

Sensorische Funktionen.

Gehör und Audiometrie.

Balázs Kiss

kissb3@gmail.com



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

03. April 2024.

Überblick

1. Sensorische Funktionen

- a) Grundlagen der Wahrnehmungsprozesse (IV/1.1)
- b) Psychophysische Gesetze (IV/1.2 und Praktikum „Sensor“)

2. Das Ohr und das Gehör (IV/3.1, IV/3.2 und IV/3.5)

- a) Aufbau des Ohres
- b) Funktion des Außenohres
- c) Verstärkung und Impedanzanpassung im Mittelohr
- d) Funktion der Haarzellen
- e) Frequenz- und Intensitätsanalyse im Innenohr
- f) Richtungshören
- g) Audiometrie (Praktikum „Audiometrie“)

3. Das Sehen (s. 1. Semester: Optik des Auges)

1. Sensorische Funktionen

Historie der Wahrnehmung / Perzeption #1

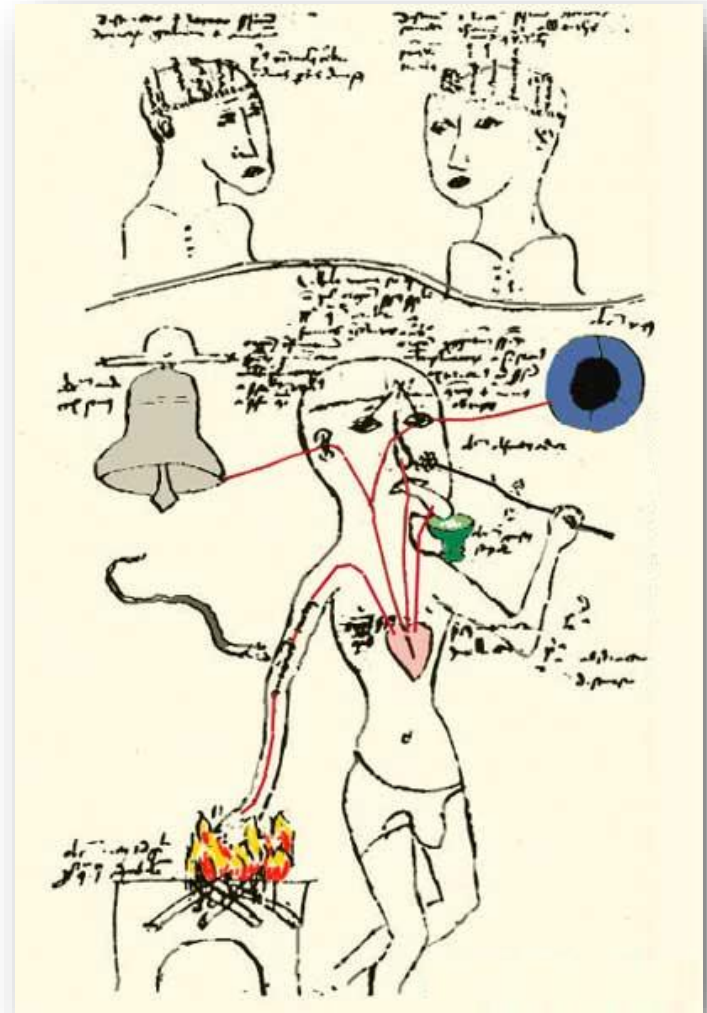
- **cardiozentrische These**

- Aristoteles (384-322 v.Chr.)
- Das **Herz** ist das Zentralorgan der Wahrnehmung und des Seelenlebens.
- Begründung: das Gehirn ist unempfindlich gegenüber mechanischer Reizung.

- **cephalozentrische These**

- Galen (129-199 n.Chr.)
- Das **Gehirn** ist das Zentralorgan der Wahrnehmung. (genauer: Hirnventrikel)

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



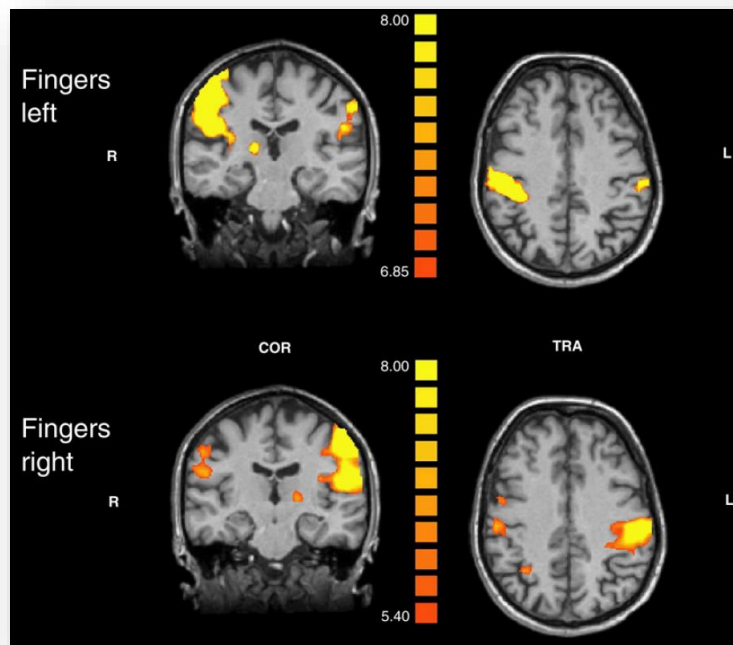
Nach Jung, 1984.

Historie der Wahrnehmung / Perzeption #2

- **moderne These**

- Thomas Willis* (1621-1675): Ort der Wahrnehmung: grauen und weißen Massen der Hirnwände

* s. Circulus arteriosus cerebri/Willisii

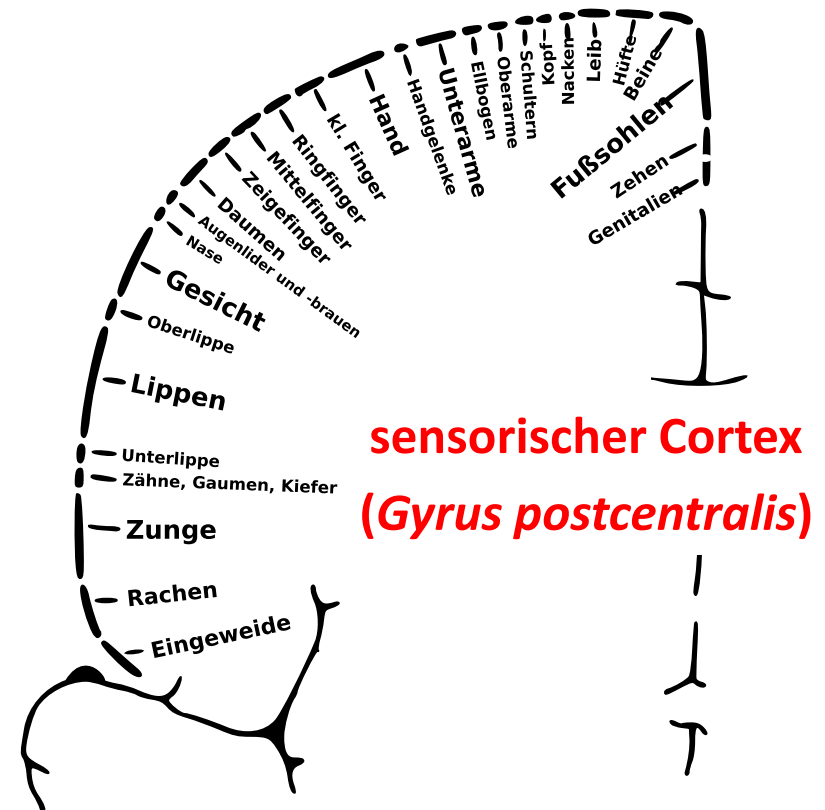


fMRI: BOLD-Mappe

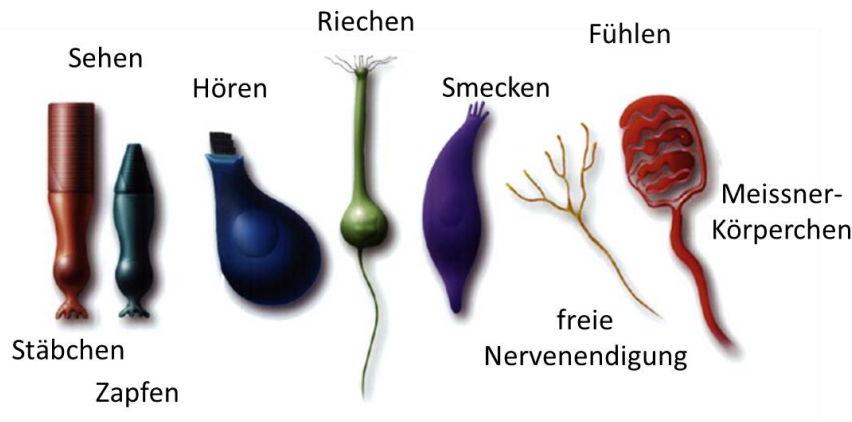
(Blood-Oxygen-Level-Dependent Imaging)

sensorischer Homunkulus

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



Sensorische Rezeptoren



Rezeptorzelle: die bestimmte chemische oder physikalische Reize aus der Umgebung eines Körpers oder seinem Inneren aufnimmt und in eine neuronal vergleichbare Form überführt (transduziert).

Rezeptor (Biochemie): ein Protein (~Komplex), wenn daran Signalmoleküle binden können, die dadurch Signalprozesse im Zellinneren auszulösen vermögen.

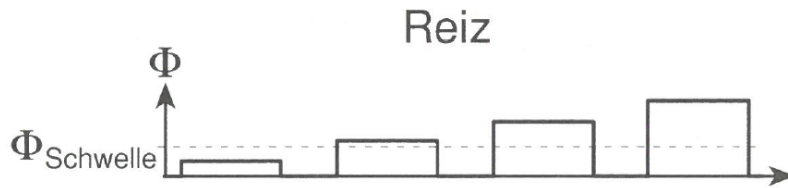
wahrgenommen	Modalität	Rezeptor	Organ
	Sehen	Stäbchen und Zapfen	Auge
	Hören	Haarzelle	Ohr (Corti-Organ)
	Riechen	Olfaktorisches Neuron	Schleimhaut
	Schmecken	Geschmacksrezeptoren	Geschmacksknospe
	Radialbeschleunigung	Haarzelle	Ohr (Gleichgewichtsorgan)
	Lineare Beschleunigung	Haarzelle	Ohr (Gleichgewichtsorgan)
	Druck, Tastgefühl	Nervenendigung	zahlreiche
	Temperatur	Nervenendigung	zahlreiche
	Schmerz	Nervenendigung	zahlreiche
	Gelenkbewegung	Nervenendigung	zahlreiche
nicht wahrgenommen	Muskellänge	Nervenendigung	Muskelspindel
	Muskelspannung	Nervenendigung	Golgi-Sehnenorgan
	Arterieller Blutdruck	Nervenendigung	Sinus Caroticus
	Zentraler Venendruck	Nervenendigung	Dehnungsrezeptor in Lungen
	usw...	usw...	usw...

