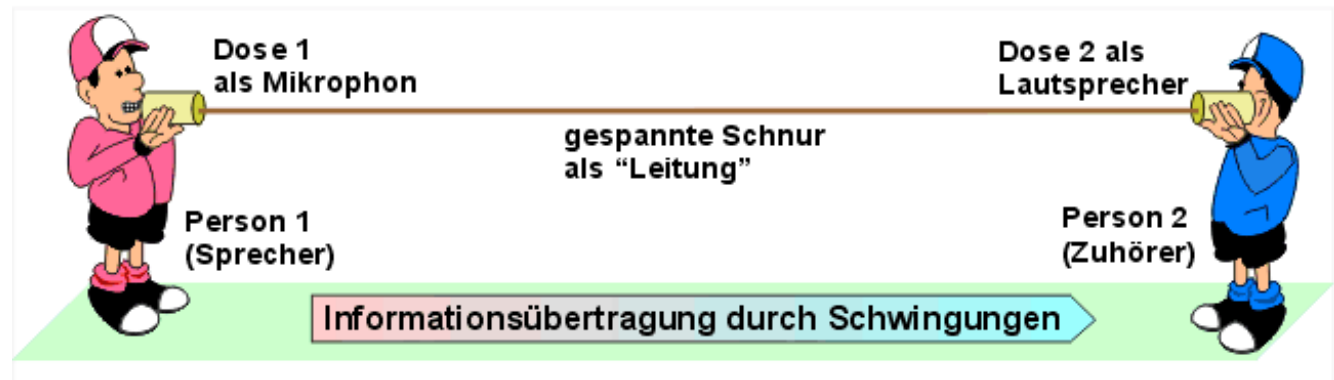
Akustik

Schallerzeugung & Schallwellen

- Schall ist mit unserem Hörsinn verbunden
- ohne Schall keine Kommunikation



„Kette“ der Schallübertragung:



1) Schallquelle

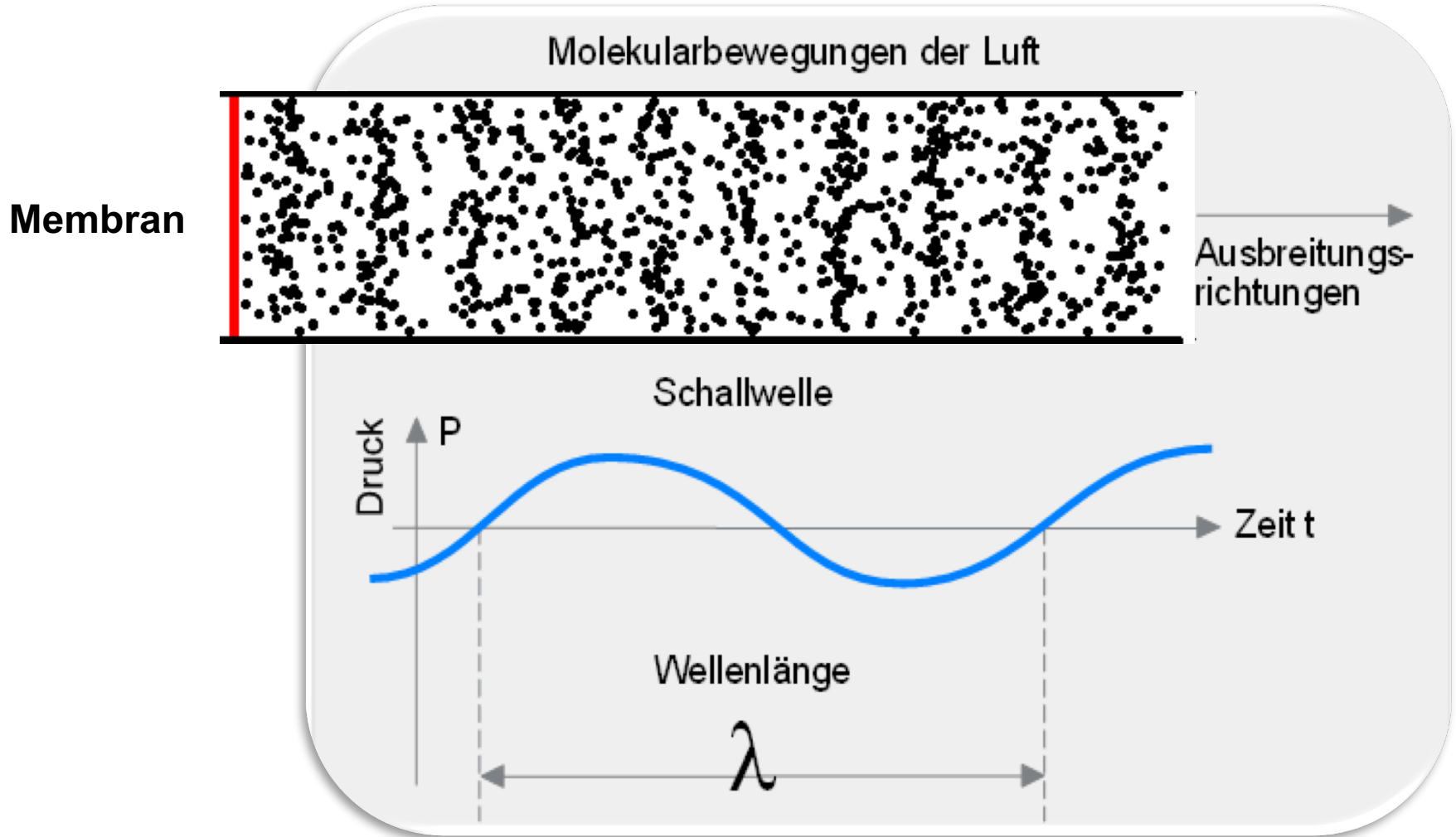
2) Energie wird in Form von **longitudinalen Schallwellen** übertragen

