

Sensorische Funktionen. Gehör und Audiometrie.

Balázs Kiss

kissb3@gmail.com

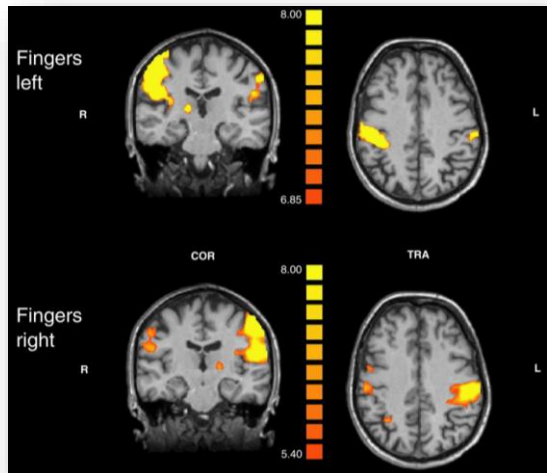


**KISSLAB - Myofilament-Mechanobiophysik Forschungsgruppe,
Semmelweis Universität,
Institut für Biophysik und Strahlenbiologie.**

17. Mai 2025.

Historie der Wahrnehmung / Perzeption

- **cardiozentrische These** (Aristoteles)
 - Das Herz ist das Zentralorgan der Wahrnehmung und des Seelenlebens.
 - Begründung: das Gehirn ist unempfindlich gegenüber mechanischer Reizung.
- **cephalozentrische These** (Galen)
 - Das Gehirn ist das Zentralorgan der Wahrnehmung. (genauer: Hirnventrikel)
- **moderne These**
 - Thomas Willis (1621-1675): Ort der Wahrnehmung: grauen und weißen Massen der Hirnwände

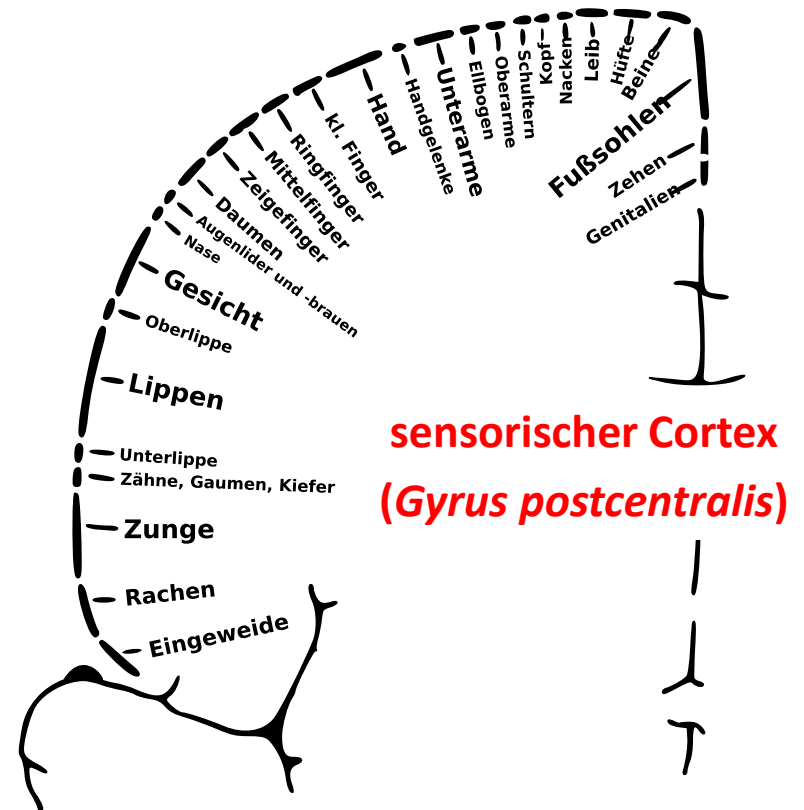


fMRI: BOLD-
Mappe
(Blood-
Oxygen-
Level-
Dependent
Imaging)

„**Sensus Communis**“: 5 Sinnesmodalitäten:
sehen, hören, schmecken, riechen, fühlen

sensorischer Homunkulus

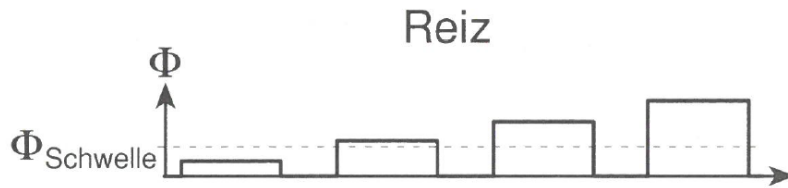
Punkt-zu-Punkt-Zuordnung zwischen der
Körperperipherie und dem Gehirn.



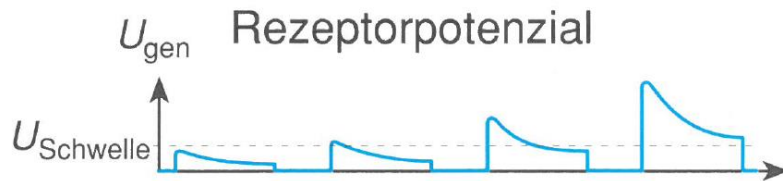
sensorischer Cortex
(Gyrus postcentralis)

Kodierung der Reizstärke

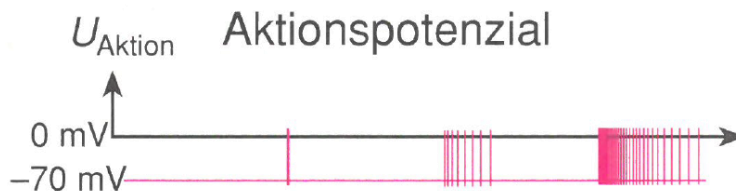
- **adäquater Reiz:** wofür ein Rezeptor die größte Empfindlichkeit besitzt



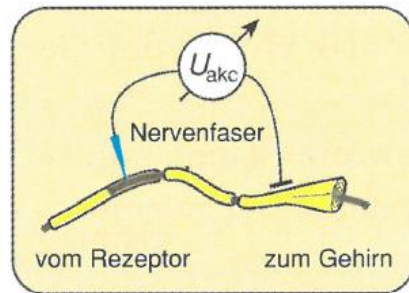
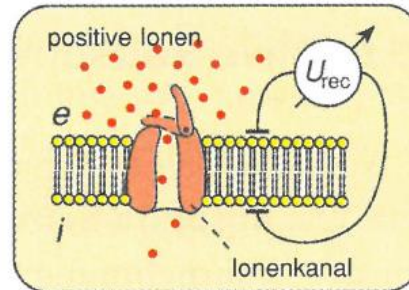
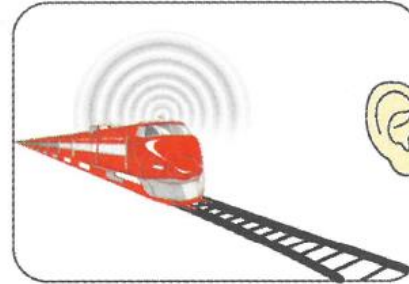
- **Amplitudenkodierung:** $U_{\text{gen}} \sim \Phi$
- **Adaptation**



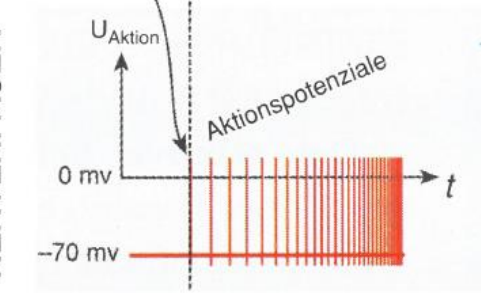
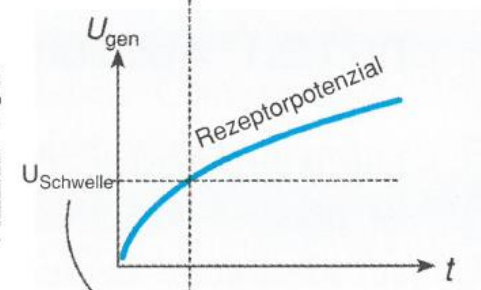
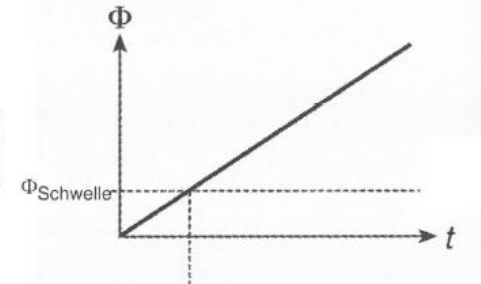
- **Frequenzkodierung:** $f_{\text{AP}} \sim \Phi$
Modalität (Typ), Intensität, Zeitdauer, Ort, usw.