Empfindlichkeit: E_{\min} : eV

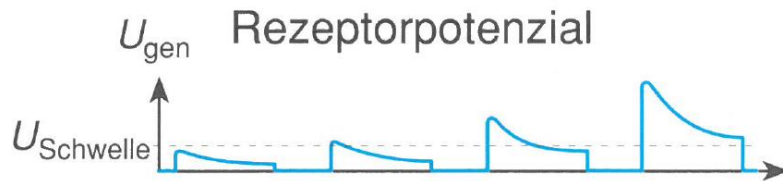
- akustische Rezeptoren: thermische Bewegung der N_2 und O_2 Moleküle in der Luft
- Photorezeptoren: 1-2 Photonen

Die Rezeptoren und die Nervenfaser

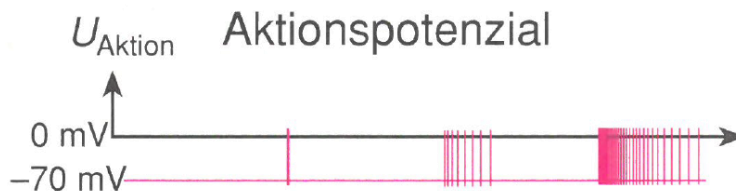
- adäquater Reiz:** wofür ein Rezeptor die größte Empfindlichkeit besitzt



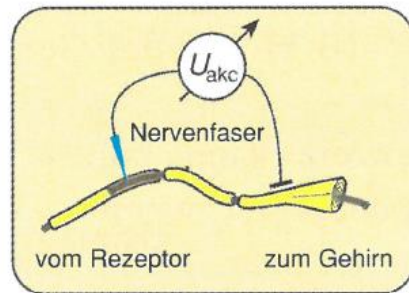
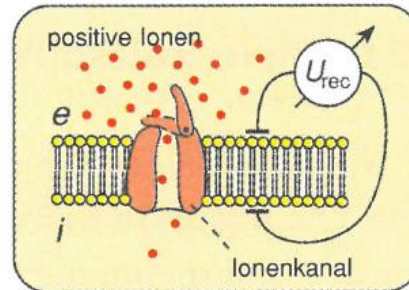
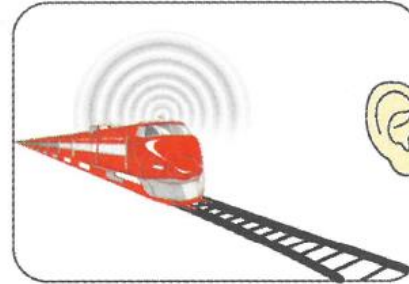
- Amplitudenkodierung:** $U_{\text{gen}} \sim \Phi$
- Adaptation**



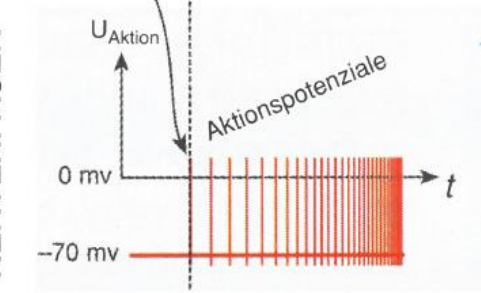
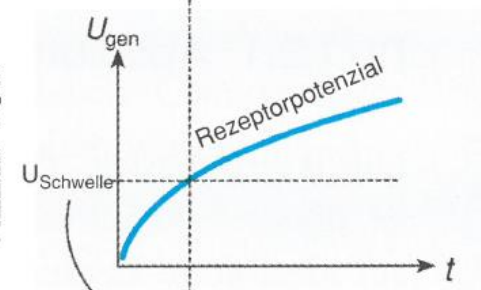
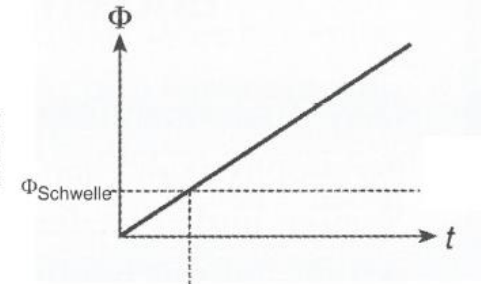
- Frequenzkodierung:** $f_{\text{AP}} \sim \Phi$
Modalität (Typ), Intensität, Zeitdauer, Ort, usw.



Prozess: Gehör



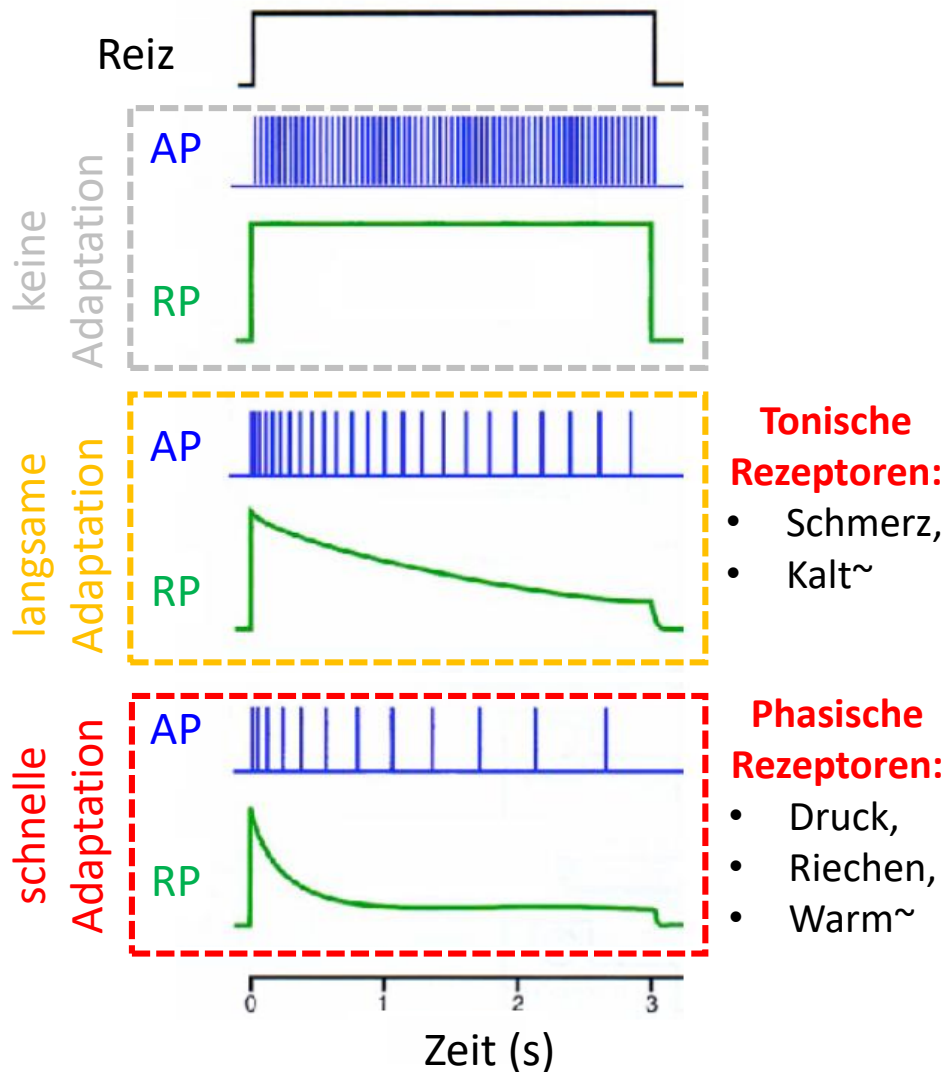
gemessenes Signal



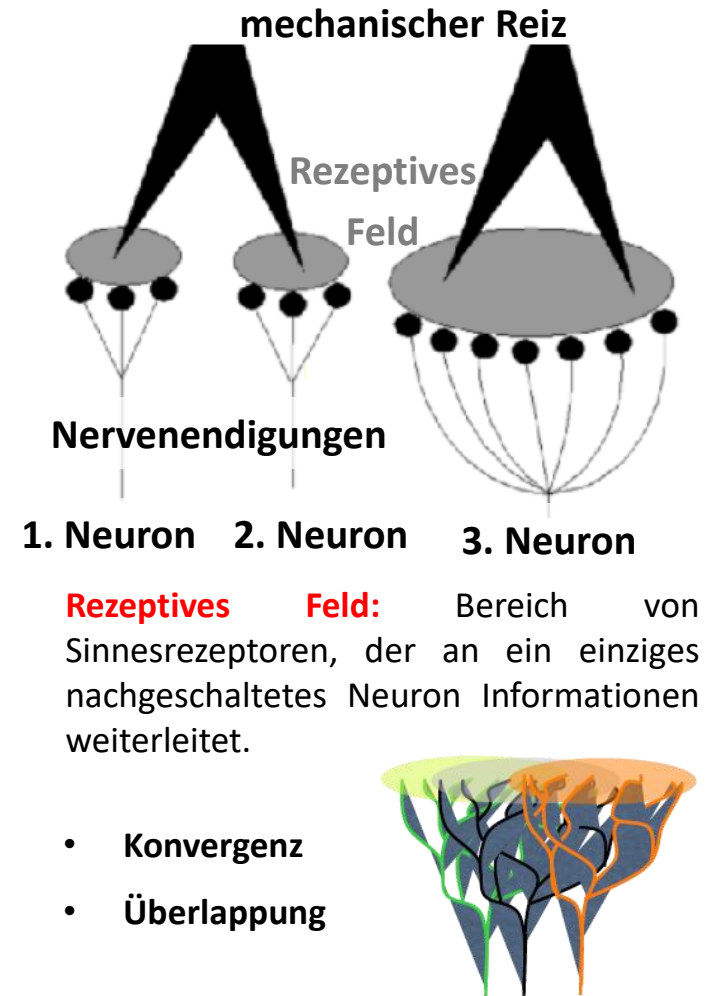
$$T_{\text{AP}} \quad f_{\text{AP}} = \frac{1}{T_{\text{AP}}}$$