Schallwellen sind **elastische Schwingungen** von Atomen bzw. Molekülen in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern*

3) Schall wird über Ohr oder anderes Messinstrument nachgewiesen

*Schallausbreitung ist an ein Medium gebunden! Keine Schallausbreitung im Vakuum (Weltall)

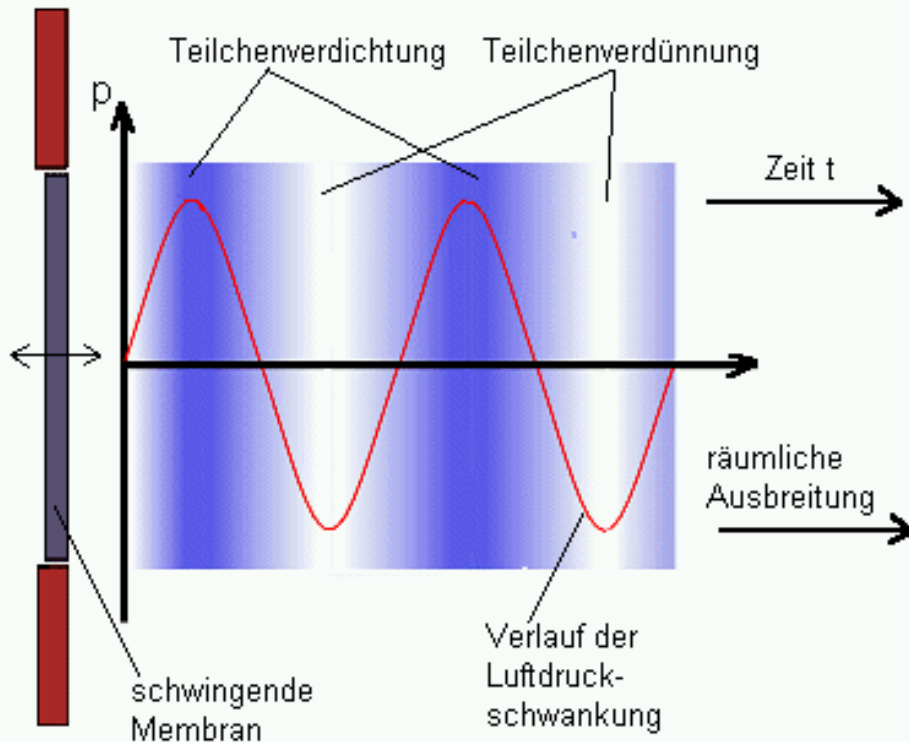
Schallwelle



Schallwelle

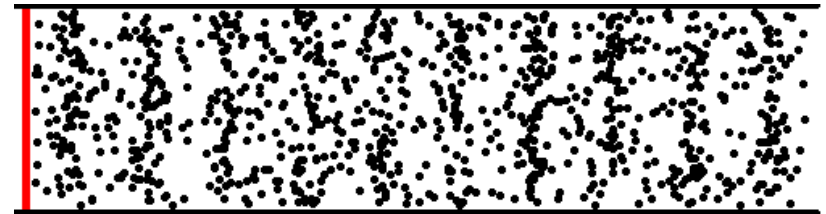
Schallerzeugung & Schallwellen

Schallwellen sind elastische Schwingungen von Atomen bzw. Molekülen in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern



In **Gasen** und **Flüssigkeiten** treten nur **longitudinale Wellen** auf

In **Festkörpern** gibt es auch **transversale Wellen**



Schallgeschwindigkeit:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu$$

Schallgeschwindigkeit

Hörbereich:	20 Hz – 20 kHz
Ultraschall:	20 kHz – 10 GHz
Med. Ultraschallgeräte:	oft 800 kHz-MHz
Hyperschall:	10 GHz – 10 THz

Schallgeschwindigkeiten:

Gasen