Prozess: Gehör



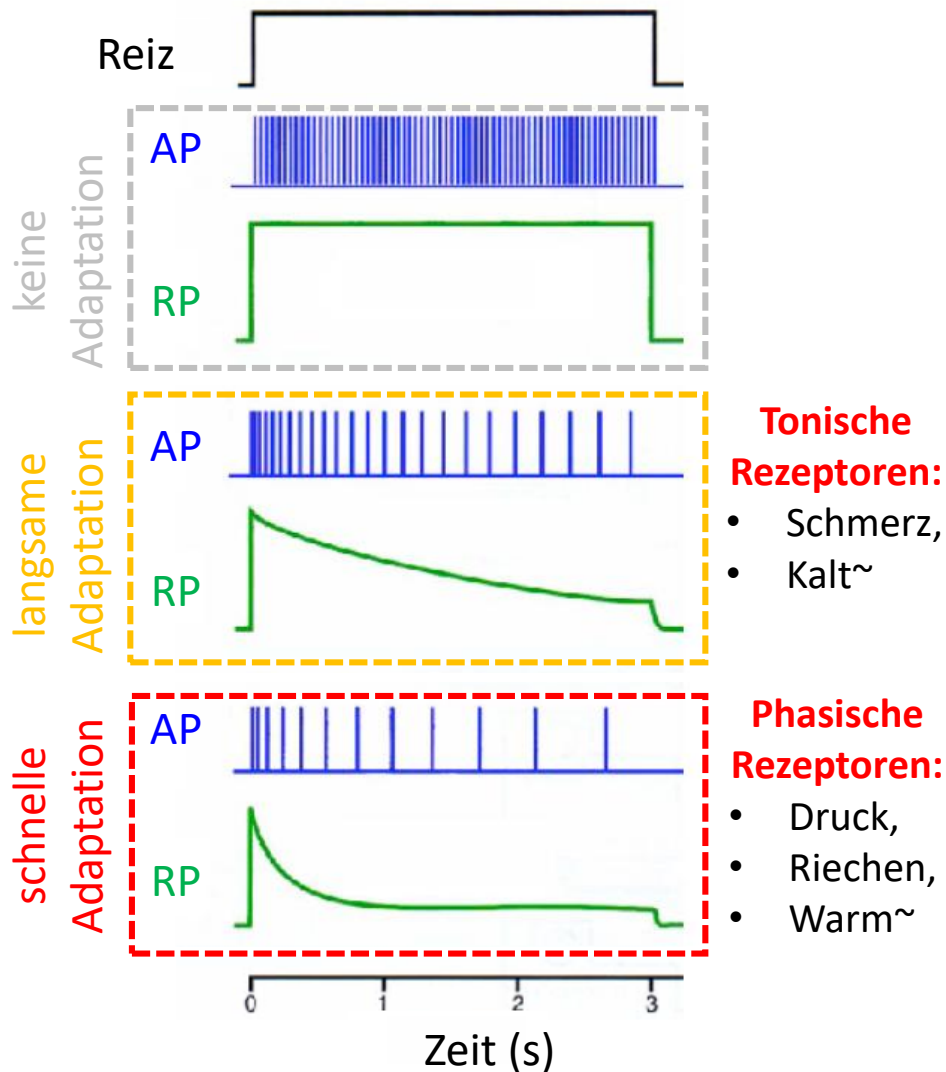
gemessenes Signal



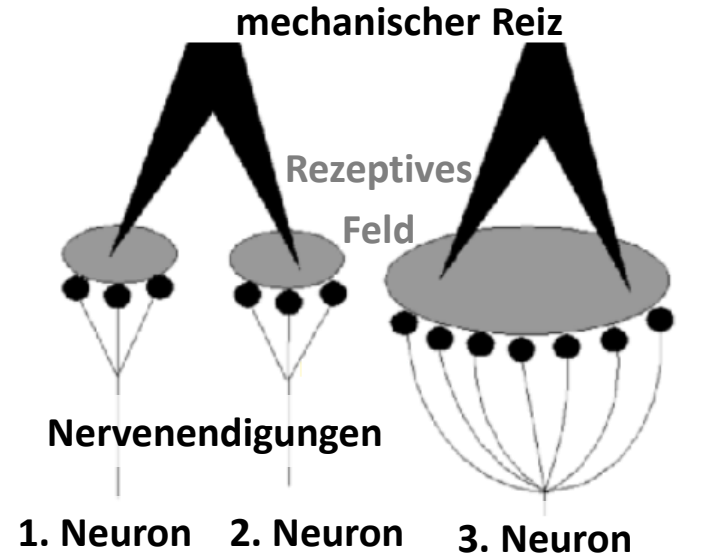
$$T_{\text{AP}} \quad f_{\text{AP}} = \frac{1}{T_{\text{AP}}}$$

Spezifische Aspekte der Rezeptoren

Zeitdauer, Adaptation

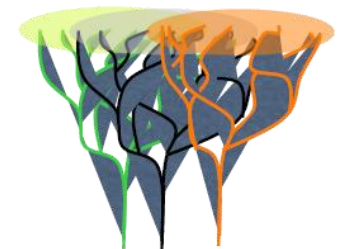


Ortsbestimmung



Rezeptives Feld: Bereich von Sinnesrezeptoren, der an ein einziges nachgeschaltetes Neuron Informationen weiterleitet.

- Konvergenz
- Überlappung



ψ ϕ Psychophysische Gesetze

Weber-Fechner Gesetz

Die Änderung der Empfindungsstärke ist proportional zur relativen Änderung der Reizstärke.

LOG

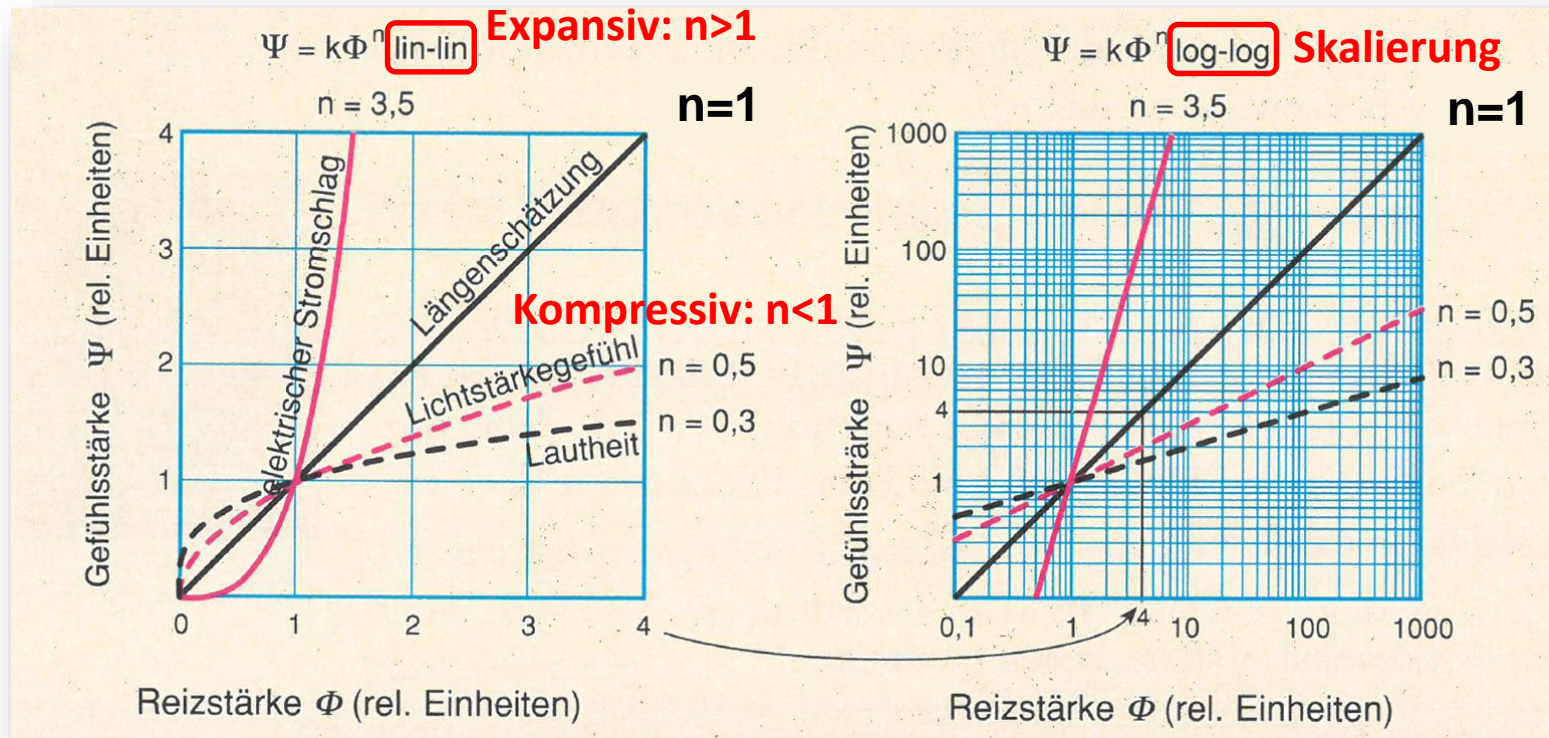
$$\Delta\psi \sim \Delta\left(\frac{\Phi}{\Phi_0}\right) \rightarrow \psi = \text{konst} \cdot \lg \frac{\Phi}{\Phi_0}$$

Stevens Gesetz

Die relative Änderung des Gefühls ist proportional zur relativen Änderung der Reizstärke.

POTENZ

$$\Delta\left(\frac{\psi}{\psi_0}\right) \sim \Delta\left(\frac{\Phi}{\Phi_0}\right) \rightarrow \psi = \text{konst} \cdot \left(\frac{\Phi}{\Phi_0}\right)^n$$



Das Gehör: Physikalische Größen

• Tonhöhe

- „... hängt so von der **Frequenz der Schwingung** ab...” (Galilei)
- relativen Höhe: f_2/f_1

Oktave: Frequenzverhältnis von 2:1

$$n_{\text{Oktave}} = \log_2 \frac{f_2}{f_1}$$

• Klangfarbe

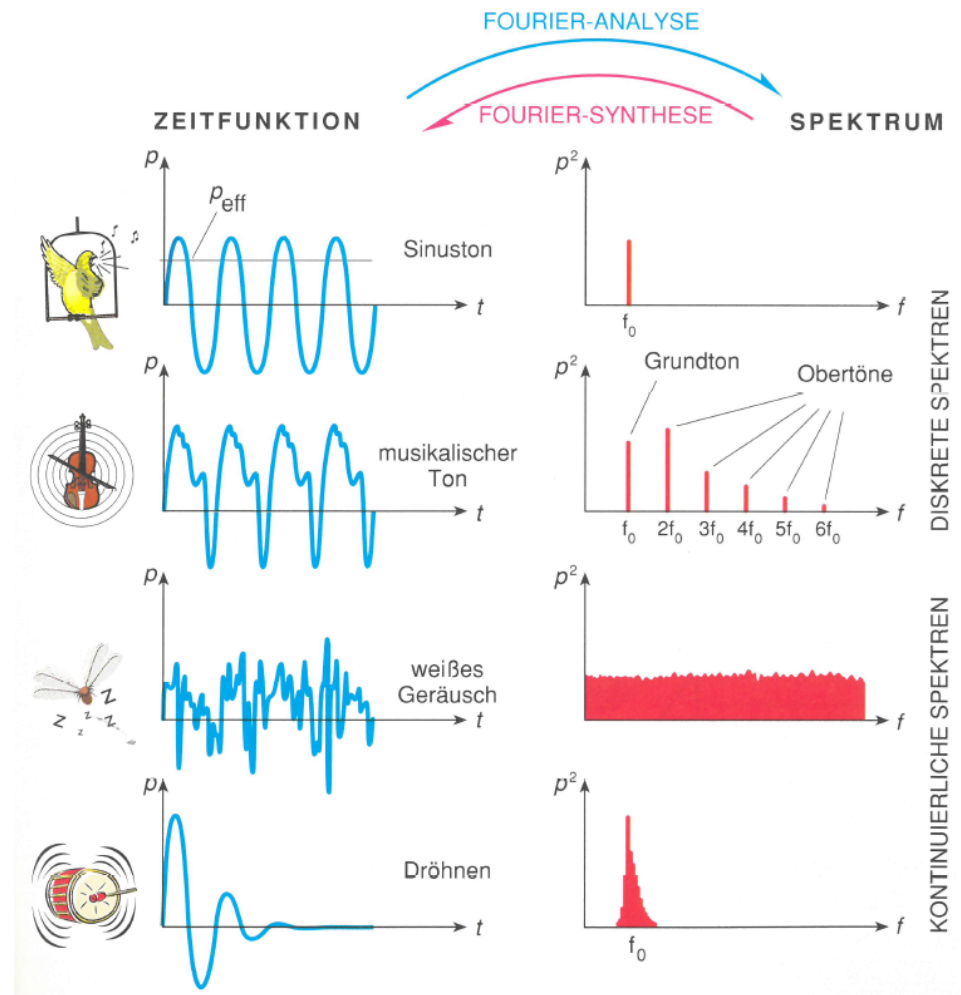
- „... wird von der **Frequenz und der relativen Stärke der sog. Obertöne...** d. h. vom **Schwingungsspektrum** des **Tones** bestimmt.” (Helmholtz)

