

## Akustische Größen:

**Schalldruck:** 
$$p = \frac{F}{S} \quad \text{in} \quad \frac{N}{m^2} = Pa$$

S: Fläche ( $S_0=1m^2$ ) Bezugsschalldruck:  $p_0 = 20\mu Pa$

**Schallgeschwindigkeit:** 
$$c = \lambda \cdot f \quad \text{in} \quad \frac{m}{s} \quad ; \quad c_{Luft} = 343 \frac{m}{s}$$

**Schalleistung:** 
$$W = p \cdot v \cdot S = p \cdot q \quad \text{in} \quad W \quad ; \quad W_0 = 10^{-12} W$$

Schallschnelle  $v$  in  $\frac{m}{s}$  ; Schallfluss  $q = v \cdot S$  in  $\frac{m^3}{s}$

**Schallintensität:** 
$$I = p \cdot v \quad \text{in} \quad \frac{W}{m^2} \quad \text{mit} \quad I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$$

**Schallfeldimpedanz:** 
$$Z_S = \frac{p}{v} \quad \text{in} \quad \frac{Ns}{m^3} \quad \text{mit} \quad Z_0 = 414 \frac{Ns}{m^3} = \rho_{Luft} \cdot c_{Luft}$$

**Dichte:** 
$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{in} \quad \frac{kg}{m^3} \quad ; \quad \rho_{Luft} = 1,207 \frac{kg}{m^3}$$

## Pegel:

**Leistungsgrößen:** 
$$L = 10 \cdot \lg\left(\frac{W}{W_0}\right) dB \quad ; \quad L = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) dB$$

**Feldgrößen:** 
$$L = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right) dB \quad \Rightarrow \quad p = 10^{\left(\frac{L}{20}\right)} \cdot p_0$$

Anmerkung: 94dB bei 1Pa

**Addition v. Feldgrößen (kohärent -> Amplitudenverdoppel. => +6dB):**

$$p_{Ges} = p_1 + p_2 + p_3 + \dots \quad ; \quad L_{Ges} = 20 \cdot \lg\left(\frac{p_{Ges}}{p_0}\right) dB$$

$$\Rightarrow L_{Ges} = 20 \cdot \lg[10^{0,05 \cdot L_1} + 10^{0,05 \cdot L_2} + 10^{0,05 \cdot L_3} + \dots] dB$$

**Addition v. Leistungsgr. (inkohärent -> Leistungsverdoppel. => +3dB):**  
(Überlagerung von Schallen)

$$W_{Ges} = W_1 + W_2 + W_3 + \dots \quad \Rightarrow \quad L_{Ges} = 10 \cdot \lg[10^{0,1 \cdot L_1} + 10^{0,1 \cdot L_2} + 10^{0,1 \cdot L_3} + \dots] dB$$

**Mittelwert v. Leistungsgrößen:**

$$W_{Ges} = \frac{1}{3} \cdot (W_1 + W_2 + W_3) \quad ; \quad L = 10 \cdot \lg\left(\frac{W}{W_0}\right) dB$$

$$\Rightarrow L_{Ges} = 10 \cdot \lg[10^{0,1 \cdot L_1} + 10^{0,1 \cdot L_2} + 10^{0,1 \cdot L_3}] - 10 \cdot \lg(3) dB$$

**Beurteilungspegel unter Berücksichtigung der Beanspruchungszeit:**

$$W_r = \frac{1}{t_{Ges}} \cdot (t_1 \cdot W_1 + t_2 \cdot W_2 + t_3 \cdot W_3) \Rightarrow L_r = 10 \cdot \lg\left(\frac{W_r}{W_0}\right) dB$$

$$L_r = 10 \cdot \lg\left(\frac{t_1}{t_{Ges}} \cdot 10^{(0,1 \cdot L_1)} + \frac{t_2}{t_{Ges}} \cdot 10^{(0,1 \cdot L_2)} + \frac{t_3}{t_{Ges}} \cdot 10^{(0,1 \cdot L_3)}\right) dB$$