Spezifische Aspekte der Rezeptoren

Zeitdauer, Adaptation



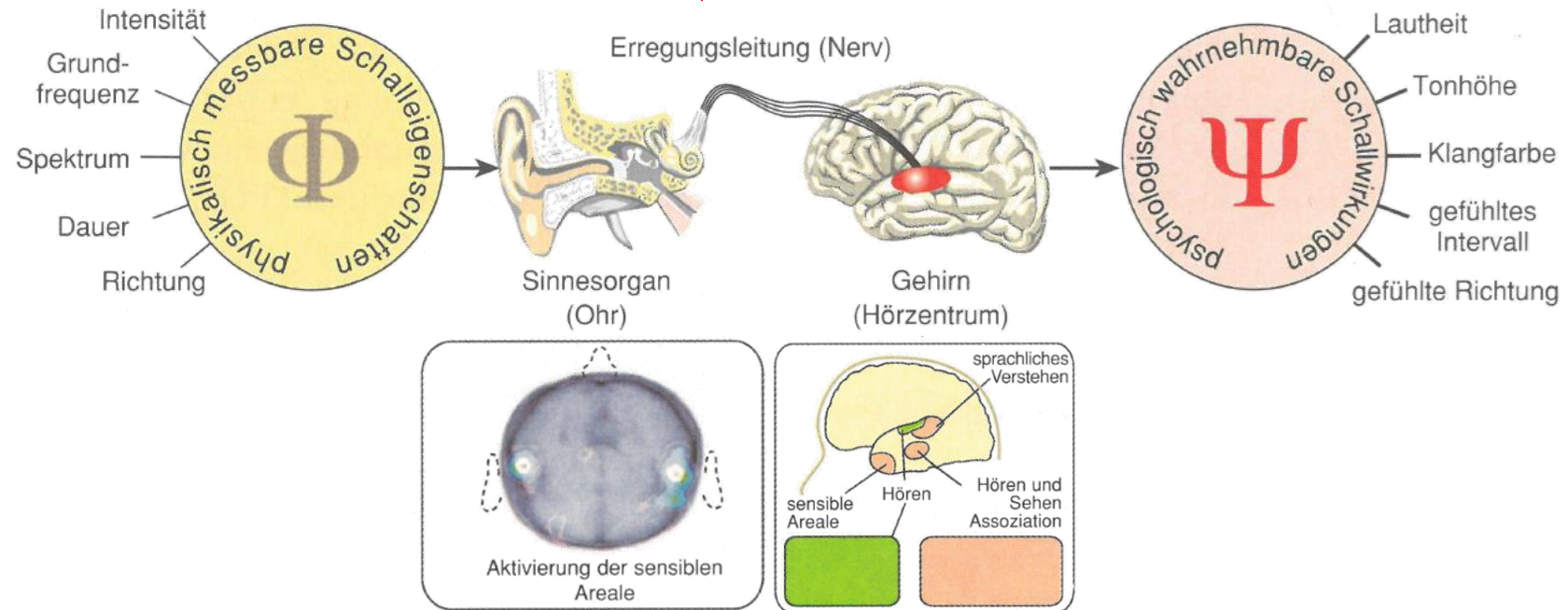
Ortsbestimmung



Psychophysische Gesetze

ψ

ϕ



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

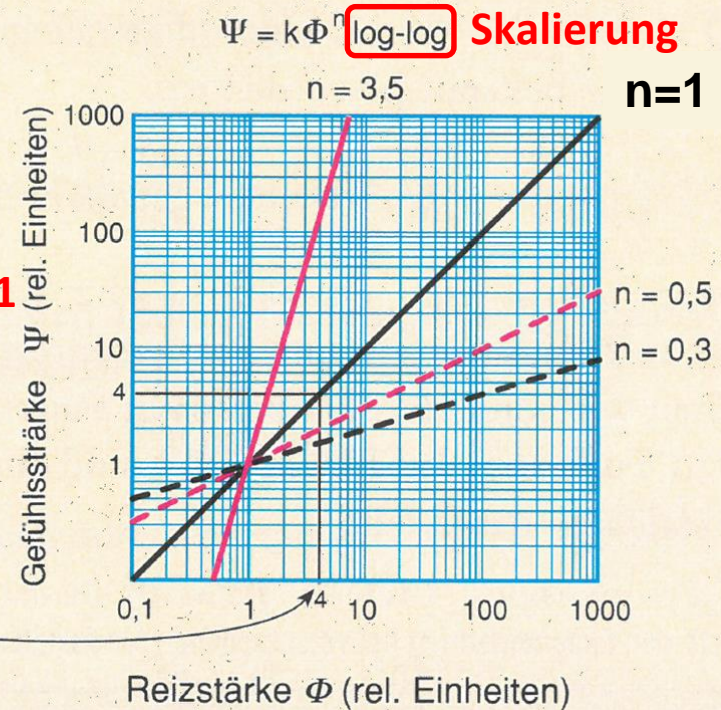
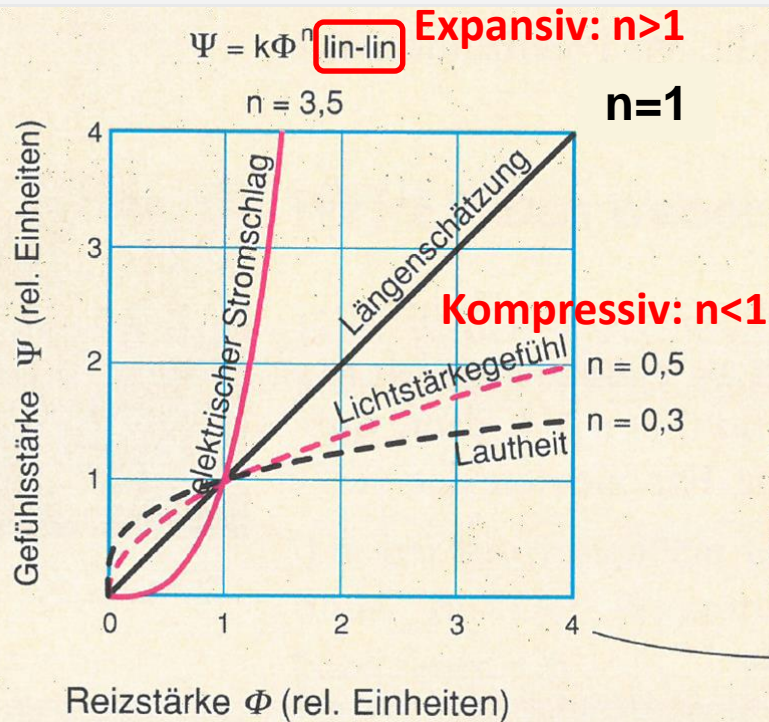
Die relative Änderung des Gefühls ist proportional zur relativen Änderung der Reizstärke.

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 Stevens Gesetz

Modalität	"n"	Modalität	"n"
Hören, Lautheit (1000 Hz)	0,3	Temperaturgefühl	1,0
Sehen, Helligkeit	0,33	Sehen, Längsschätzung	1,0
Sehen, Helligkeit eines Lichtblitzes	0,5	Druck, Gewicht	1,45
Geruch, Kaffeeduft	0,55	Geschmack, Salz	1,3
Geruch, Heptan	0,6	Geschmack, Saccharin	0,8
Elektrischer Stromschlag (Haut)	3,5	Elektrischer Stromschlag (Zahn)	7,0



2. Das Ohr und das Gehör

Physikalische Größen der Töne

• 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

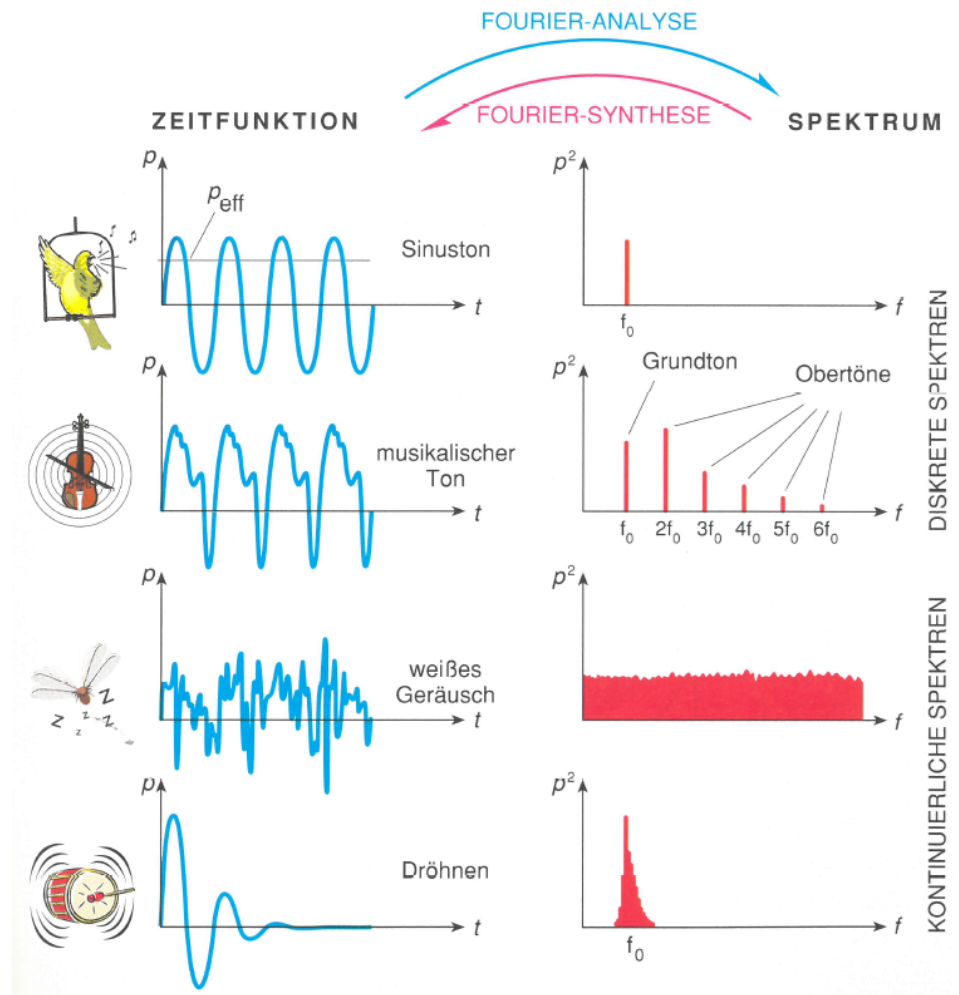
- „... wird von der **Frequenz und der relativen Stärke der sog. Obertöne**... d. h. vom **Schwingungsspektrum** des Tones bestimmt.” (Helmholtz)

• Sinuston:

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

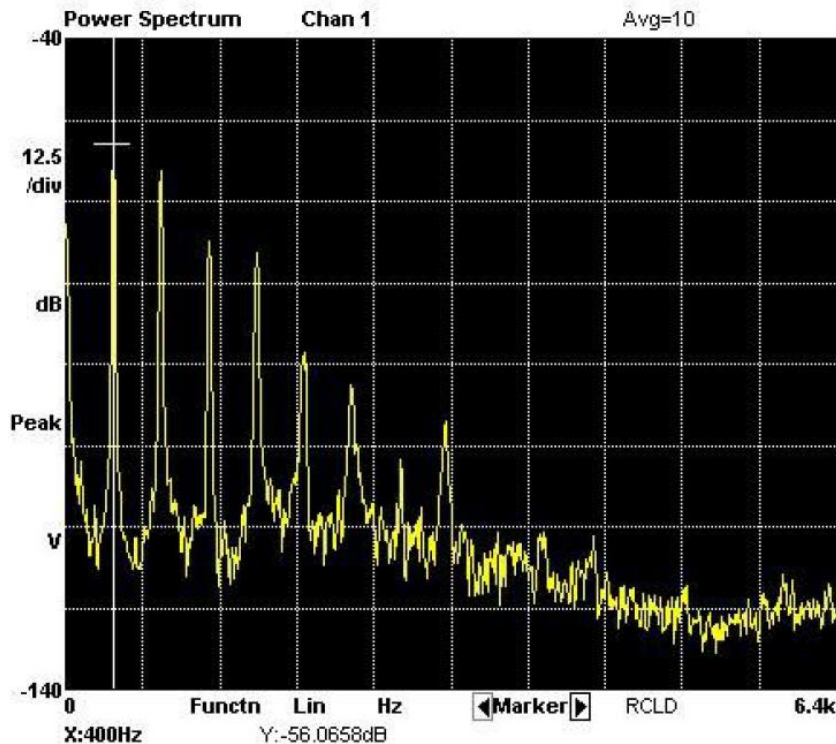
• musikalischer Ton:

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

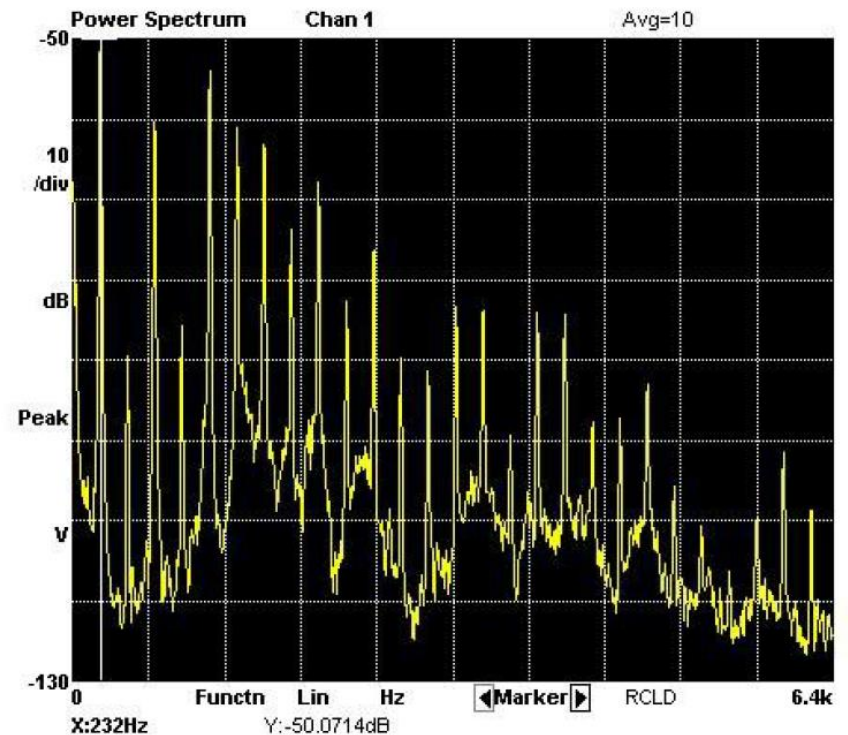


Frequenzspektren von unterschiedlichen Musikinstrumenten

Querflöte



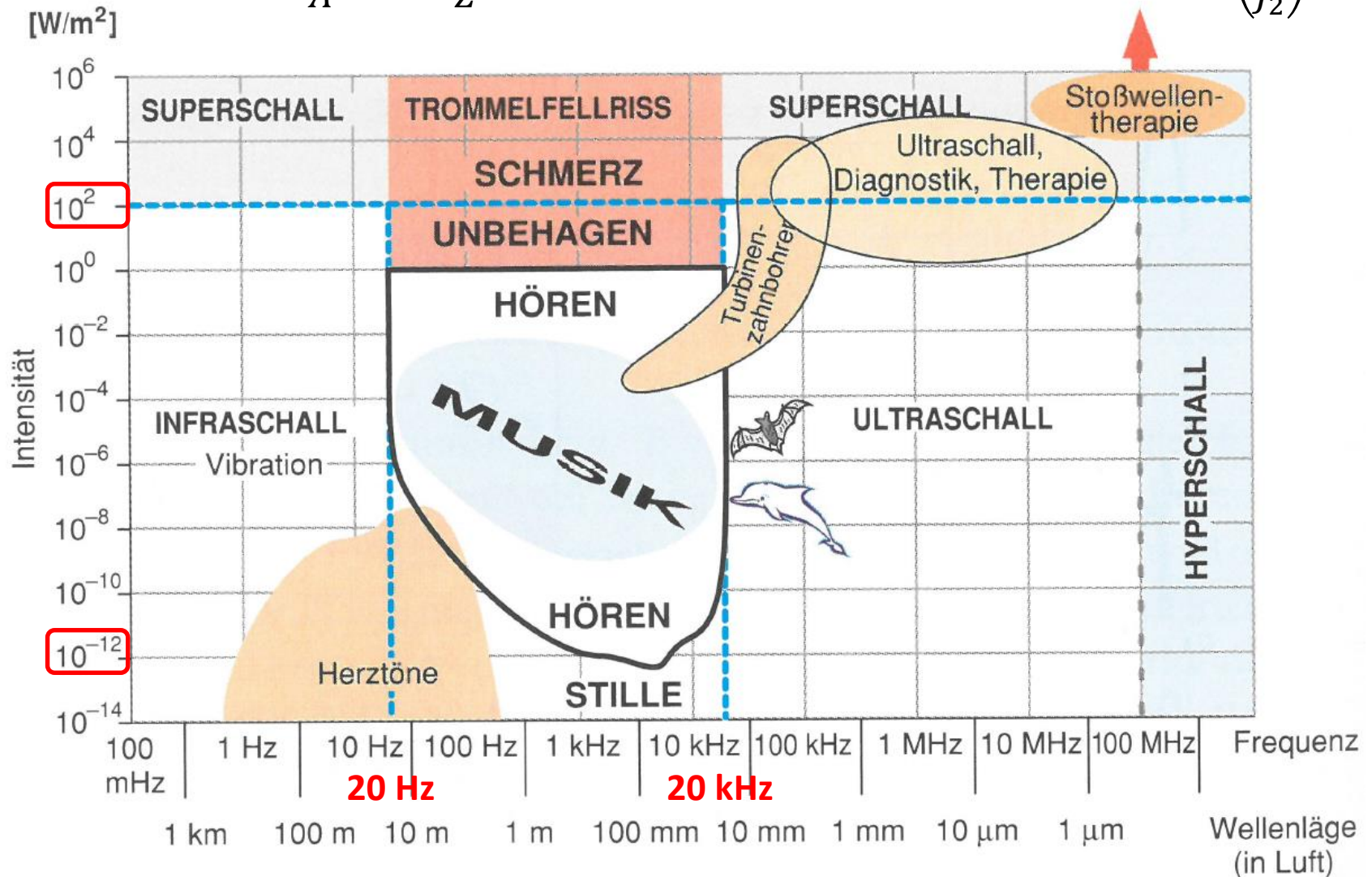
Klarinette



Spektralanalyse: mit Soundcard Scope

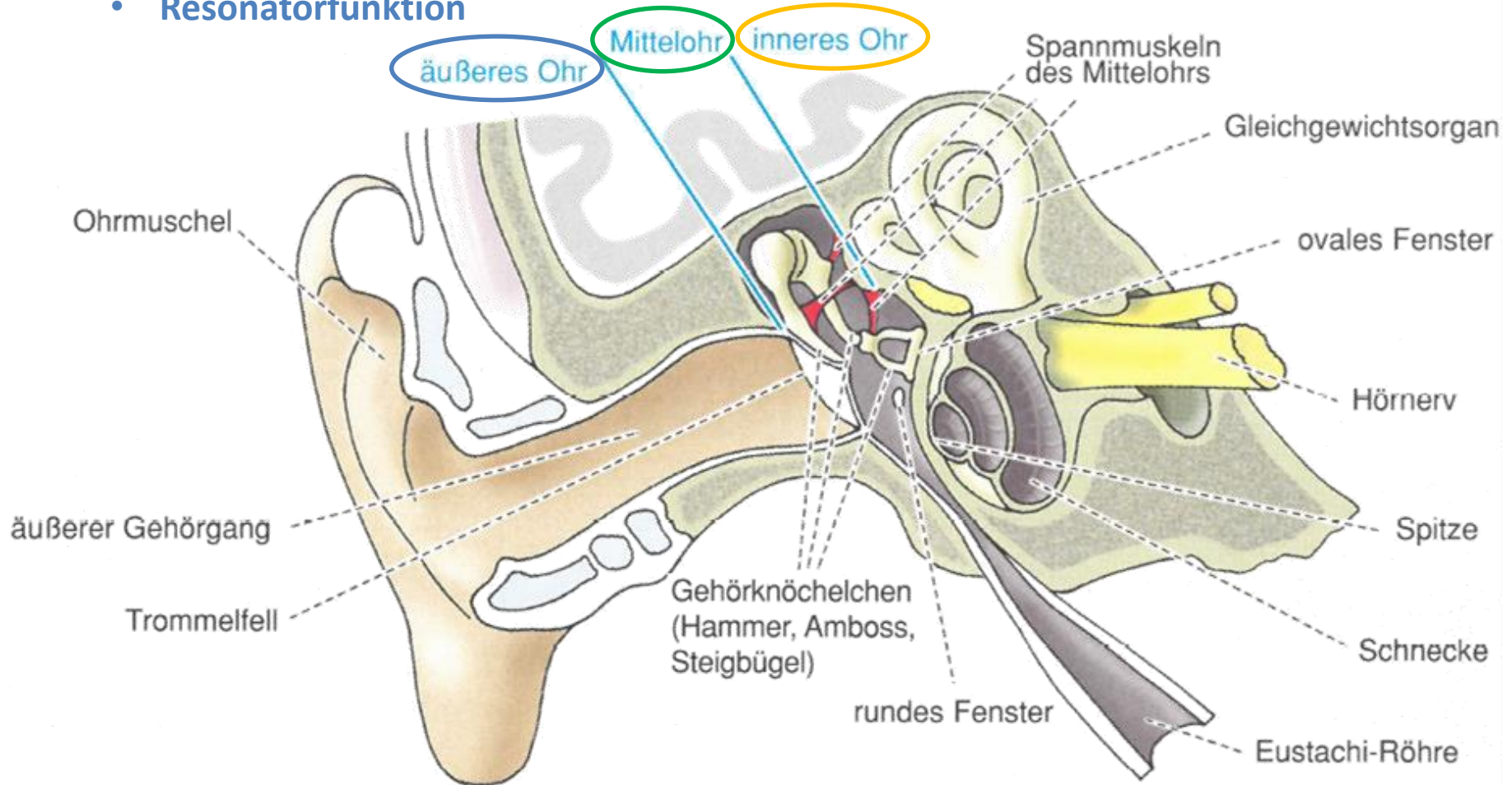
Frequenz- und Intensitätsbereiche der Töne

Schallintensität: $J = \frac{P}{A} = \frac{p_{eff,Schall}^2}{Z}$ **Schallintensitätspegel:** $n \text{ (dB)} = 10 \cdot \lg \left(\frac{J_1}{J_2} \right)$

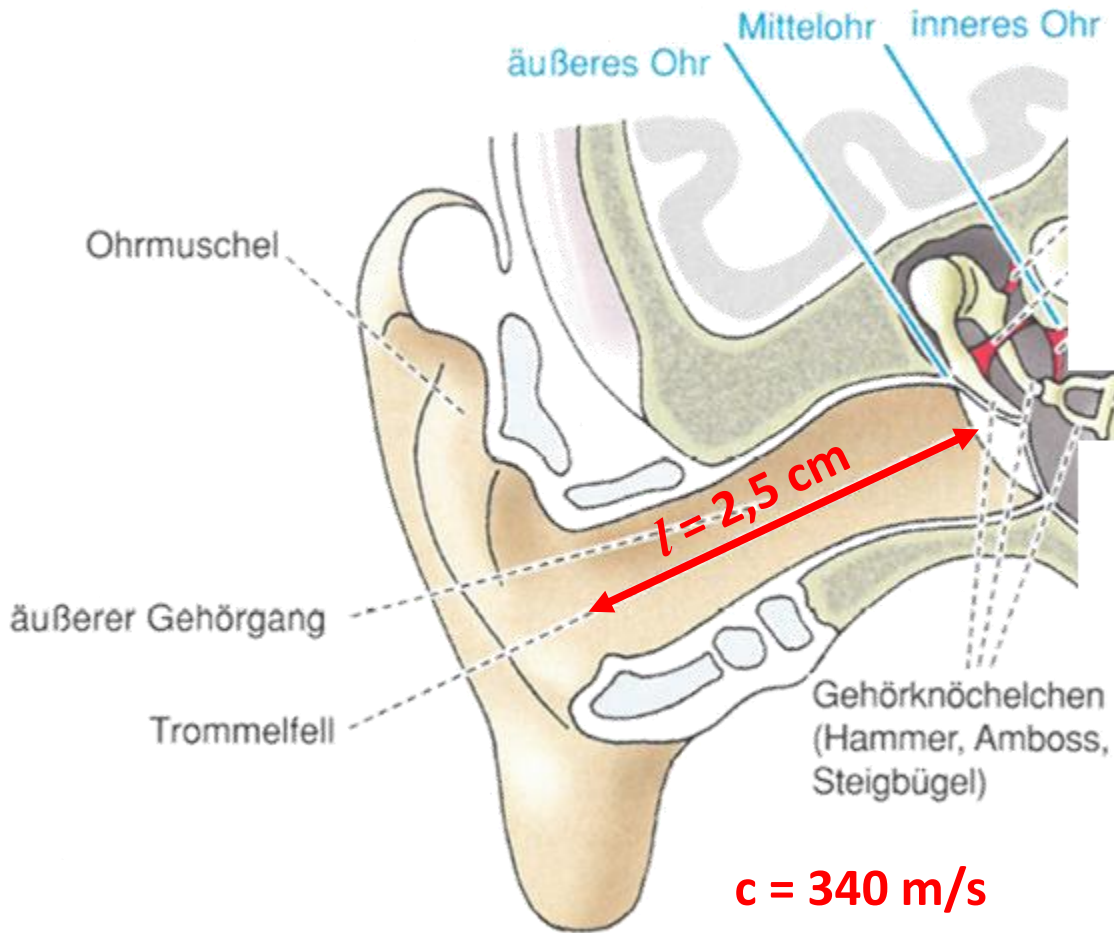


Das Ohr – Überblick

- Impedanzanpassung
- Verstärkung
- Resonatorfunktion
- Schallempfindung
- Beschleunigungsempfindung