• Sinuston:

$$p(t) = p_{\text{max}} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

• musikalischer Ton:

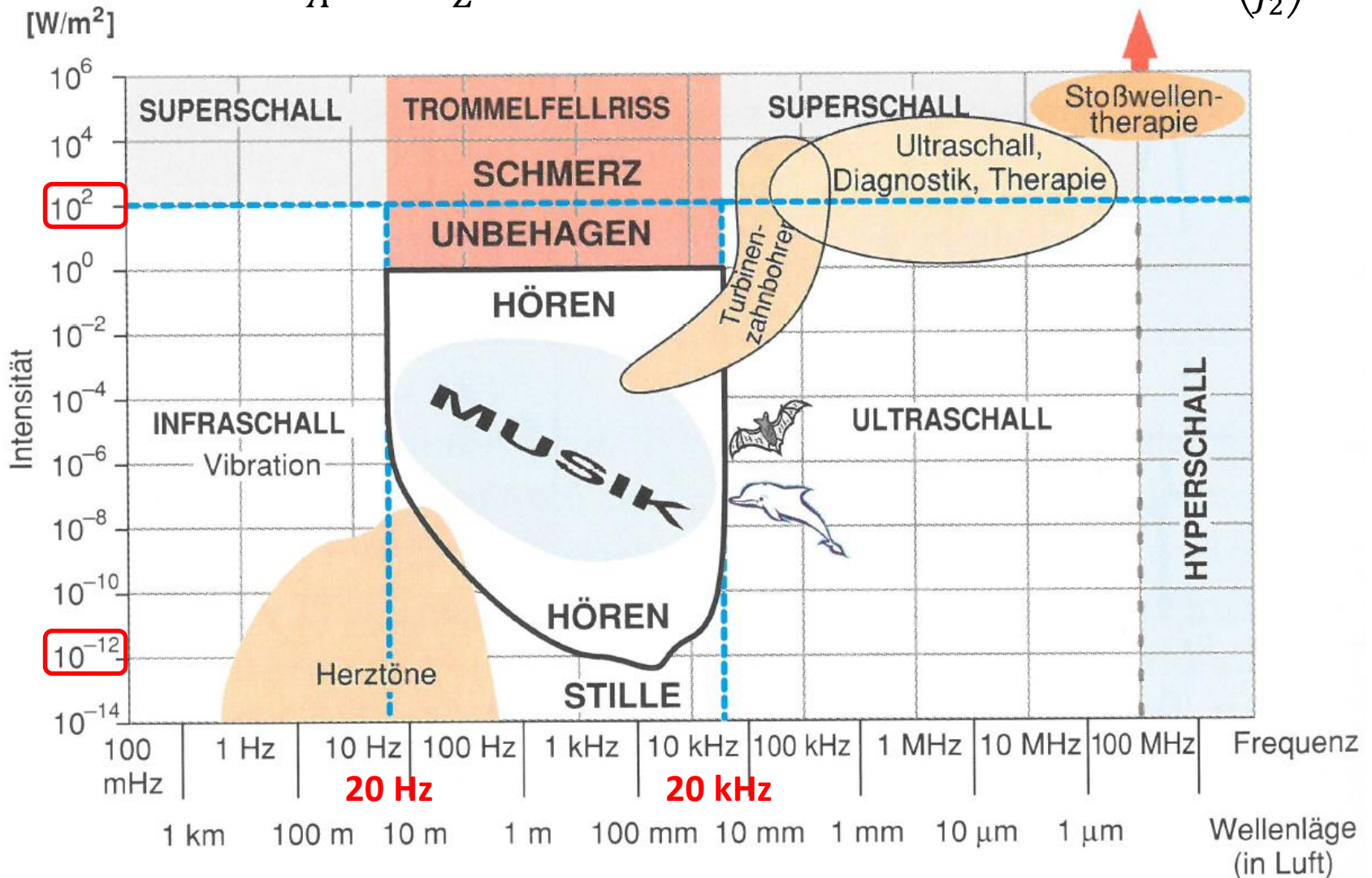
$$p(t) = p_1 \cdot \sin(\omega t) + p_2 \cdot \sin(2\omega t) + p_3 \cdot \sin(3\omega t) + \dots$$



Frequenz- und Intensitätsbereiche der Töne

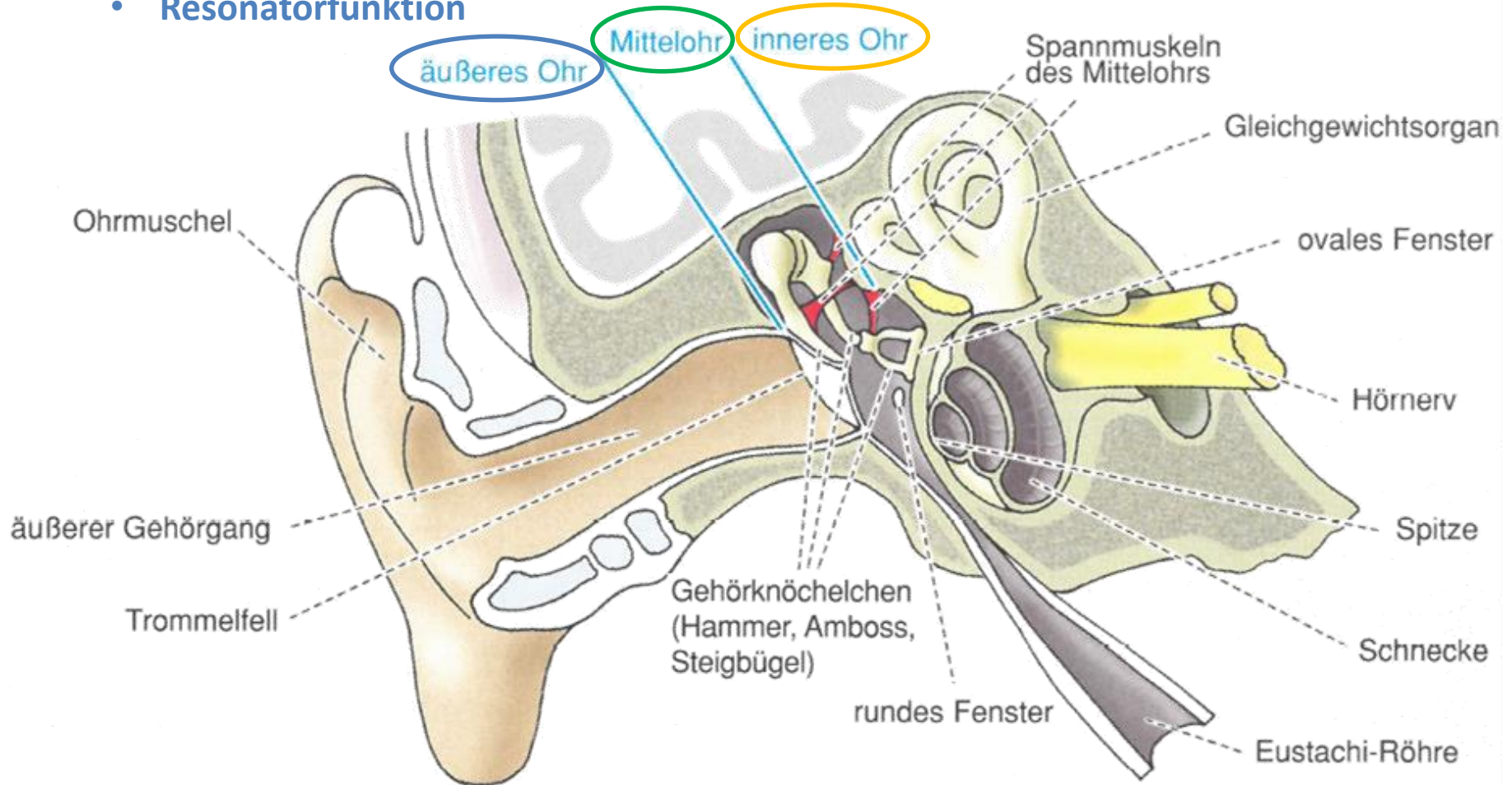
Schallintensität: $J = \frac{P}{A} = \frac{p_{eff, Schall}^2}{Z}$

Schallintensitätspegel: $n \text{ (dB)} = 10 \cdot \lg \left(\frac{J_1}{J_2} \right)$

