




Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion




Akustik

Experimentalphysik
Ulrich Stein



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion




Schallwellen

Elastische Wellen in Luft, Flüssigkeiten, Festkörpern

Schall-Ausbreitung
über (Schall-)Druck- bzw. Dichteschwankungen im
Ausbreitungsmedium

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c_s^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) = 0 \quad c_s = \text{Phasengeschwindigkeit}$$

in Luft: $c_s = 343 \text{ m/s}$ (20° C) \ll Lichtgeschwindigkeit
Temperaturabhängigkeit: $c(T) \sim \sqrt{T}$
in Wasser: $c_s = 1500 \text{ m/s}$, in Eisen: $c_s = 5100 \text{ m/s}$



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion


Schallwellen

Longitudinal-Wellen
da in Gasen und Flüssigkeiten keine Scherkräfte

Lösungen der DGL: ebene Wellen, Kugelwellen, ...

$$p(t, \vec{x}) = p_0 \cdot \cos(\omega \cdot t - \vec{k} \circ \vec{x})$$

vieles formal analog zu elektro-magnetischen Wellen:
 $\lambda = c_s / f$: Wellenlänge λ zur Anregung mit Frequenz f
 $\omega = 2\pi f$: Kreisfrequenz, $k = 2\pi / \lambda$: Wellenzahl
 p_0 : Amplitude der Druck- bzw. Dichteschwankung



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Schallschnelle

Teilchenbewegung: um $\pi/2$ zu Druck versetzt


$$\xi(t, \vec{x}) = \xi_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \vec{k} \circ \vec{x})$$

maximale Dichte = geringster Druck, etc.

Teilchengeschwindigkeit:

$$u(t, x) = \frac{\partial \xi}{\partial t} = \omega \cdot \xi_0 \cdot \cos(\omega \cdot t - k \circ x)$$

Schallschnelle (Geschwindigkeitsamplitude): $u_0 = \omega \cdot \xi_0$
Druckamplitude: $p_0 = \omega^2 \cdot \xi_0 \cdot \rho = u_0 \cdot c \cdot \rho$, ρ : Dichte




Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Das menschliche Ohr

empfindliches Schall-Nachweisorgan
ab ca. 20 Hz bis 20 kHz

Ohrmuschel (Lokalisation/Phasen, 2. Ohr),
Gehörgang, Trommelfell,
Gehörknöchelchen (Hammer, Amboss, Steigbügel),
Gehörschnecke mit Haarzellen (Hör-Nerven / Flüssigkeit)

Menschliche Sprache:
ab 100 Hz (Bass) bis 1000 Hz (Sopran)
Kammerton a = 440 Hz



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Töne und Klänge

zeitlich periodische Anregung

Fourier-Theorem: zerlegbar in **Grundton** zur Frequenz f und
Obertöne $n \cdot f$, ganzzahlige Vielfache von $\omega = 2\pi f$:

$$u(t,0) = a_1 \cdot \sin(\omega t) + a_2 \cdot \sin(2\omega t) + a_3 \cdot \sin(3\omega t) + \dots]$$

Klangfarbe: durch Verhältnis der Amplituden von
Grundton a_1 und Obertönen a_2, a_3, \dots



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion



Musikinstrumente


Stehende Wellen

$$L = \lambda/2$$


Grundton + Obertöne:

Saite (Klavier, Geige, Gitarre, ...),

Luftsäule (Saxofon, Trompete, Orgel, Flöte), ...



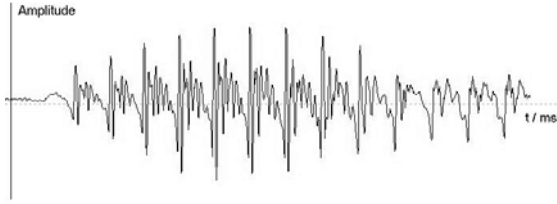
Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion




Geräusch vs. Ton

ebene Wellen: feste **Frequenz** (Ton) beim Ton-Erzeuger

im Allgemeinen jedoch beliebige Funktion der Zeit,
die sich aus vielen Frequenzen zusammensetzt und
sich im Raum als **Geräusch** ausbreitet.





Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion


Energietransport

kein Transport von **Materie** im zeitlichen Mittel
aber **Energie** wird durch die Welle transportiert,
gilt für alle Wellentypen (nicht nur Akustik)
z.B. Überschallknall oder Lichtwärme

Intensität: $I := \frac{P}{A}$ A: Querschnittsfläche
P: Leistung = Energie / Zeit

Intensitätspegel: $L_I := 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ dB}$

dB : Dezibel
Referenz-Intensität I_0 log wg. großem Bereich



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Schallstärke

Intensitätspegel: $L_I := 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ dB}$



Hörschwelle als Referenz-Intensität I_0

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

Frage: Intensitätspegel bei der Hörschwelle,
also L_I bei $I = I_0$?

Intensität von Schallwellen: $I = \frac{1}{2} c \rho \omega^2 \hat{\xi}^2$

Mikrofone registrieren Schalldruck p (nicht Leistung)
→ **Druckpegel:** $L_p = 20 \cdot \log(p / p_0) \text{ dB}$





Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Geräusche

Intensitätspegel:

I_0 : Hörschwelle

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


Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Phon (psychoakustische Lautstärke)

Kurven mit
gleichem
Lautstärkepegel
(Isophone):

empfundene
Lautstärke ist
frequenzabhängig,
gemessen mit
Sinus-Ton



Schalldämmung

Schalldämmmaß R (logarithmische Einheit)

Vermögen eines Bauteils (z.B. Wand),
den Schall zu dämmen

$$R = 10 \cdot \log(L_1 / L_2) \text{ dB} \quad \text{bzw.} \\ 20 \cdot \log(p_1 / p_2) \text{ dB}$$

L_2 : durchgelassene Intensität, L_1 : einfallende Intensität
(bzw. über den Schalldruck p)

abhängig von Frequenz und Einfallswinkel