$$c = \sqrt{\frac{p \kappa}{\rho}}$$

ρ = Gasdruck
 κ = Adiabatenexponent
 ρ = Dichte

Luft: 331 m/s (Gewitter)
Helium: 1000m/s

Flüssigkeiten

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

K = Kompressionsmodul
 ρ = Dichte

Wasser: 1485 m/s

Festkörper

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

E = Elastizitätsmodul
 ρ = Dichte

Aluminium: 5080 m/s

Je höher die Kopplung, desto höher die Schallgeschwindigkeit

Schallquellen & Schallerzeugung

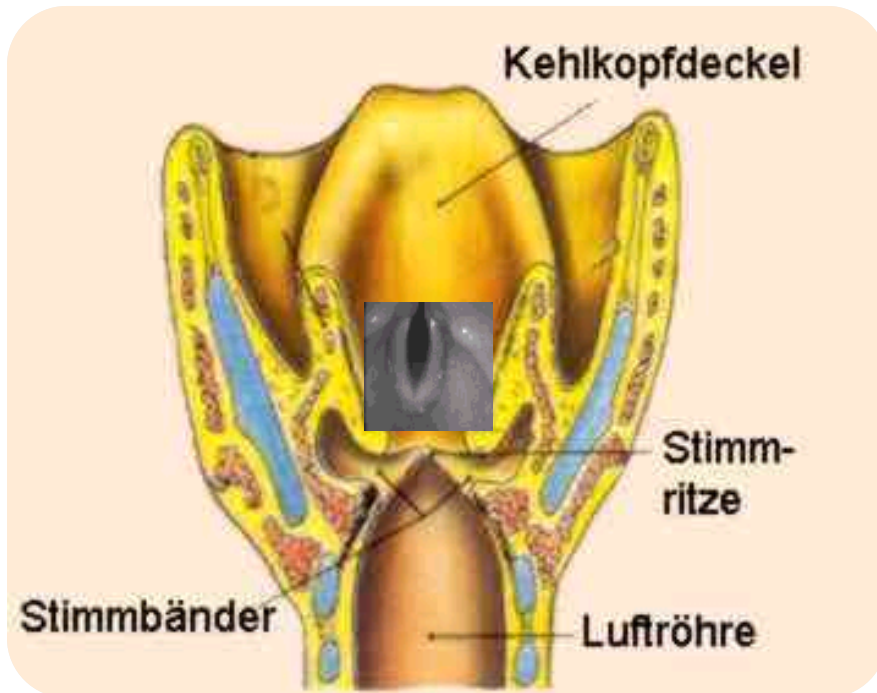
- 1) Die Quelle jeglichen Schalls ist ein schwingender Körper
- 2) Nahezu jeder Körper kann schwingen & somit eine Schallquelle sein
- 3) **Musikinstrumente:**
Durch Schlagen, Zupfen, Streichen, Blasen werden stehende Wellen erzeugt & die Quelle schwingt bei ihrer Resonanzfrequenz
- 4) Schwingende Quelle ist in Kontakt mit der Luft & übt einen Druck auf sie aus, woraufhin sich Schallwellen ausbreiten
- 5) **Schallfrequenz = Resonanzfrequenz der Quelle**