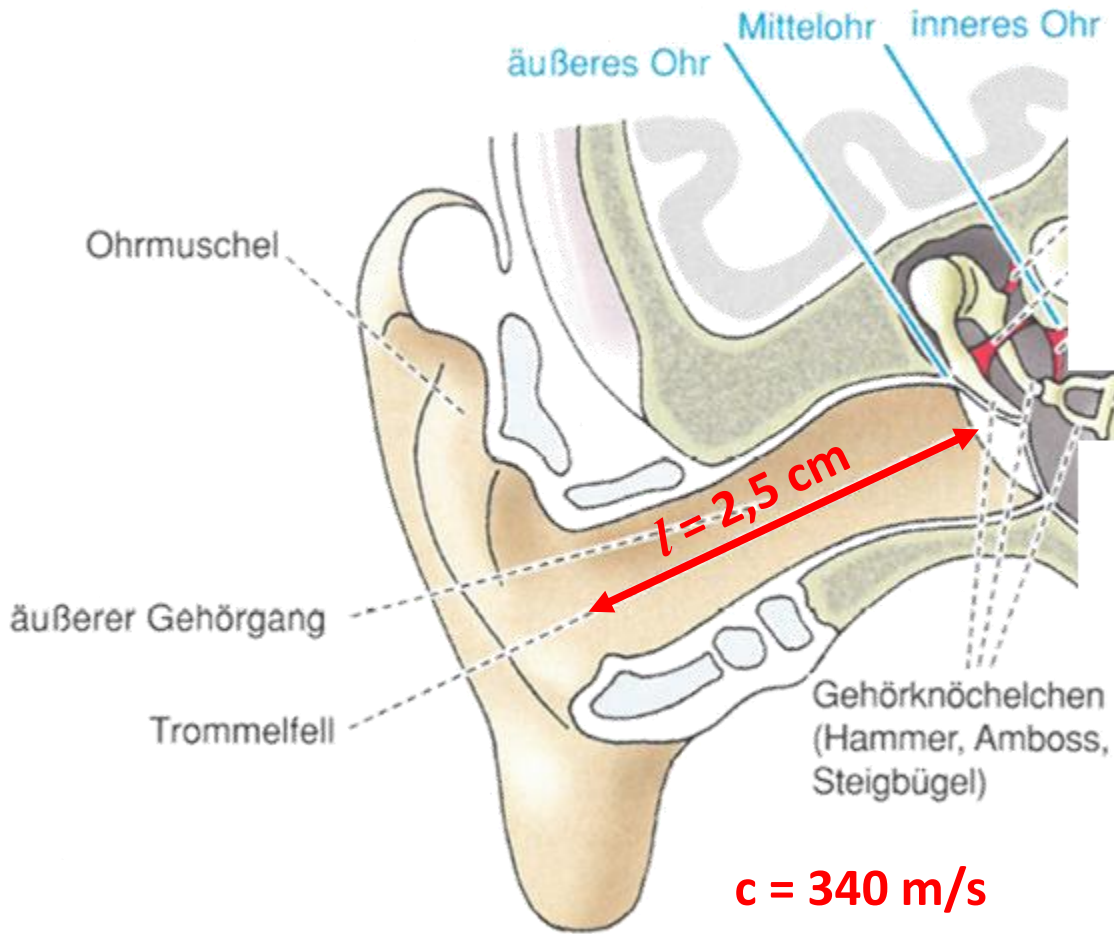


Das Ohr – Überblick

- Impedanzanpassung
- Verstärkung
- Resonatorfunktion
- Schallempfindung
- Beschleunigungsempfindung



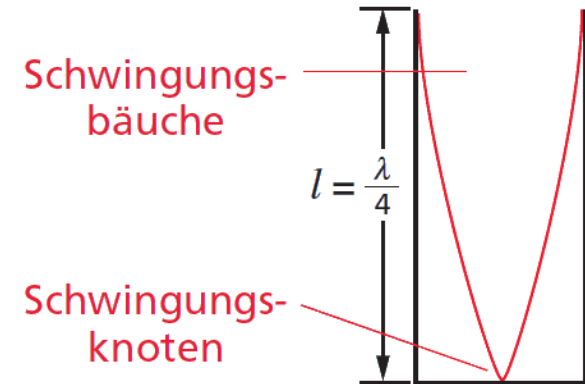
Resonatorfunktion des Außenohres



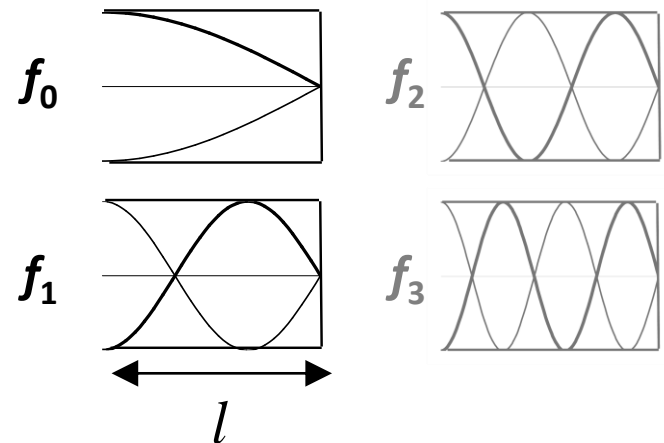
$$c = 340 \text{ m/s}$$

$$f_0 = \frac{340}{0,1} = 3400 \text{ Hz}$$

Resonanz bei einer geschlossenen Pfeife

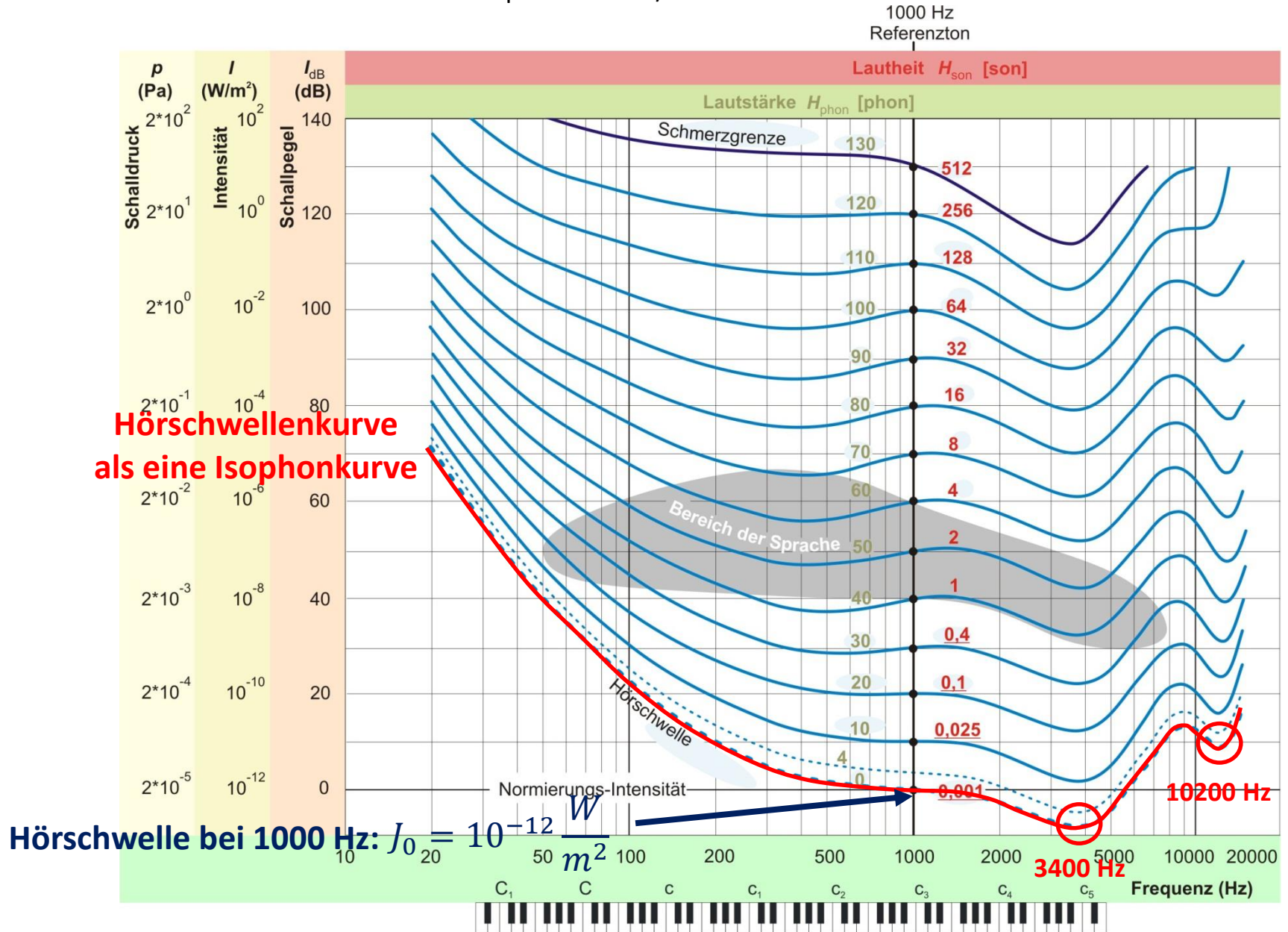


$$f_0 = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4 \cdot l}$$



Kurven gleicher Lautstärke

isophon Kurven / Fletcher Kurven



Das Mittelohr als Impedanzanpassner

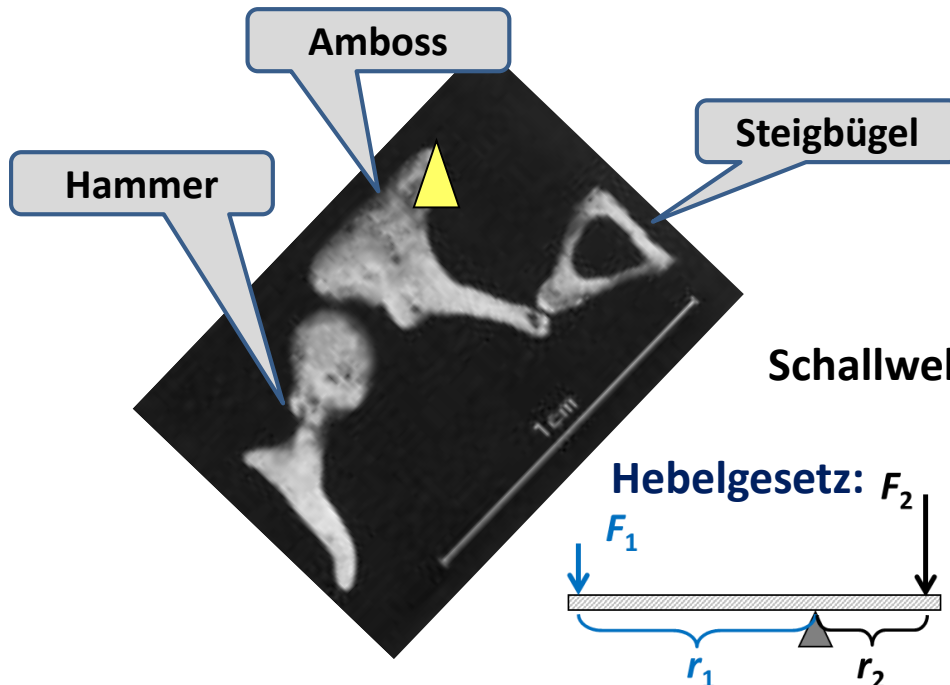
Problem: Reflexion der Schallwellen durch die Grenzfläche Luft/Gewebe

$$R = \frac{J_{\text{refl}}}{J_{\text{ein}}} \approx \left(\frac{Z_{\text{Wasser}} - Z_{\text{Luft}}}{Z_{\text{Wasser}} + Z_{\text{Luft}}} \right)^2 = 0,9989 \quad !$$