## Schallfelder:

**Freier Raum – FREIFELD (Schalltoter Raum):**

$$L_w = 10 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right)^2 + 10 \cdot \lg\left(\frac{S}{S_0}\right) = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right) + 10 \cdot \lg\left(\frac{S}{S_0}\right) = L + L_S dB$$

Vollkugel:  $S = 4\pi r^2 \rightarrow L = L_w - 20 \cdot \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - 11 dB$

Halbkugel:  $S = 2\pi r^2 \rightarrow L = L_w - 20 \cdot \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - 8 dB$

Viertelkugel:  $S = \pi r^2 \rightarrow L = L_w - 20 \cdot \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - 5 dB$

Achtelkugel:  $S = \frac{1}{2} \cdot \pi r^2 \rightarrow L = L_w - 20 \cdot \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - 2 dB$

mit  $r_0 = 1m$  und  $S_0 = 1m^2$

$L_w$ : Schalleistungspegel des Schallstrahlers

**Ebene Welle** -> Druck und Schnelle sind an jedem Ort zu jeder Zeit phasengleich

**Kugelwelle** -> Phasenunterschied zwischen Druck und Schnelle

## Innenräume – DIFFUSFELD (Hallraum):

$$L_w = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right) + 10 \cdot \lg\left(\frac{A}{4 \cdot A_0}\right) = L + L_s \text{ dB}$$

$$\text{Absorptionsfläche } A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i = \alpha \cdot S \quad \text{mit } A_0 = 1 \text{ m}^2$$

$\alpha$ : Schallabsorptionsgrad der Einzelfläche

$$\alpha = \frac{0,163 \cdot V \cdot (1/T_2 - 1/T_1)}{S} \quad \text{mit } T_1: \text{Nachhallzeit vor und } T_2 \text{ nach dem}$$

Einbringen einer Dämmmatte

$$\text{Schallpegeländerung: } \Delta L = 10 \cdot \lg \frac{A_2}{A_1} = 10 \cdot \lg \frac{T_1}{T_2}$$

## Nachhallzeit, Hallradius eines Raumes:

$$\text{Sabine - Formel: } T_N = 0,163 \cdot \frac{V}{A}$$

mit Raumvolumen  $V$  in  $\text{m}^3$ , Absorptionsfläche  $A$  in  $\text{m}^2$ ,

Nachhallzeit  $T_N$  in sec und Hallradius  $r_H$  in m

$$r_H = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{V}{T_N}} = 0,141 \cdot \sqrt{A}$$

In einem üblichen Raum breitet sich der Schall von der Quelle ausgehend zunächst frei aus, also nach dem **Abstandsgesetz**  $p \sim 1/r$  bis zum Hallradius  $r_H$ ,

Bei größeren Entfernungen  $r > r_H$  bleibt der Schalldruckpegel

konstant.

## Amplituden- / Leistungsverhältnisse => Pegelunterschied:

$$\text{Übertragungsmaß: } L = 20 \cdot \lg\left(\frac{A_2}{A_1}\right) \text{ dB} = 10 \cdot \lg\left(\frac{W_2}{W_1}\right)$$

$$\text{z.B.: } L_w = 36 \text{ dB} \Rightarrow \text{aus Tabelle } 6 \text{ dB} + 30 \text{ dB} \Rightarrow 4 \cdot 1000 = 4000 \quad \text{exakt: } \left(\frac{W_2}{W_1}\right) = 10^{\left(\frac{L_w}{10}\right)} = 3981$$

$\Delta L$ in dB	-40	-30	-20	-10	-6	-3	0	3	6	10	20	30	40
$W_2/W_1$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	0,1	0,25	0,5	1	2	4	10	100	$10^3$	$10^4$
$A_2/A_1$	$10^{-2}$	$\sqrt{10^{-3}}$	0,1	$\sqrt{0,1}$	0,5	$\sqrt{0,5}$	1	$\sqrt{2}$	2	$\sqrt{10}$	10	$\sqrt{1000}$	100