Menschliche Stimme

Menschliches Stimmorgan: Analog einer Zungenpfeife

- Luft strömt durch die Stimmritze zwischen den beiden Stimmbändern (Doppelzunge)
- Dabei entstehen periodische Luftdruckschwankungen, die das Luftvolumen im Kehlkopf, in der Mund- und Nasenhöhle anregen Resonator (Eigenschwingungen des Resonators)

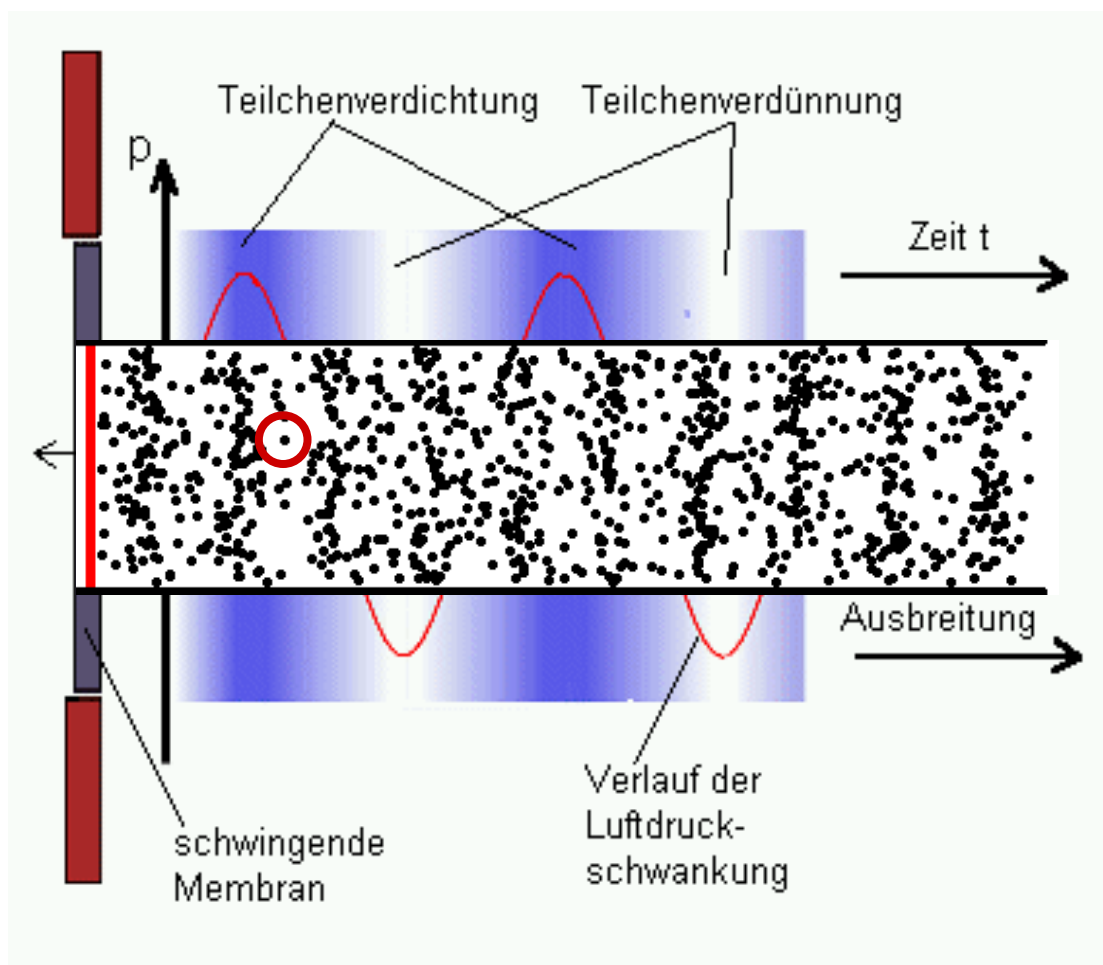


Modellversuch zu Stimmbändern



Schallfeldgrößen & Schallfeldwahrnehmung

Die Moleküle im Bereich einer Schallwelle schwingen um ihre Ruhelage mit einer **Auslenkung u** und einer Teilchengeschwindigkeit **$v = du/dt$** (ungleich der Schallgeschwindigkeit c) infolge eines **Schalldruckes p**