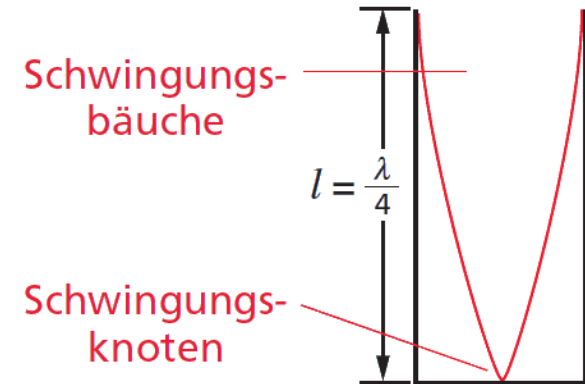
Resonatorfunktion des Außenohres



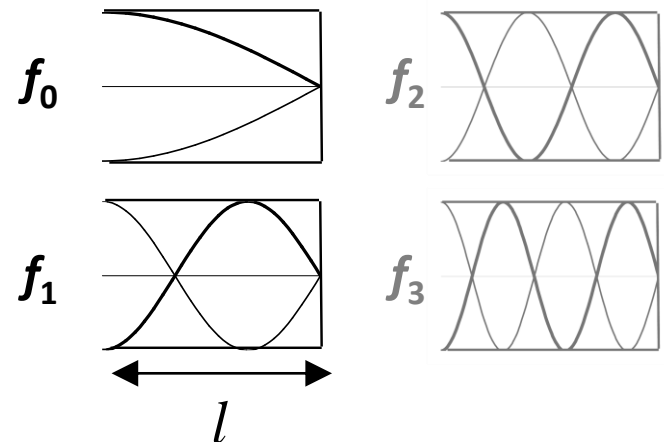
$$c = 340 \text{ m/s}$$

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

Resonanz bei einer geschlossenen Pfeife



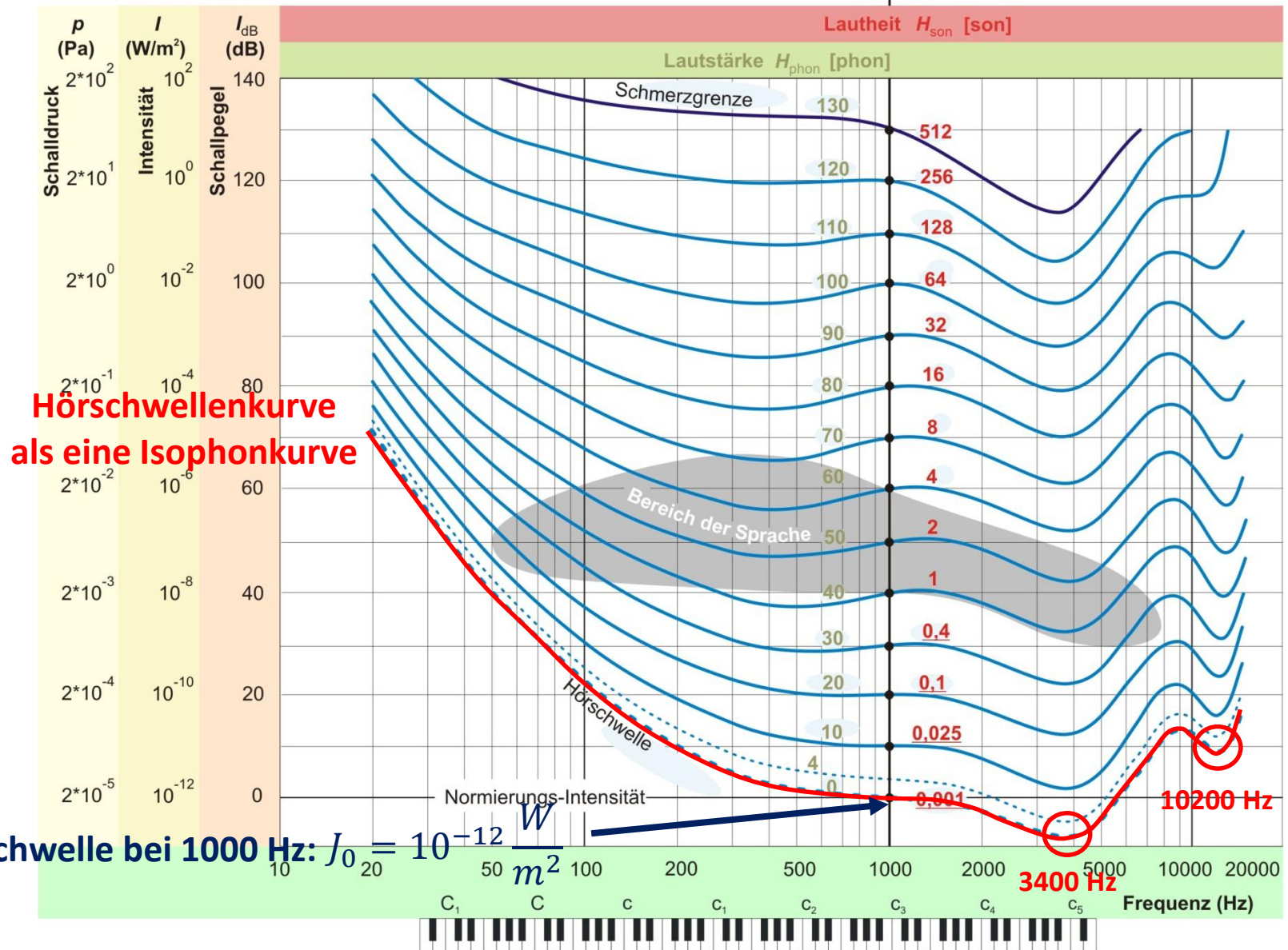
$$f_0 = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4 \cdot l}$$



Kurven gleicher Lautstärke

isophon Kurven / Fletcher Kurven

1000 Hz
Referenzton



Das Mittelohr als Impedanzanpassner

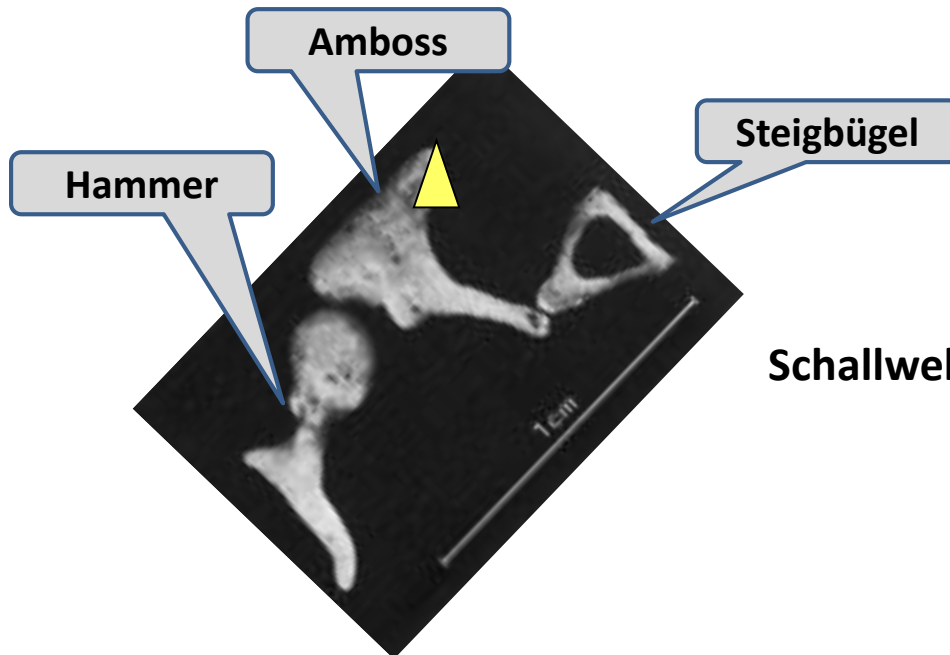
Problem: Reflexion der Schallwellen durch die Grenzfläche Luft/Gewebe

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

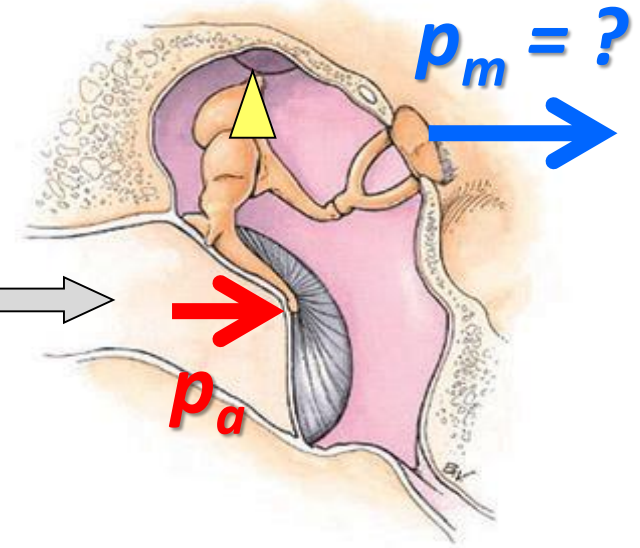
Modell des Gewebes: Wasser
Akustische Impedanz: $Z = \rho \cdot c$

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

Die Funktion von Gehörknöchelchen: Verstärkung durch ein Hebelsystem

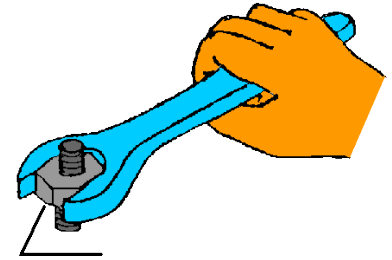
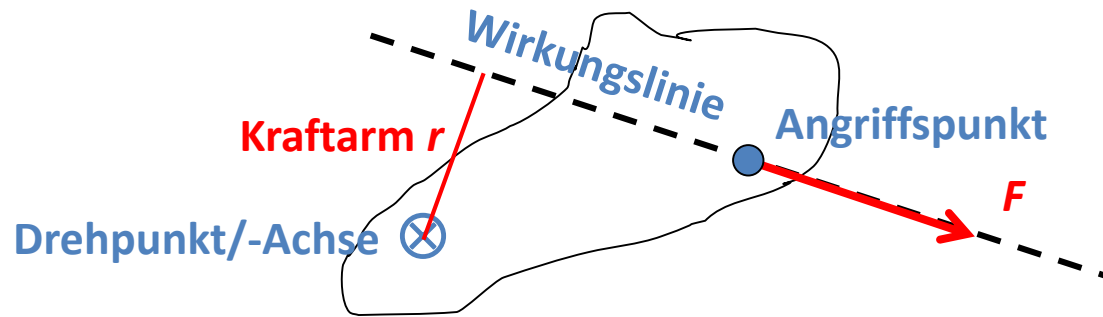


Schallwellen →

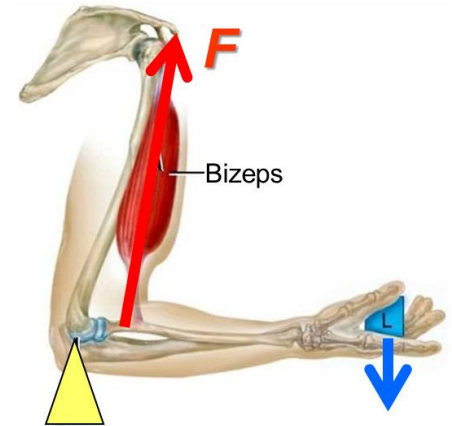


Wiederholung: Hebelgesetz

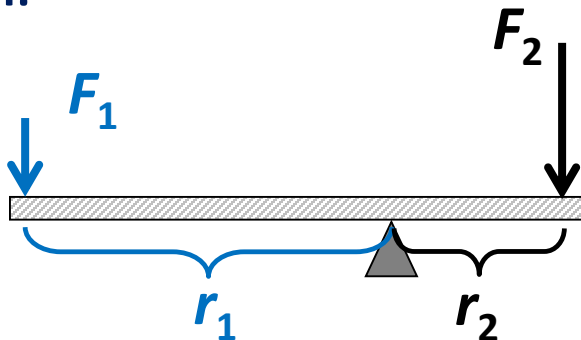
Drehmoment (M): $M = r \cdot F$ (Nm)