Schalldruck, Schallschnelle, Auslenkung usw. sind Feldgrößen (Amplituden  $A$ )

Schallintensitäten, Leistungen usw. sind Leistungsgrößen ( $W$ )

## Kennwerte von Signalen:

### Effektivwert (RMS), Klirrfaktor:

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{U_0^2 + U_{1\text{eff}}^2 + U_{2\text{eff}}^2 + U_{3\text{eff}}^2}$$

$$k = \sqrt{\frac{U_{2\text{eff}}^2 + U_{3\text{eff}}^2 + \dots}{U_{1\text{eff}}^2 + U_{2\text{eff}}^2 + U_{3\text{eff}}^2 + \dots}} = \sqrt{\frac{U_{2\text{eff}}^2 + U_{3\text{eff}}^2 + \dots}{U_{\text{eff}}^2}}$$

$$k = \sqrt{\frac{10^{0,1 \cdot L_2} + \dots + 10^{0,1 \cdot L_n}}{10^{0,1 \cdot L_1} + 10^{0,1 \cdot L_2} + \dots + 10^{0,1 \cdot L_n}}}$$

### Klirrdämpfung:

$$a_k = -20 \cdot \lg(k) \text{ in dB}$$

Beispiel: Pegeldifferenz -30dB

$$\rightarrow -30 \text{ dB} = 20 \cdot \lg(k) \rightarrow k = 10^{\frac{-30 \text{ dB}}{20}} = 3,16\%$$

**Weisses Rauschen:** Leistung pro Frequenzabschnitt konst.

**Rosa Rauschen:** Leistung pro Frequenzintervall konst.

### Abtasttheorem:

$$f_{\text{abt}} > 2 \cdot f_{\text{Signal}}$$

**CD:** Auflösung 16 Bit, Abtastfrequ. 44,1 kHz, Bitrate 705 kBit/s

**Stereo (Original):** Bitrate 1411 kBit/s

**MP3:** Layer 1: Kompression 1:4 / 384 kBit/s

Layer 2: K 1:6 bis 1:8 / 256 bis 192 kBit/s

Layer 3: K 1:10 bis 1:12 / 128 bis 112 kBit/s

### Wichtige Frequenzintervalle:

$$\text{Oktave: } f_2 / f_1 = 2:1 \quad ; \quad B = 0,707 \cdot f_m \quad \text{mit } f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad ; \quad B = f_2 - f_1$$

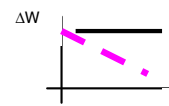
$$\text{Terz: } f_2 / f_1 = 1,26:1 \quad ; \quad B = 0,23 \cdot f_m \quad \text{mit } f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$$

$$\text{Halbton: } f_2 / f_1 = 1,06:1 = 2^{1/12} / 1 \quad ; \quad B = 0,058 \cdot f_m \quad \text{mit } f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$$

$$W \sim B \rightarrow \frac{W_1}{W_{\text{Ges}}} = \frac{B_1}{B_{\text{Ges}}} \sim \Delta L = 10 \cdot \lg(W_1) = 10 \cdot \lg\left(\frac{1}{n}\right)$$

$$\text{Terz} \hat{=} \frac{1}{3} \text{ Oktave} \quad ; \quad 12 \text{ Halbtöne} \hat{=} 1 \text{ Oktave} \quad ; \quad \text{Kammerton } a^1 = 440 \text{ Hz}$$

$$\text{z.B.: wieviel Halbtöne hat eine Quarte: } \frac{f_2}{f_1} = \frac{4}{3} \rightarrow 1,06^n = \frac{4}{3} \rightarrow n = \frac{\lg\left(\frac{4}{3}\right)}{\lg(1,06)} = 5$$



**WR:**

$\Delta W / \Delta f = \text{konst.}$

**RR:**

$\Delta W / \text{Terz} = \text{konst.}$

$\Delta W / \text{Oktav} = \text{konst.}$

.