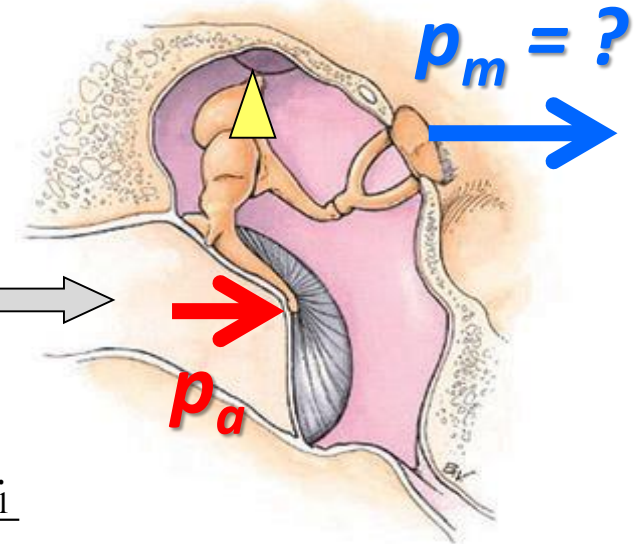
Modell des Gewebes: Wasser
Akustische Impedanz: $Z = \rho \cdot c$

$$J_{\text{Trommelfell}} = 1 - R = 0,0011 \cdot J_{\text{ein}} = 0,11\%$$

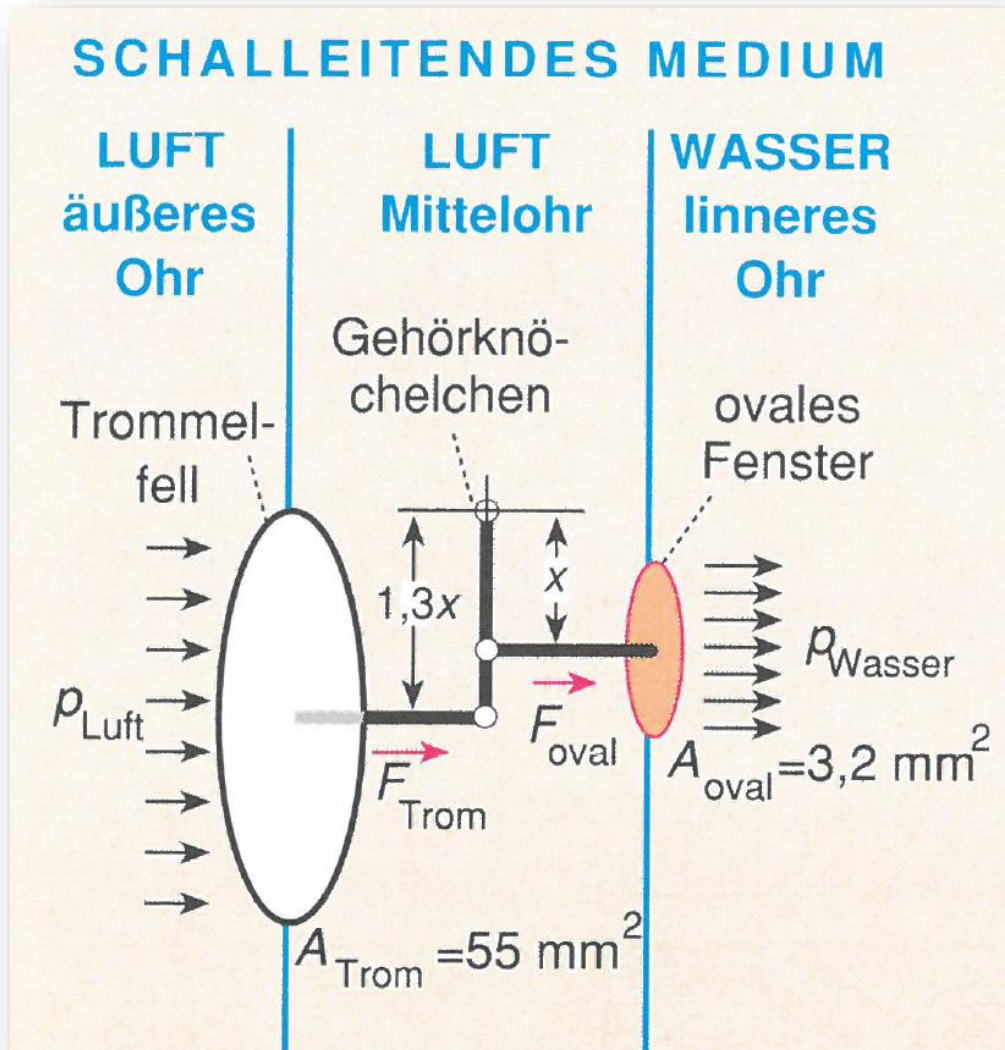
Die Funktion von Gehörknöchelchen: Verstärkung durch ein **Hebel**system



Schallwellen \Rightarrow



Die Druckerhöhung im Mittelohr



Druckverstärkung:

- Hebel
- Flächenverkleinerung

$$p_{\text{Wasser}}/p_{\text{Luft}} = \mathbf{22,3}$$

$$p_{\text{oval}} = F_{\text{oval}}/A_{\text{oval}} = p_{\text{Luft}} \cdot \mathbf{1,3} \cdot \mathbf{55/3,2}$$

Intensitätsverstärkung:

- **etwa 125-fach**

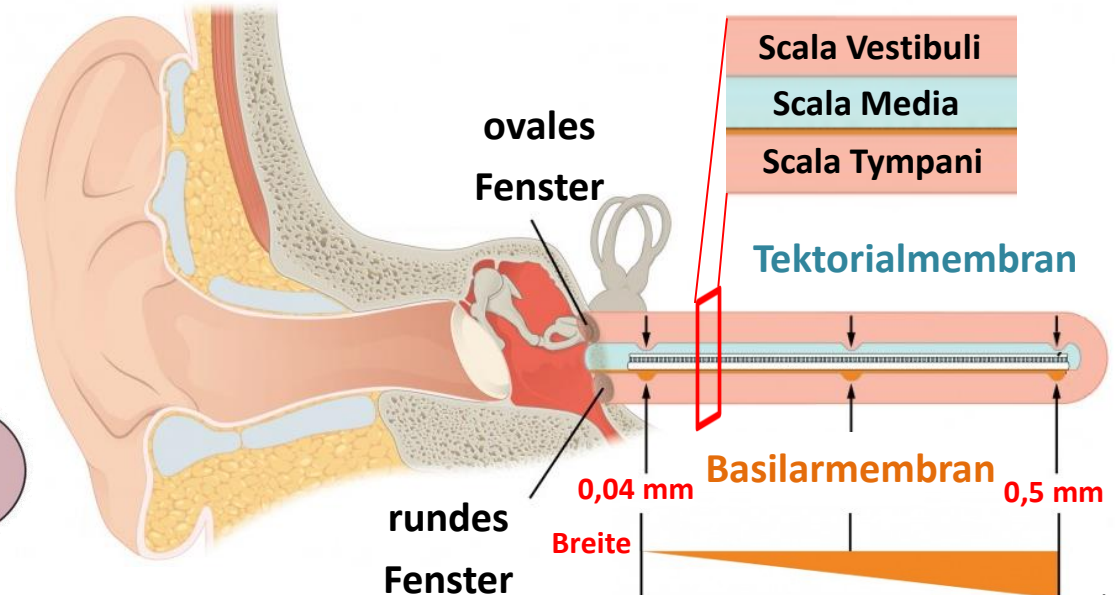
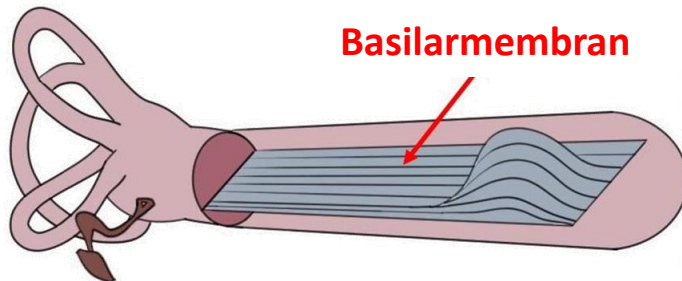
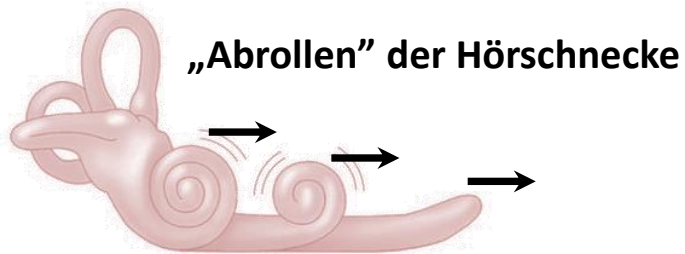
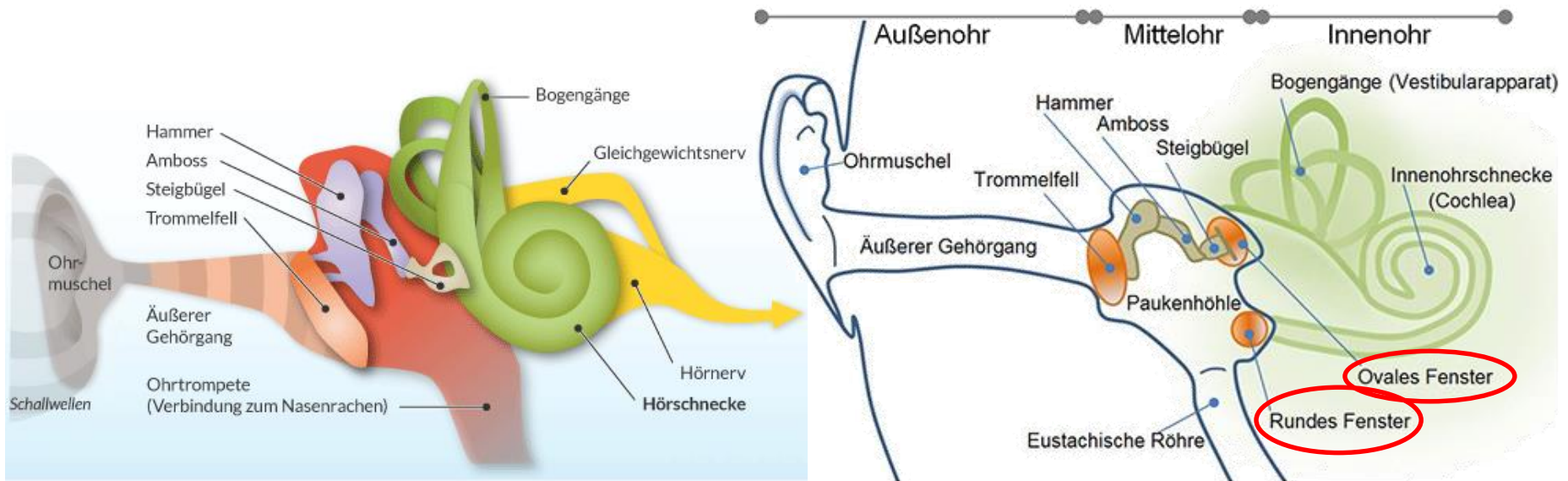
$$Z_{\text{Luft}} = 1,2 \cdot 340 = 408 \text{ rayl}$$