Gleichgewicht: $\sum M_i = 0$

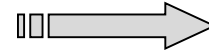


Hebel:



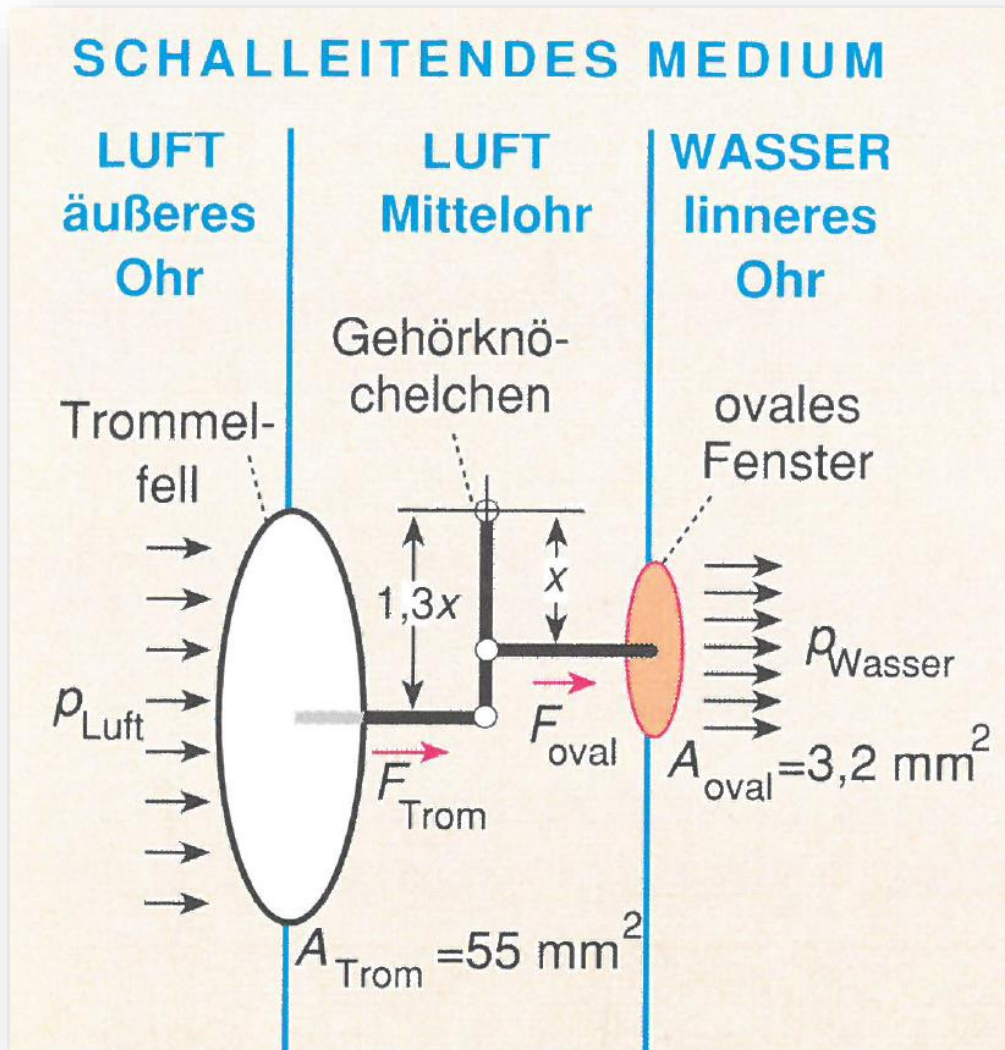
Hebelgesetz:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{r_1}{r_2}$$



Kraftvervielfachung

Die Druckerhöhung im Mittelohr



Druckverstärkung:

- Hebel
- Flächenverkleinerung

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

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

Intensitätsverstärkung:

- **etwa 125-fach**

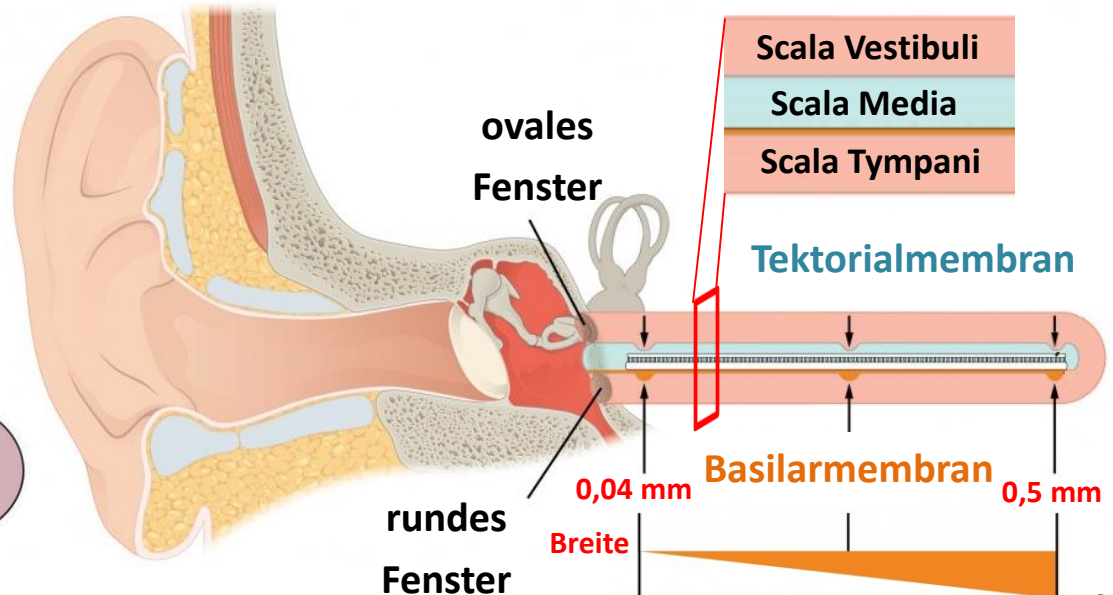
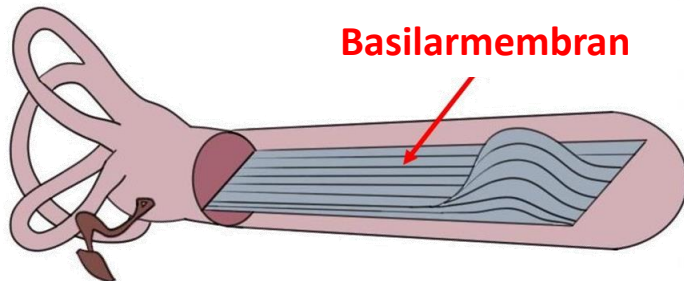
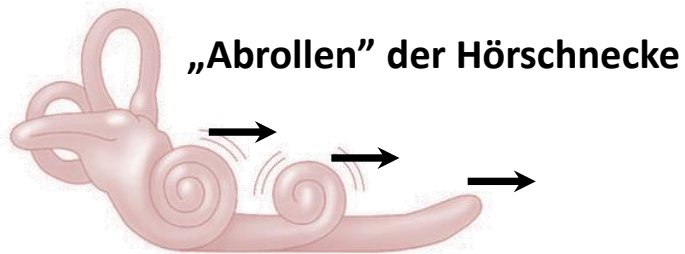
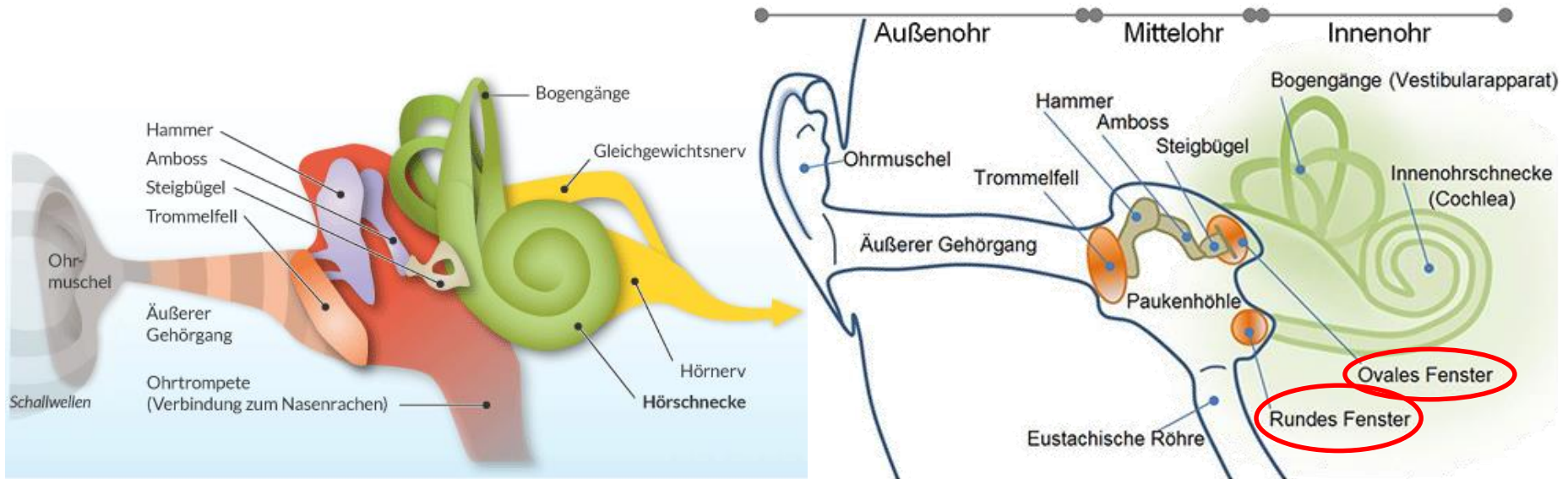
$$Z_{\text{Luft}} = 1,2 * 340 = 408 \text{ rayl}$$