## Wandlerprinzipien

Reversibel (passiv)			Irreversibel (aktiv)
Feld	Wandlerprinzip	Beispiele	<b>Kohlemikrofon</b> Transistormikrofon = reversibler Wandler + Verstärker
magnetisch	elektromagnetisch	Scheibenanker Ringanker Wippanker	Piezowiderstand (Te) Magnetowiderstand (In Sb Te)
	elektrodynamisch	Hörkapsel Lautsprecher Kopfhörer	
elektrisch	elektrostatisch (dielektrisch)	Kondensator- mikrofon Elektretmikrofon	Piezodiode Piezotransistor Zweischalenwecker
	piezoelektrisch	Piezokeramik- wandler Piezofolien- wandler	

**Elektrostatisch:**  
Kondensatormikrofon (**U!!**)  
Elektretmikrofon (keine Polarisationsspannung)

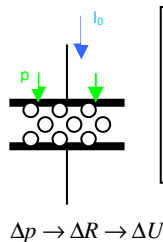
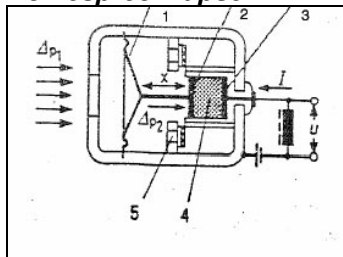
**Piezoelektrisch:**  
Piezofolienhörer  
Piezokeramikmikrofon

**Elektrodynamisch:**  
Lautsprecher  
Kopfhörer

**Elektromagnetisch:**  
Tonabnehmer beim Plattenspieler  
Hörer beim Hörgerät

Reversible Wandler: Schallempfänger UND Schallgeber  
Irreversible Wandler: entweder Schallempfänger ODER Schallgeber

### Kohlesprechkapsel:

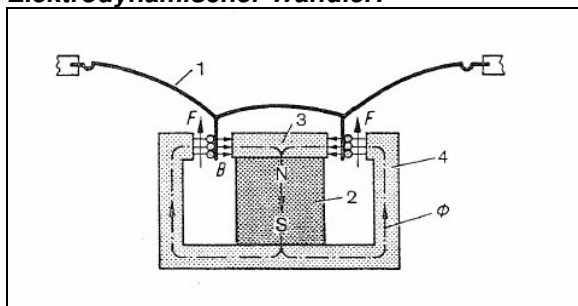


- |   |                  |
|---|------------------|
| 1 | Membran          |
| 2 | Membranelektrode |
| 3 | Kohlelektrode    |
| 4 | Kohlegießkammer  |
| 5 | Resonator        |

$$\Delta p \rightarrow \Delta R \rightarrow \Delta U$$

$$\text{Empfangsempfindlichkeit } B_e = \frac{U}{p} \approx \frac{500mV}{1Pa}$$

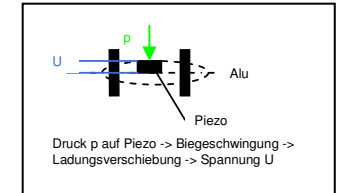
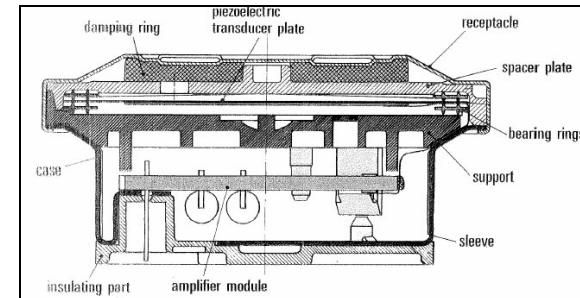
### Elektrodynamischer Wandler:



- |   |                      |
|---|----------------------|
| 1 | Membran              |
| 2 | Magnet               |
| 3 | Polplatte            |
| 4 | Topf<br>(Eisenkreis) |