$$Z_{\text{Wasser}} = 1000 \cdot 1500 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ rayl}$$

$$\frac{J_{\text{Wasser}}}{J_{\text{Luft}}} = \frac{\frac{p_{\text{Wasser}}^2}{Z_{\text{Wasser}}}}{\frac{p_{\text{Luft}}^2}{Z_{\text{Luft}}}} = \left(\frac{p_{\text{Wasser}}}{p_{\text{Luft}}} \right)^2 \frac{Z_{\text{Luft}}}{Z_{\text{Wasser}}}$$

$$\left. \begin{array}{l} J_{\text{Wasser}}/J_{\text{Luft}} = 0,135 \\ \text{vgl. mit } J_{\text{Trommelfell}} = 0,0011 \end{array} \right\} \frac{0,135}{0,0011} \sim 125$$

Aufbau des Innenohres



Schallempfindung im Innenohr

- „Saitentheorie“

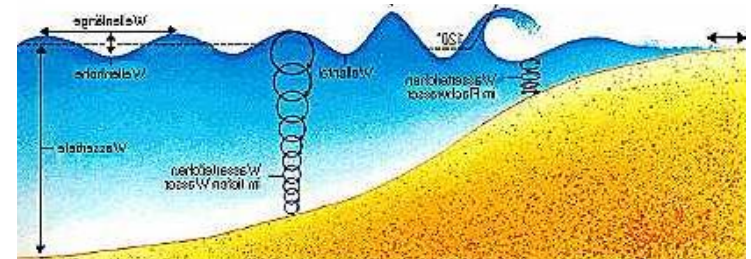
- Hermann von Helmholtz (1821-1894)
- Die Querfasern der Basilarmembran schwingen als **stehende Wellen** bei der entsprechenden Tonhöhe („Saitenresonanz“).
- Falsch!



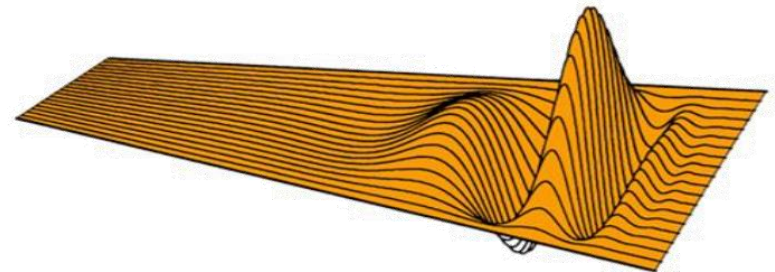
- **Wanderwellen-Theorie**

- Georg (György) von Békésy (1899-1972)
- Nobel-Preis: 1961
- Hydraulische Druckwelle am ovalen Fenster gleicht sich am runden Fenster aus,
- Reibung auf Basilarmembran: fortpflanzende Oberflächenwellen.

Die Wellen sind am Boden abgebremst:
Kreisbahn verzerrt, die Welle kippt nach vorn über.

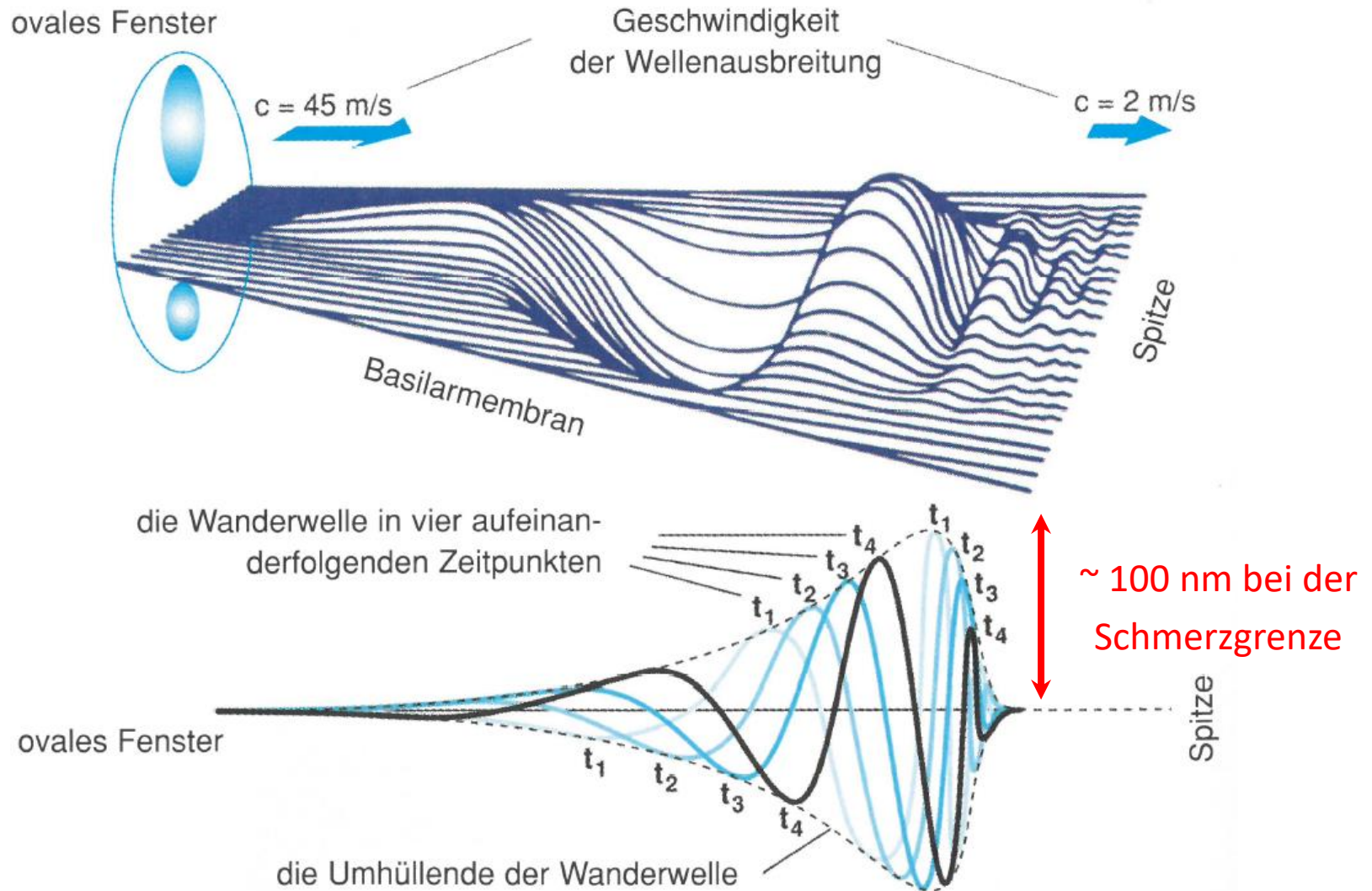


Laufrichtung der Wellen →

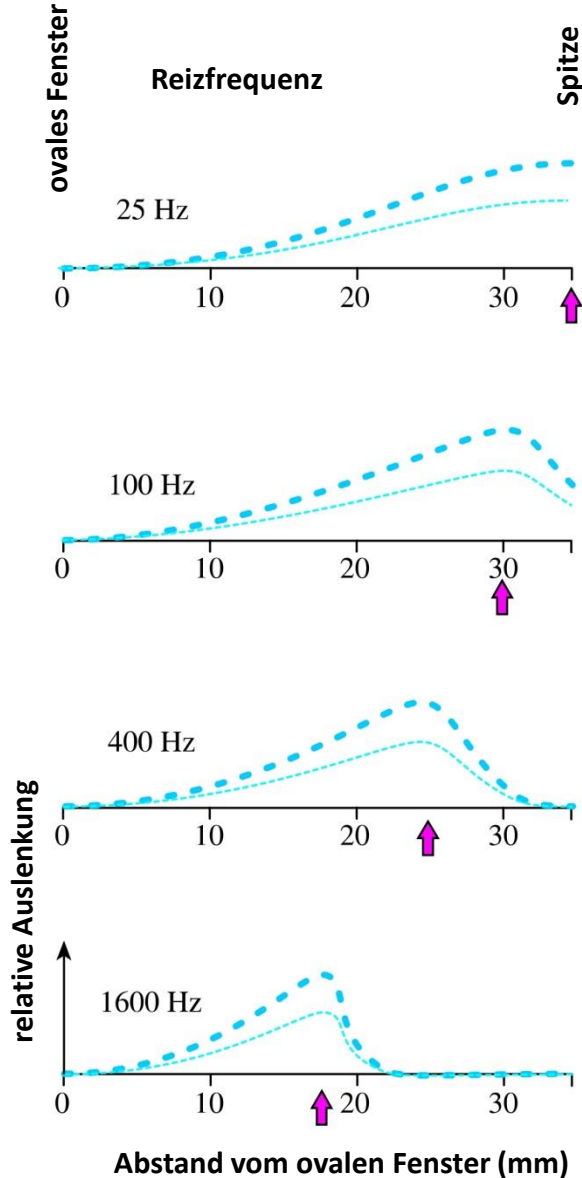


Bewegung der Wanderwellen

Die Geschwindigkeit der „Surfwellen“ ist kleiner, als die Schallgeschwindigkeit (1440 m/s).