Schallfeldgrößen & Schallfeldwahrnehmung

Schallintensität oder Schallstärke = Energie/(Fläche*Zeit)

$$I = E / At = \frac{1}{2} \rho c v^2 = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho c}$$

E = Schallenergie

p = Schalldruck

c = Schallgeschwindigkeit

v = Teilchengeschwindigkeit

ρ = Dichte

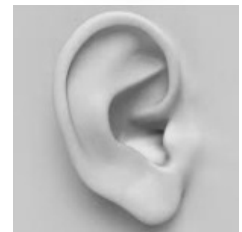
A = Fläche

Die **Schallstärke I** ist **objektiv** messbar mit einem Mikrophon

- Sprache 10^{-5} W/m²
- Zimmerlautsprecher 1 W/m²



Schallstärken I vergleicht man bei Menschen durch Angabe des **Schallpegels L** (*warum eigentlich?*)



Schallintensität

Menschl. Schallempfindlichkeit umfasst 12 Größenordnungen:

Brown`sche

Molekularbewegung $5 \cdot 10^{-13} \text{ W/m}^2$

Hörschwelle 10^{-12} W/m^2

Flüstern 10^{-10} W/m^2

Sprache 10^{-7} W/m^2

Schmerz 1 W/m^2

Wichtig:

Achten Sie auf den Zusammenhang zwischen Schallintensität & Schallpegel



Intensitäten verschiedener Geräusche

Schallquelle	Schallpegel (dB)	Intensität (W/m^2)
Jet in 30 m Entfernung	140	100
Schmerzgrenze	120	1
Lautes Rockkonzert	120	1
Sirene in 30 m Entfernung	100	$1 \cdot 10^{-2}$
Autofahrerkabine bei 90 km/h	75	$75 \cdot 10^{-5}$
Starker Straßenverkehr	70	$70 \cdot 10^{-5}$
Unterhaltung, 50 cm	65	$65 \cdot 10^{-6}$
Leises Radio	40	$40 \cdot 10^{-8}$
Flüstern	20	$20 \cdot 10^{-10}$
Laubrascheln	10	$10 \cdot 10^{-11}$
Hörschwelle	0	$1 \cdot 10^{-12}$

Schallintensität & Schallpegel

- 1) Menschl. Schallempfindlichkeit umfasst 12 Größenordnungen
- 2) Empfundene Lautstärke ist aber nicht proportional zur Schallintensität:
Ohr hört logarithmisch!!!!

Beispiel: Um Schall zu erzeugen, der doppelt so laut erscheint, ist eine Schallwelle mit 10-facher Intensität notwendig!!!

- 3) Wegen dieser Beziehung zwischen der **subjektiven Empfindung** der **Lautstärke** und der **physikalisch messbaren Intensität** verwendet man bei Menschen eine **logarithmische Skala**:

Der **Schallpegel** L jeglichen Schalls ist mit der **Schallintensität** I wie folgt verknüpft:

$$L = 10 \lg\left(\frac{I}{I_o}\right) \text{ dB} = 20 \lg\left(\frac{p}{p_o}\right) \text{ dB}$$

$$I \propto p^2$$

I_o ist die Intensität eines Tones von 1000Hz bei der menschlichen Hörbarkeitsschwelle 10^{-12} W/m^2

(entspricht einem Schalldruck von $p_o = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$)

Schallpegel: Beispiele

$$L = 10 \lg\left(\frac{I}{I_o}\right) \text{ dB} = 20 \lg\left(\frac{p}{p_o}\right) \text{ dB}$$

Flüstern

$$L = 10 \log\left(\frac{1.0 * 10^{-10} \text{ W / m}^2}{1.0 * 10^{-12} \text{ W / m}^2}\right) = 10 \log(100) = 20 \text{ dB}$$