**Wesentliche Bauelemente eines dynamischen Lautsprechers:**  
Magnetkreis mit Permanentmagnet, Schwingspule, Membran, Sicke, Korb, Chassis

### Piezoelektrischer Wandler:



### Wesentliche technische Daten eines Lautsprechers

Abmessungen, Einbaumaße (z.B. Volumen)

- Polarität (+, -)
  - Elektrische Belastbarkeit (z.B. Musikleistung, Sinusleistung)
  - **Impedanz** (z.B. 4 Ω bei 1 kHz)
  - **Frequenzgang** (z.B. +/- 3 dB zwischen 100 Hz und 10 kHz)
- Messung des Frequenzganges:
- Sinusförmiger Sweep
  - Anregung mit Rauschen und Messung der Übertragungsfunktion mit Hilfe der FFT -Analyse
  - Anregung mit kurzzeitigem Impuls und Messung bzw. Berechnung der Übertragungsfunktion mit der FFT-Analyse
- Bandbreite (z.B. Frequenzbereich 40 Hz bis 16 kHz)
  - Resonanzfrequenzen (z.B. Bass: f0 = 29 Hz)
  - **Wirkungsgrad** (z.B. abgegebene akustische Leistung zu aufgenommener elektrischer Leistung : 2%)

$$\eta = \frac{W_{ak}}{W_{elektr}}$$

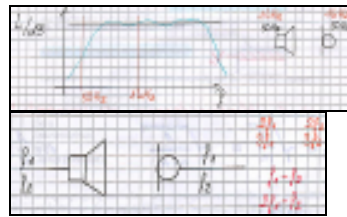
- **Empfindlichkeit, Übertragungsfaktor** (z.B. L=90 dB in 1m Entfernung bei 1W Leistungsaufnahme)

$$\text{Sendeempfindlichkeit: } B_s = \frac{p}{U} \text{ in } \left[ \frac{Pa}{V} \right]$$

$$\text{Empfangsempfindlichkeit: } B_e = \frac{U}{p} \text{ in } \left[ \frac{V}{Pa} \right]$$

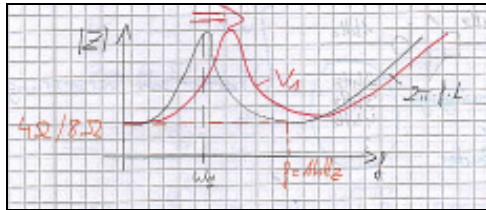
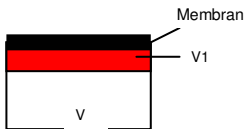
- Klirrfaktor (z.B. 1% bei 100 Hz und 1 W Leistungsaufnahme)

- Lineare Verzerrungen
- Nichtlineare Verzerrungen (harmonische Verzerrungen, Oberwellen)
- Intermodulationsverzerrungen
- Impulsverhalten / Dynamisches Verhalten
- Phasenverhalten
- SPL = Sound Pressure Level (typisch ~ 100dB bei 1W Leistung)



**Beeinflussung der Übertragungseigenschaften des Lautsprechers:**

- Schwingungsverhalten des schwingfähigen Systems das aus der eingespannten Membran (Material, Zentriermembran, Sicke usw.) besteht. Das angekoppelte Luftpolster sowie die Resonatoren beeinflussen zusätzlich den Frequenzgang.



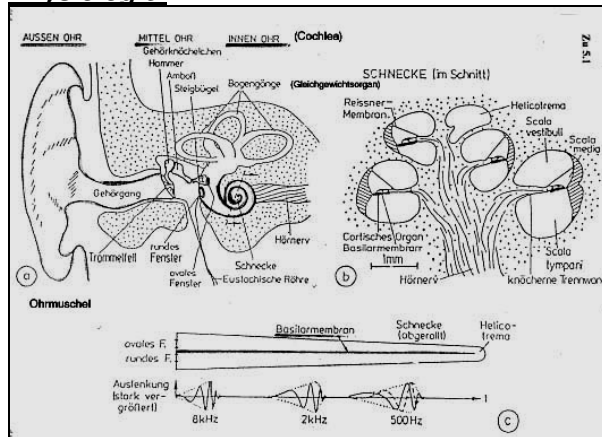
V1 => Volumenverkleinerung => Gesamtsteife s steigt => Impedanz steigt