Frequenz- und Intensitätsanalyse

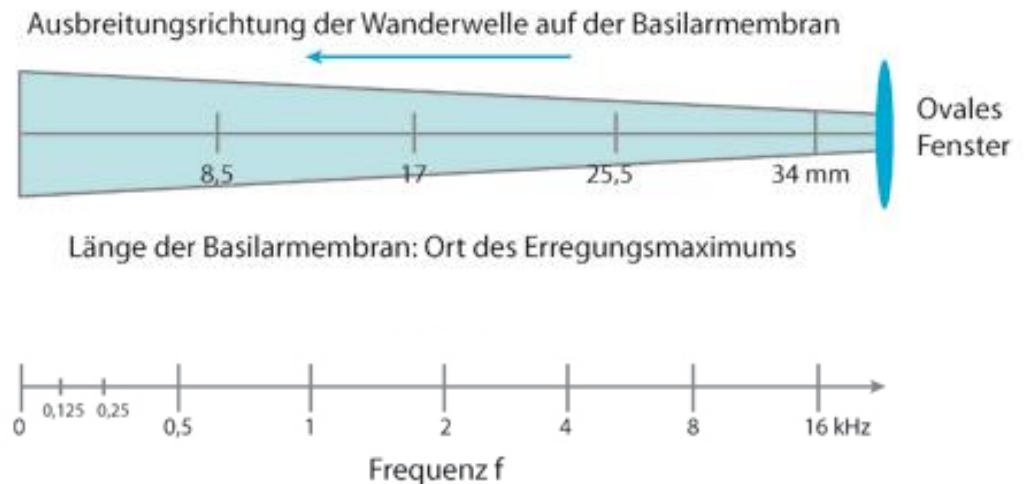


Frequenz:

- ~Maximumstelle (Abstand vom ovalen Fenster) der Umhüllende der Wanderwelle.
 - **Spitze: niedrige Frequenzen,**
 - **Basis: hohe Frequenzen.**

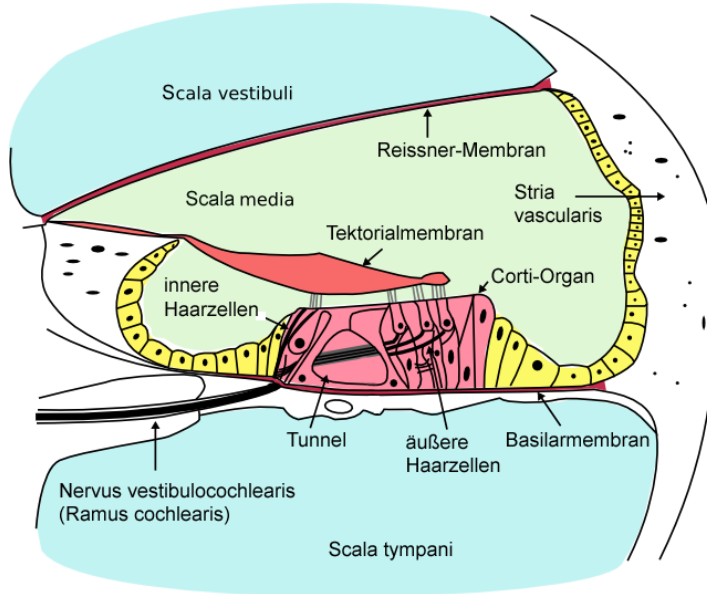
Intensität:

- ~Maximale Auslenkung (Amplitude) der Wanderwelle.



Der Aufbau des Corti-Organs

Schnitt durch die Hörschnecke



Innere Haarzellen:

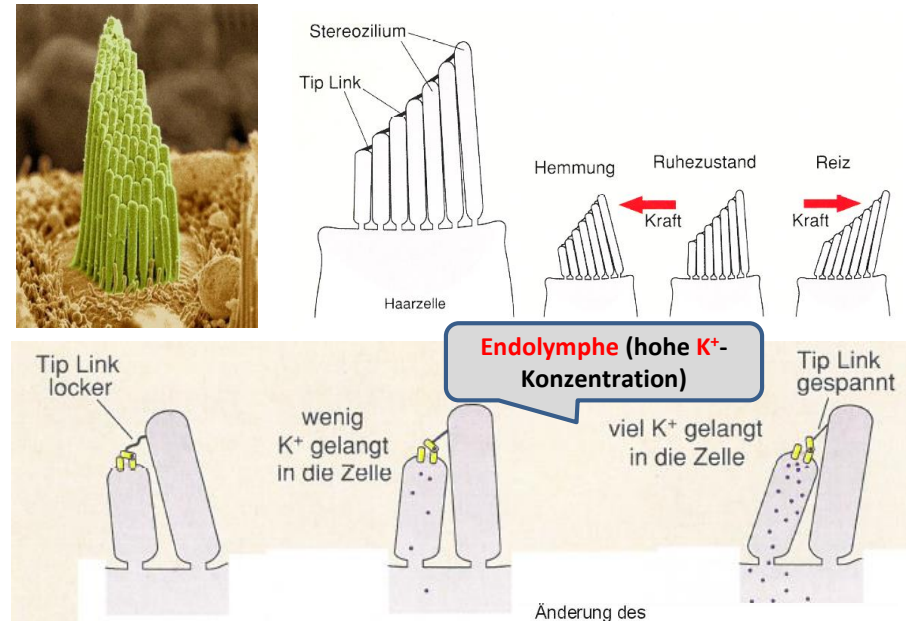
- Anzahl: 3500
- mechano-elektrische Signalumwandlung

Äußere Haarzellen:

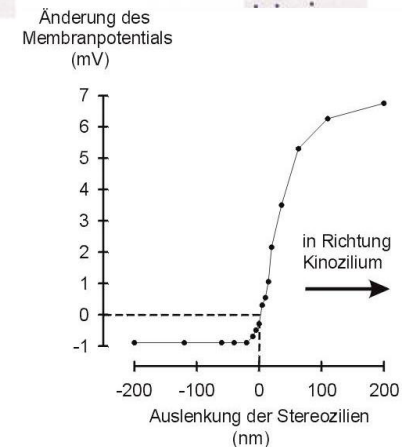
- Anzahl: 12-20 000
- mechanische Verstärkung

Innere Haarzellen: Funktion:

- mechano-elektrische Signalumwandlung



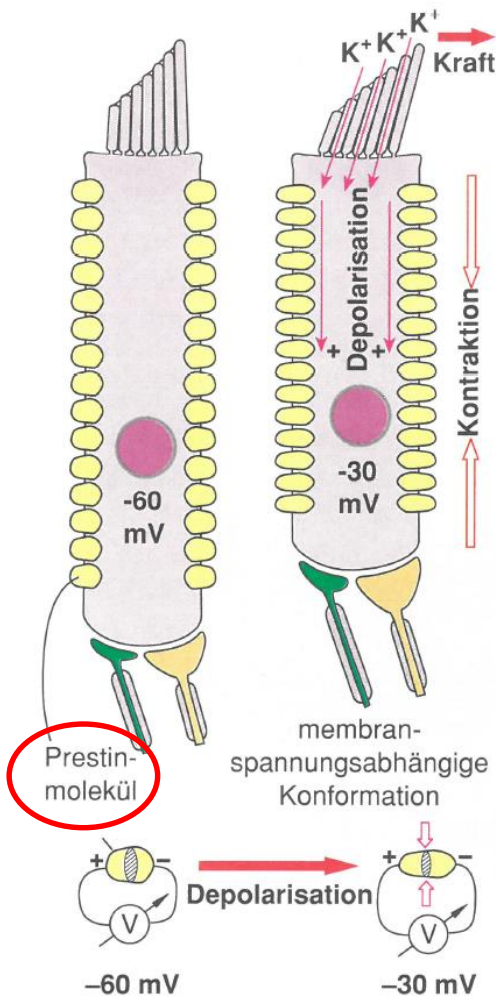
Mikrophonpotenzial: K^+ -Einstrom: Öffnung der mechano-sensitiven K^+ -Kanäle (Tip Link).



Die Funktion der äußere Haarzellen

Aktive mechanische Verstärkung

Die Länge der Haarzellen ändert im Takt der Töne



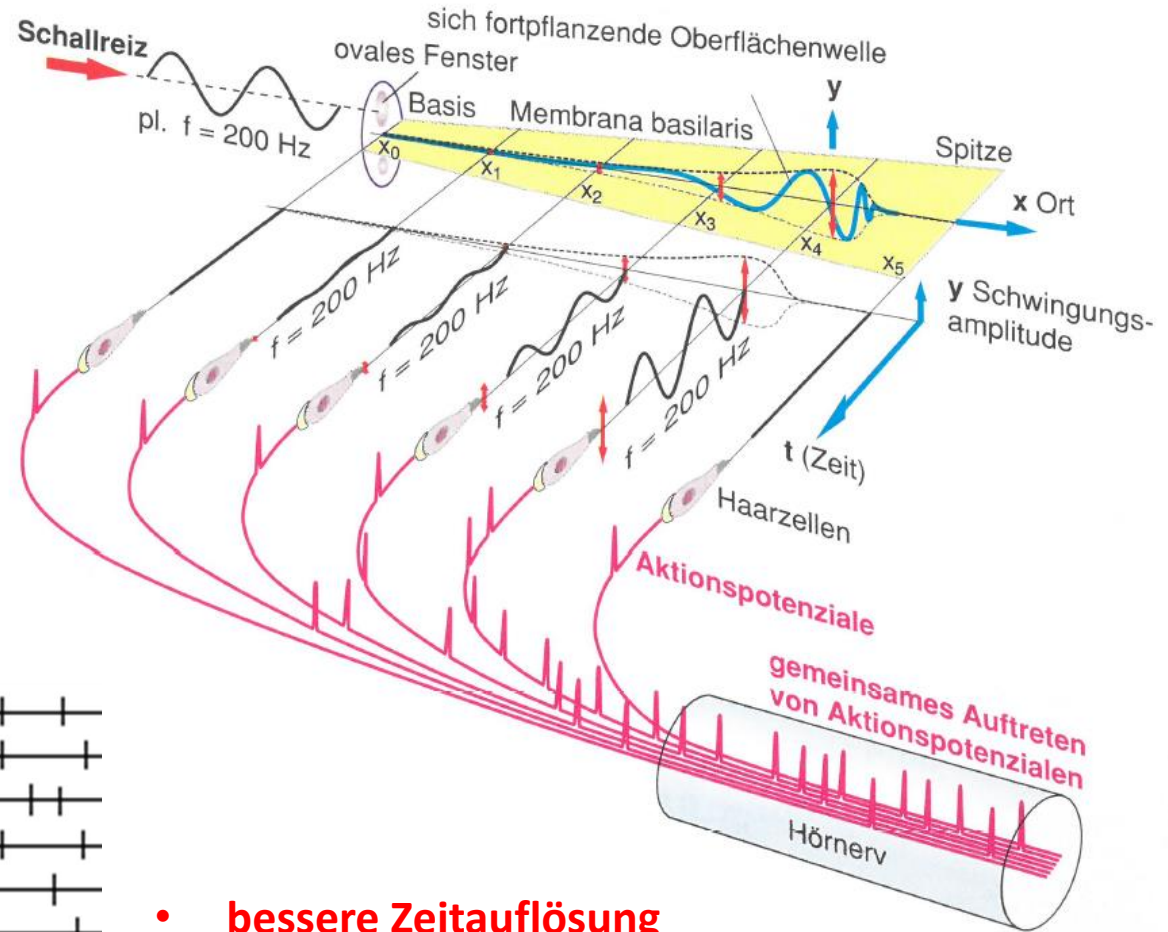
Vibration der Haarzellen → Schwingung der Basilarmembran mit höherer Amplitude → **positiv rückgekoppelter Verstärker (+50 dB)**

Die Kodierung der akustischen Information

„Volleyballtheorie“



Größere Zahl der gemeinsamen Berührungen erleichtert das Abschlagen des Balls.