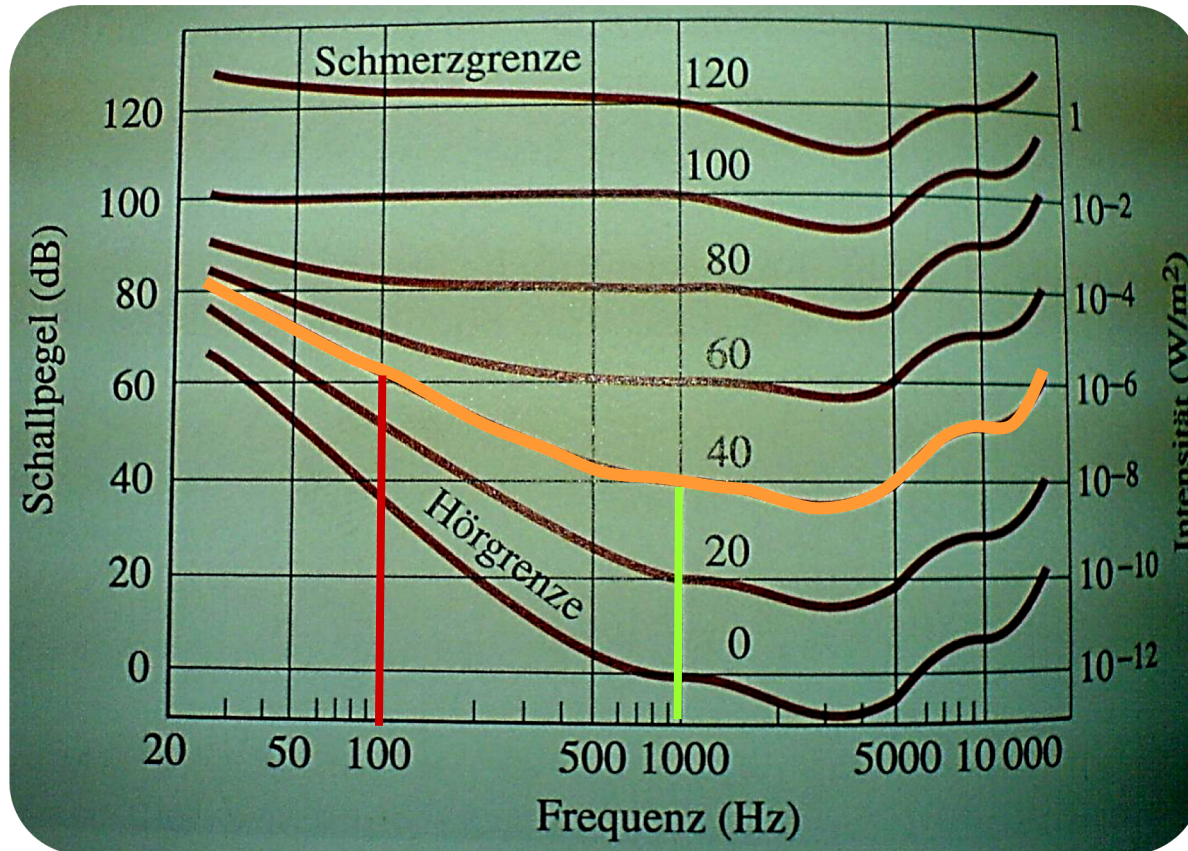
Weitere Beispiele:

- Hörgrenze: 0 dB
- Faktor 10 höhere Schallstärke: 10 dB
- Faktor 100 höhere Schallstärke: 20 dB

d.h. ein 20dB-Klang ist 10 mal stärker als ein 10 dB-Klang

Reaktion des Ohrs

- 1) Das Ohr ist nicht für alle Frequenzen gleich empfindlich
- 2) Um dieselbe Lautstärke für alle Schallfrequenzen zu hören, sind unterschiedliche Intensitäten notwendig



Aussage der Kurve, Beispiel:

Kurve „40“ steht für Töne, die von einer Durchschnittsperson als gleich laut empfunden werden, d.h. Ton mit 100Hz muss einen Pegel von ca. 62 dB haben, um genauso laut wie ein 1000Hz-Ton mit 40 dB empfunden zu werden