$$w_s = \sqrt{\frac{s}{m}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot m}} ; n = \frac{1}{s}$$

s: Steife ; n: Nachgiebigkeit ; m: effektive Masse

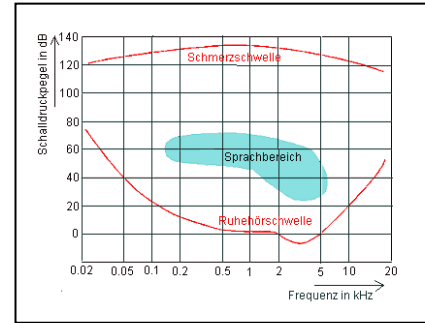
**Ohr als Informationsempfänger**

**Physiologie:**

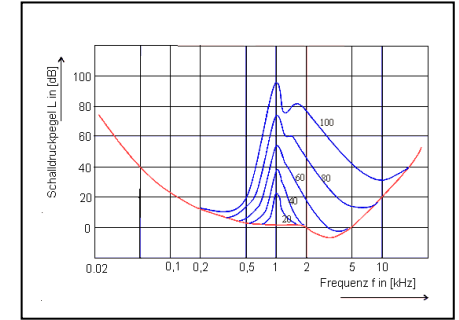


**Cortisches Organ:**  
Eigentliches Hörorgan innerhalb der Schnecke, enthält reizaufnehmende Sinneszellen in Form von mehrreihig angeordneten Haarzellen, deren Verbiegung durch wellenförmige Bewegungen Sinnesreize an das Gehirn weiterleiten.

**Psychoakustik – Hörfläche:**



(Hörfläche)



(Mithörschwelle)

**Schwellwert einer Empfindungsgröße:**

z.B. Hörschwelle (eben noch wahrnehmbarer Pegel eines Tons in Abhängigkeit von seiner Frequenz), eben wahrnehmbarer Pegelunterschied

**Absolutwert einer Empfindungsgröße:**

z.B. Lautstärke (Lautheit), Tonhöhe, Rauigkeit. Durch Bildung von Verhältnissen einer Empfindungsgröße kann die Empfindungsgröße selbst skaliert werden, in dem man noch einen Bezugspunkt festlegt (z.B.: Skala der Lautheit)

**Methode - Pendelndes Einregeln:**

Die Versuchsperson regelt den gesuchten Wert (z.B. Hörschwelle, eben wahrnehmbarer Pegelunterschied usw.) selbst ein.

**Methode - Abfragemethode:**

Der Versuchsleiter bietet der Versuchsperson Schalle zum Vergleich an, die sie auf die gesuchte Größe, z.B. gleiche oder doppelte Lautstärke zu beurteilen hat. Aus der Statistik der Aussagen der Versuchsperson kann schließlich die gesuchte Größe bestimmt werden.

**Mithörschwelle:**

Ton mit dem Pegel L, der durch ein Schmalbandrauschen verdeckt wird. Die blauen Kurven im Diagramm entsprechen der Maskierung (Verdeckung) durch das Rauschen.

**Lautstärkeempfindung – Lautheit:**

Lautheit in Abh. vom Pegel eines 1kHz-Sinustons. Die Einheit der Lautheit ist „sone“. Ankerpunkt ist dabei 1 sone bei einem Schalldruckpegel von 40dB.

$$N = 2^{0,1 \cdot (L-40dB)} ; N \sim p^{0,6} ; N \text{ in sone}$$

Schallereignis -> Schallfeldgröße z.B.: Schalldruck, Frequenz  
Hörereignis -> Empfindungsgröße z.B.: Lautstärke (Lautheit), Klangfarbe