- **bessere Zeitauflösung**
- die Refrakterphase (ungefähr 1 ms) bedeutet keine Beschränkung

Richtungshören

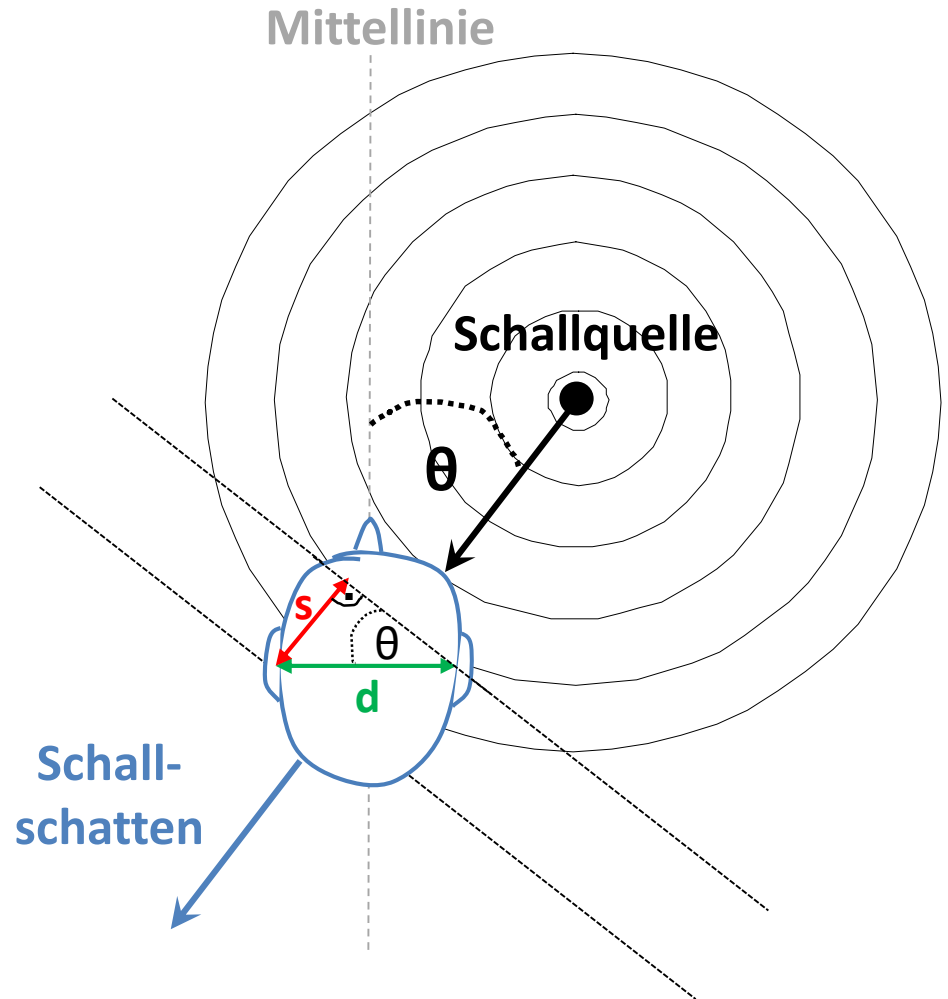
zweiohriges Richtungshören

- aufgrund der **Zeitverzögerung** (Das Gehör kann Laufzeitdifferenzen ab $10\text{ }\mu\text{s}$ erkennen),
- sei **$d = 20\text{ cm}$**
- sei **$\theta = 45^\circ$**

$$s = d \cdot \sin \theta = 0,141$$

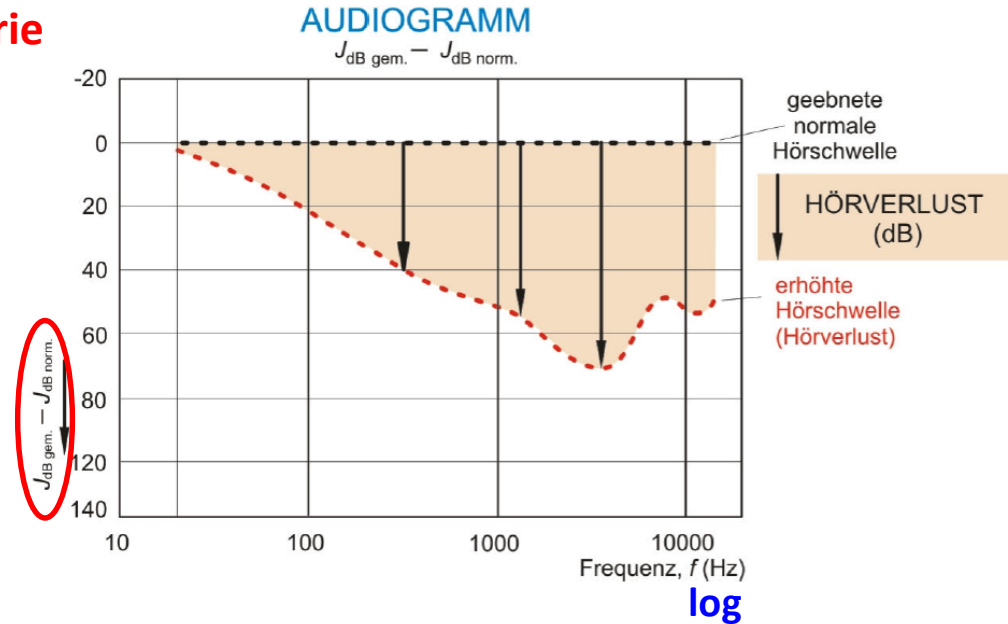
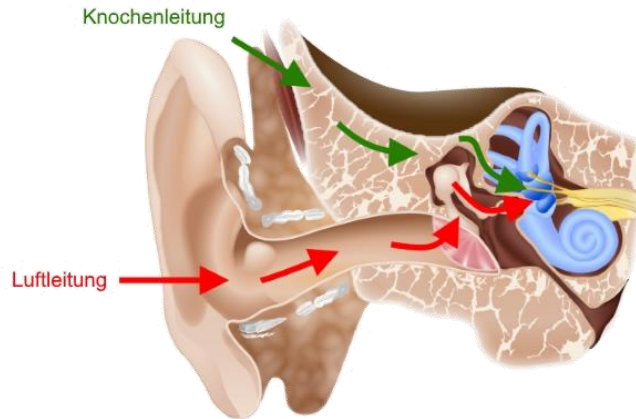
$$t = \frac{s}{c} = \frac{s}{340} = 416\text{ }\mu\text{s}$$

- aufgrund des **Intensitätsunterschiedes** (Dämpfung durch die Gehirngewebe).

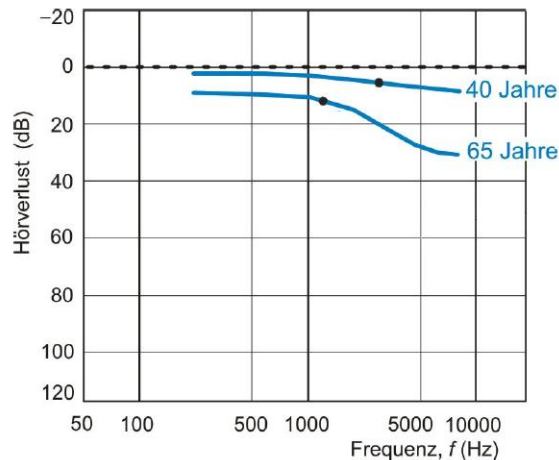


Audiometrie

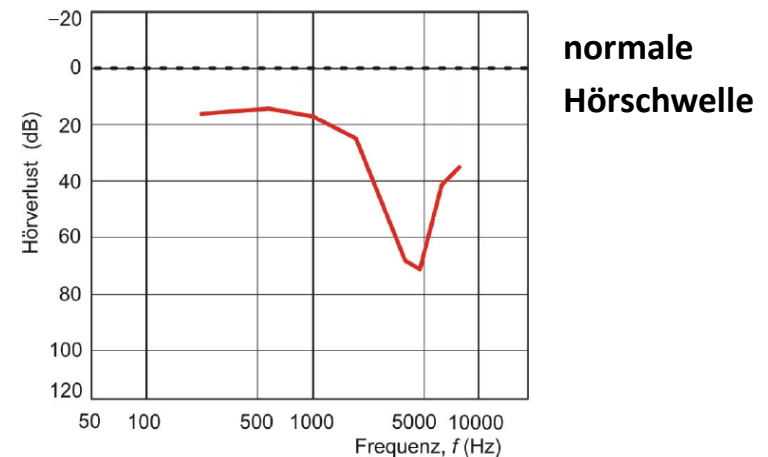
- Sprachaudiometrie ↔ Tonaudiometrie
- Luftleitung ↔ Knochenleitung



Altersschwerhörigkeit



Lärmschwerhörigkeit



Hausaufgaben

Aufgabensammlung

4.17, 4.18, 4.20 - 4.25

Feedback