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

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

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

Aufbau des Innenohres



Schallempfindung im Innenohr

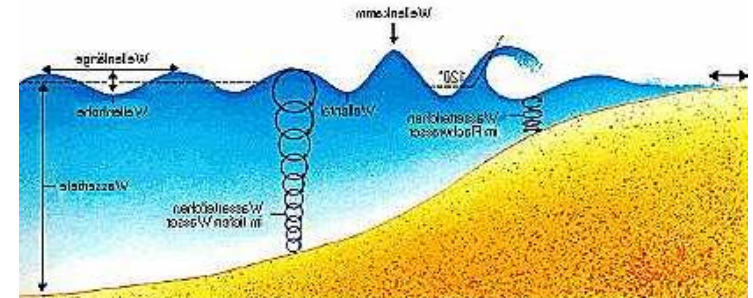
- „Saitentheorie“

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

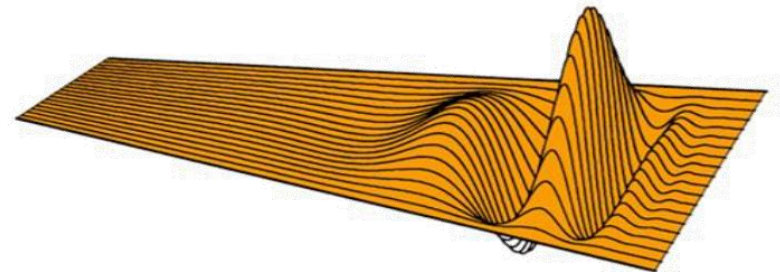


- **Wanderwellen-Theorie**

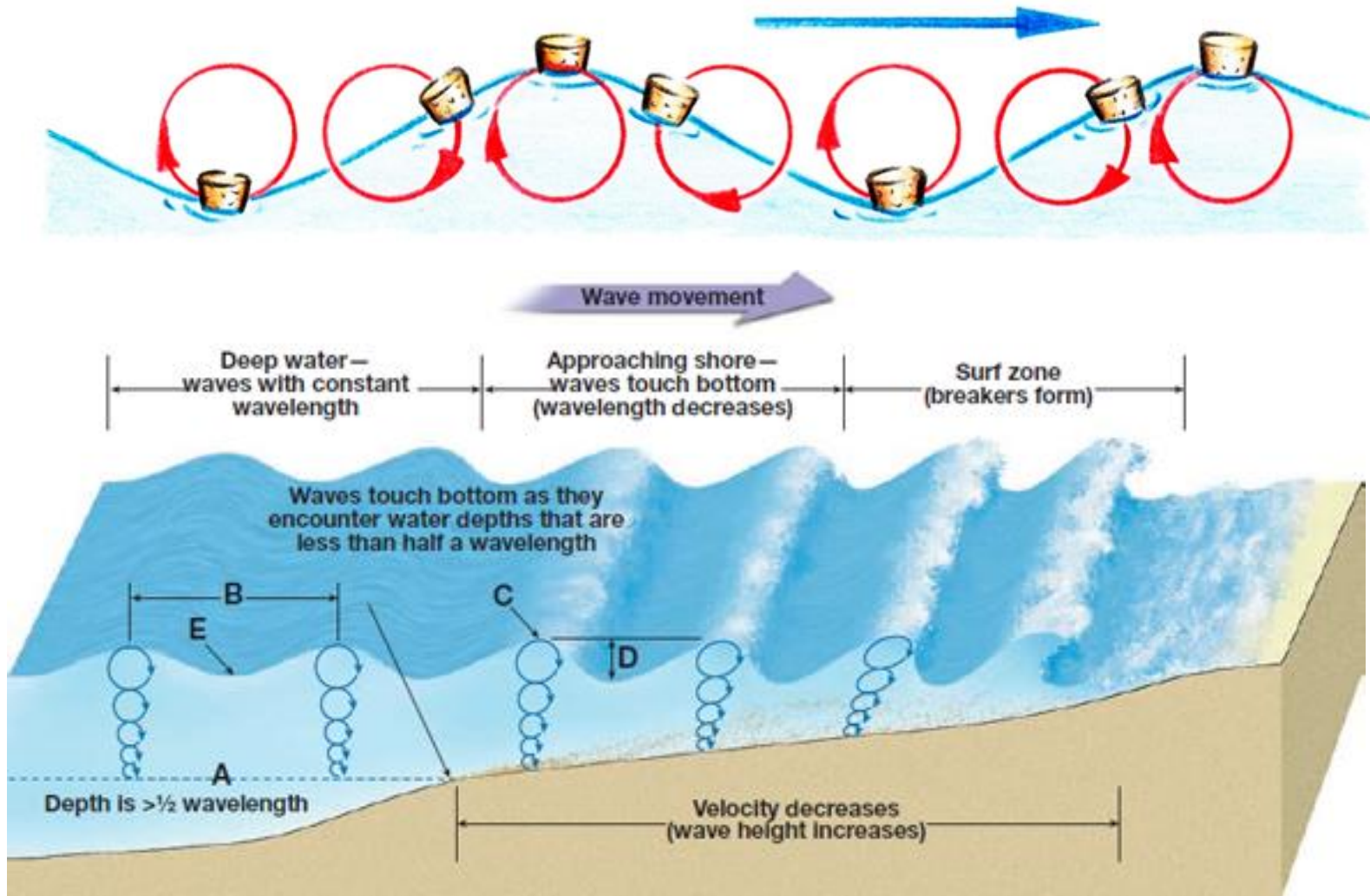
- Georg (György) von Békésy (1899-1972)
- Nobel-Preis: 1961
- Hydraulische Druckwelle am ovalen Fenster gleicht sich am runden Fenster aus,
- Reibung auf Basilarmembran: **fortpflanzende Oberflächenwellen.**



Laufrichtung der Wellen →



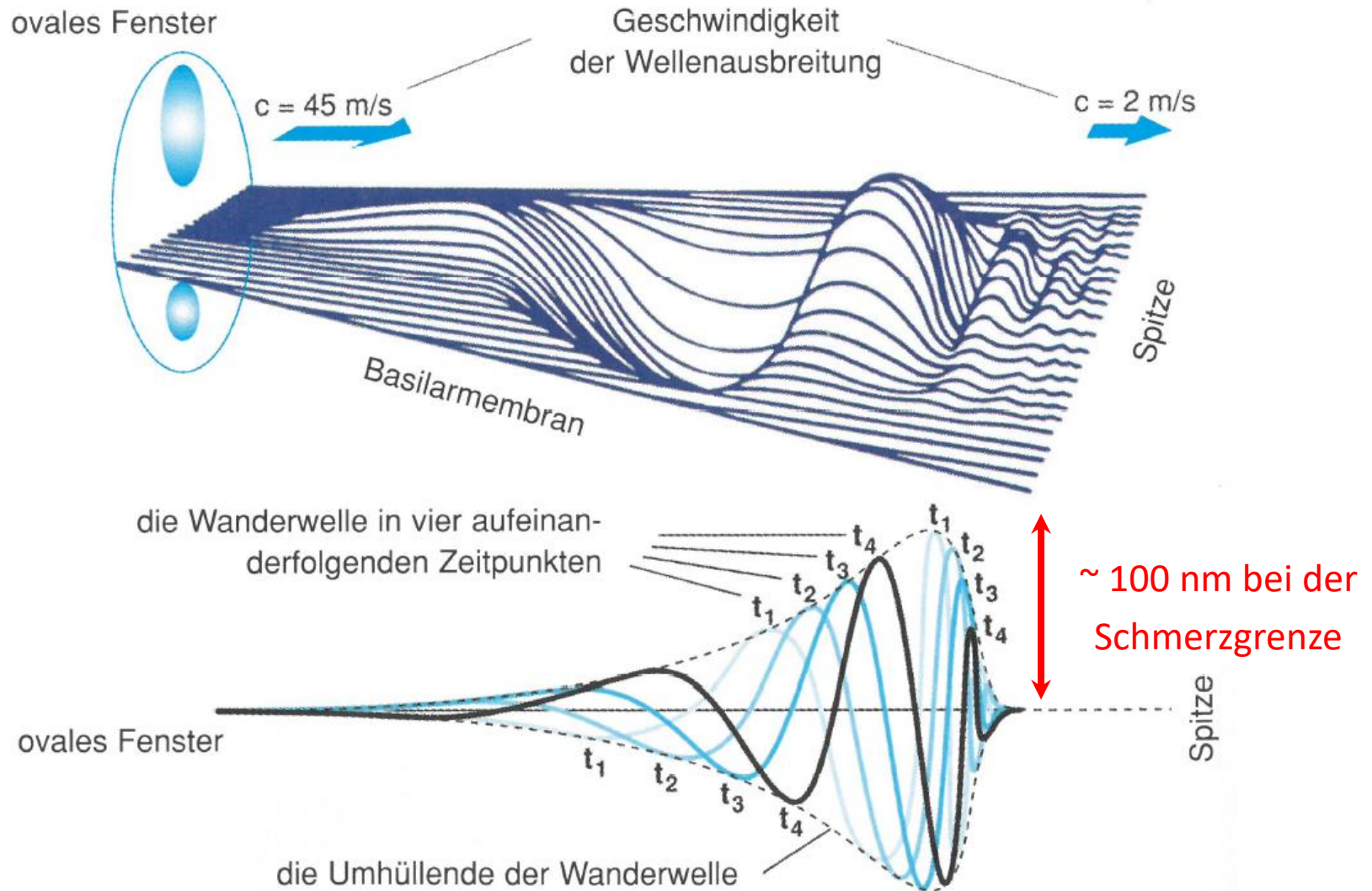
Wie entstehen die Surfwellen?



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

Bewegung der Wanderwellen

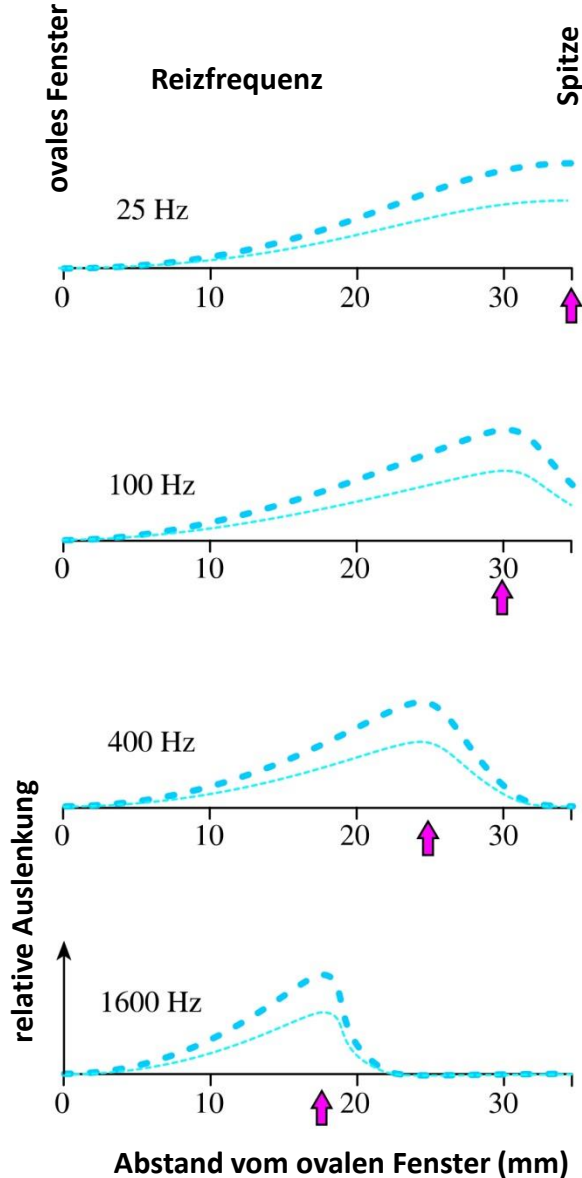
Die Geschwindigkeit der „Surfwellen“ ist kleiner, als die Schallgeschwindigkeit (1440 m/s).



Wanderwellen - Simulation



Frequenz- und Intensitätsanalyse

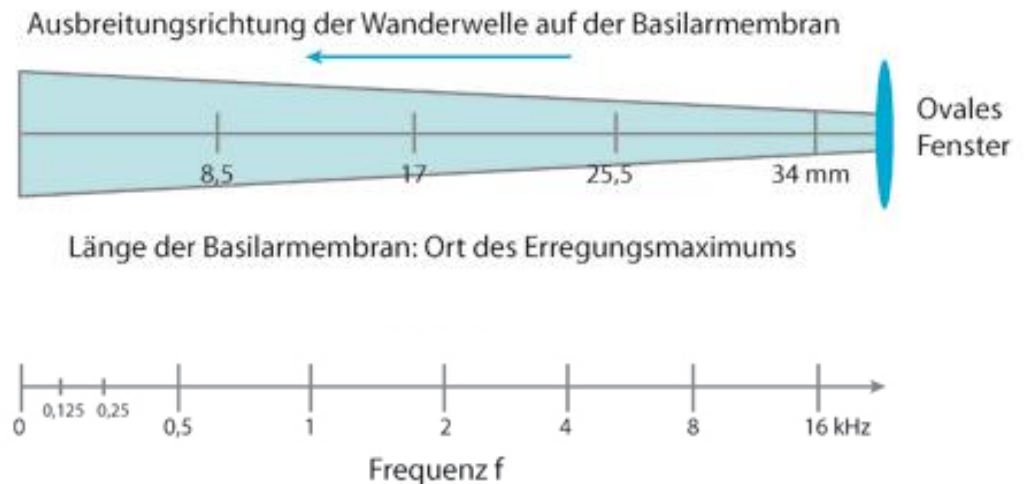


Frequenz:

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

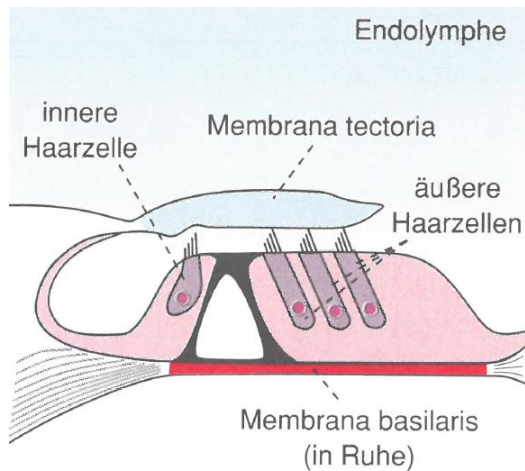
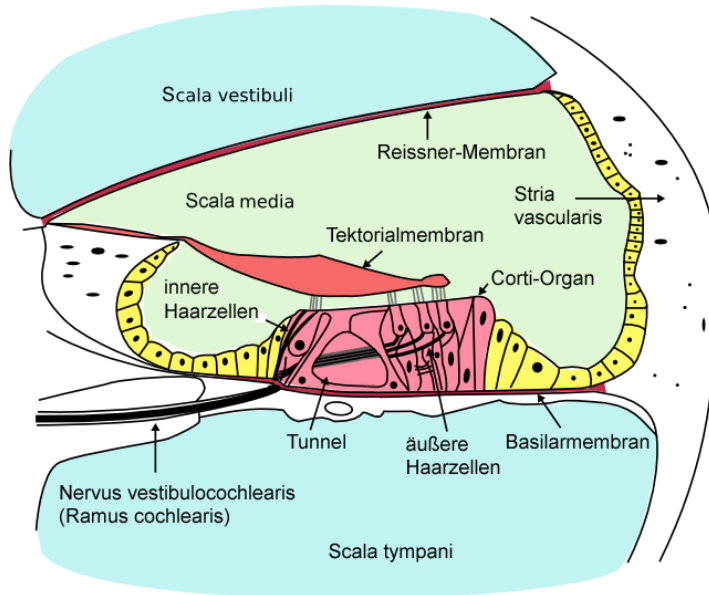
Intensität:

- ~Maximale Auslenkung (Amplitude) der Wanderwelle.

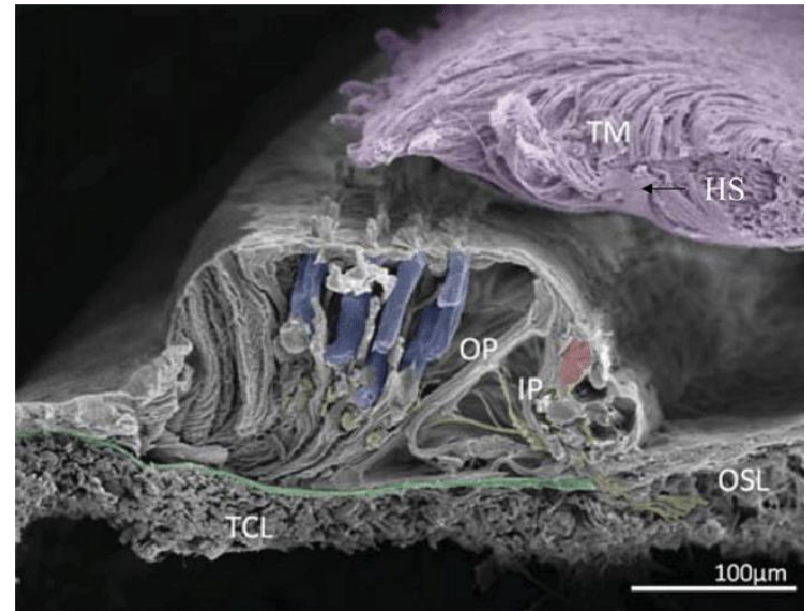


Der Aufbau des Corti-Organ

Schnitt durch die Hörschnecke



Aufnahme mit Rasterelektronenmikroskop



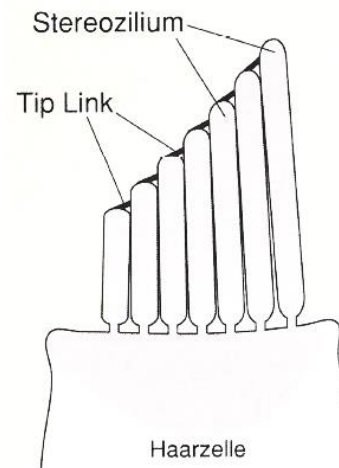
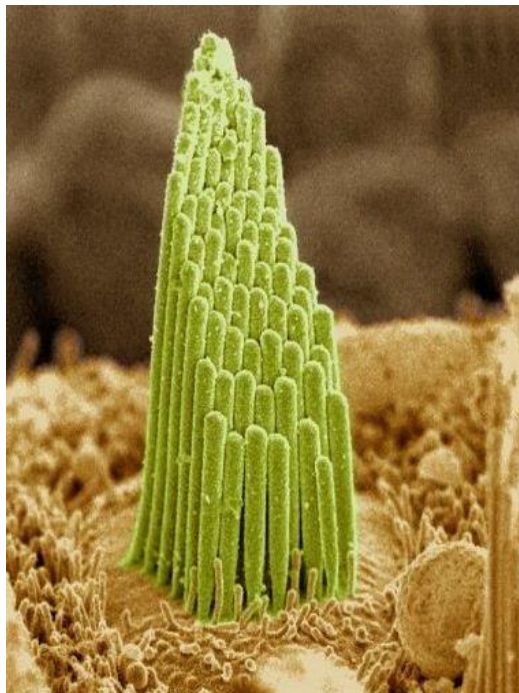
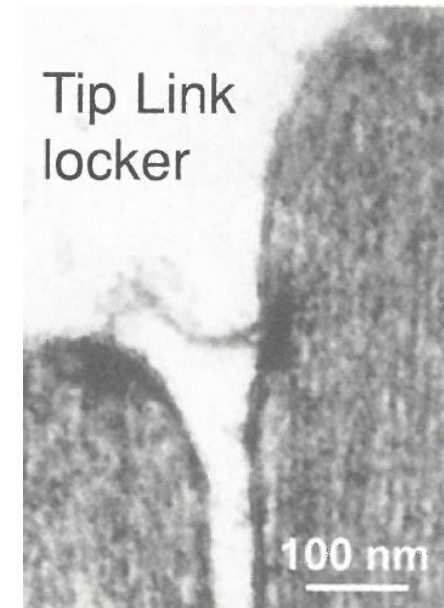
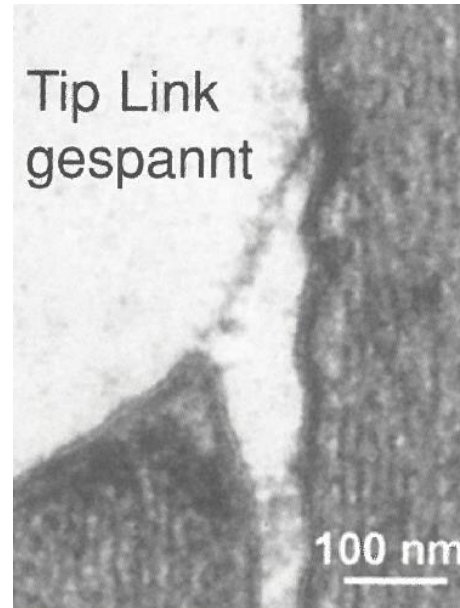
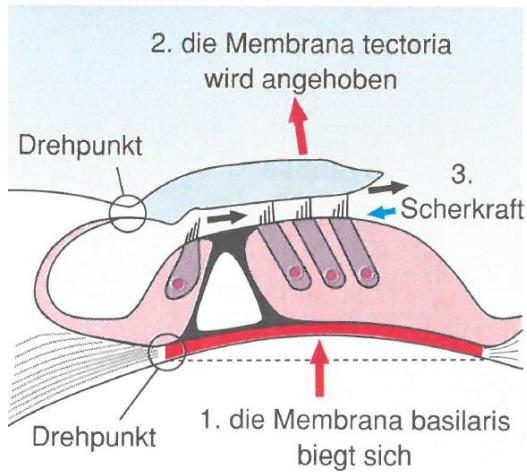
Innere Haarzellen:

- Anzahl: 3500
- mechano-elektrische Signalumwandlung

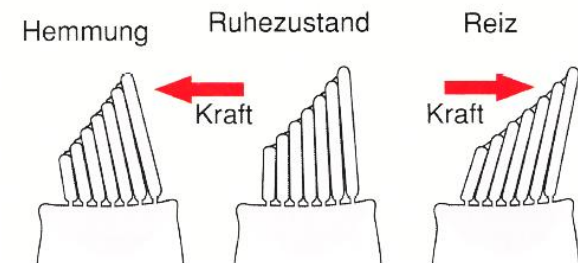
Äußere Haarzellen:

- Anzahl: 12-20 000
- mechanische Verstärkung

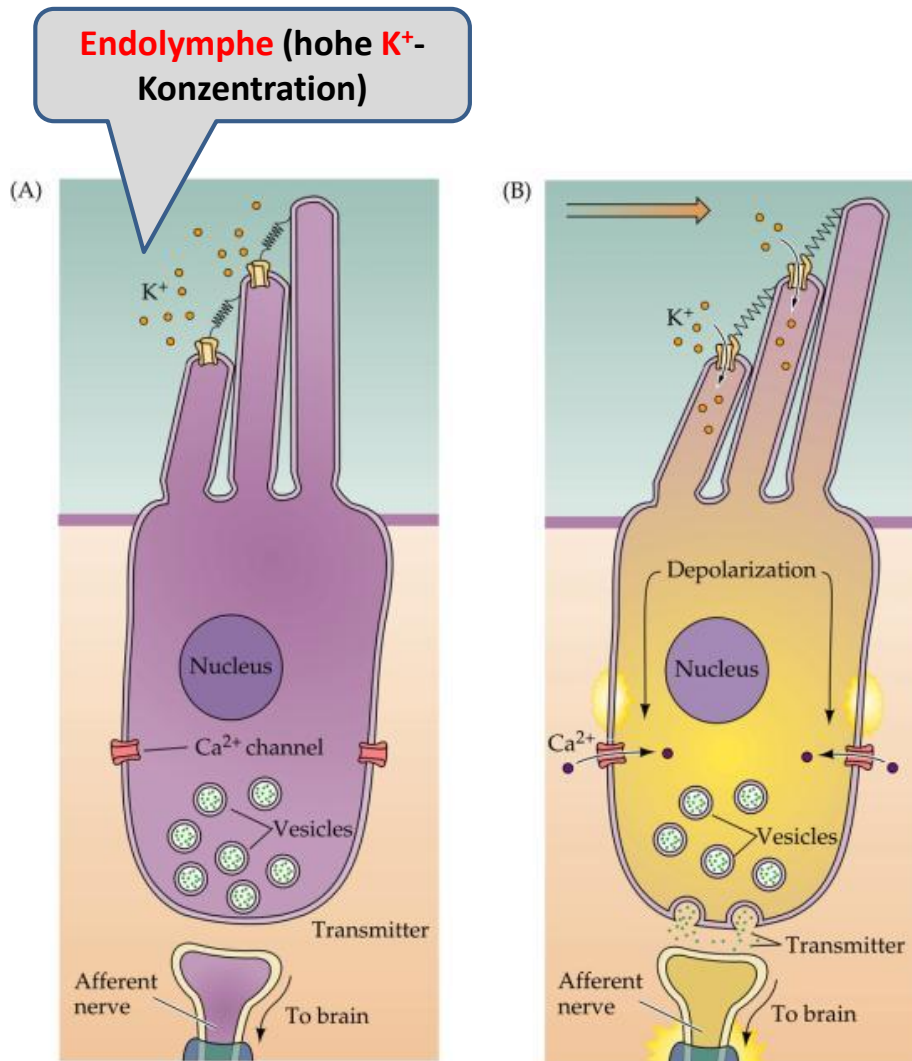
Die Funktion der **innere** Haarzellen #1



- **mechano-elektrische Signalumwandlung**



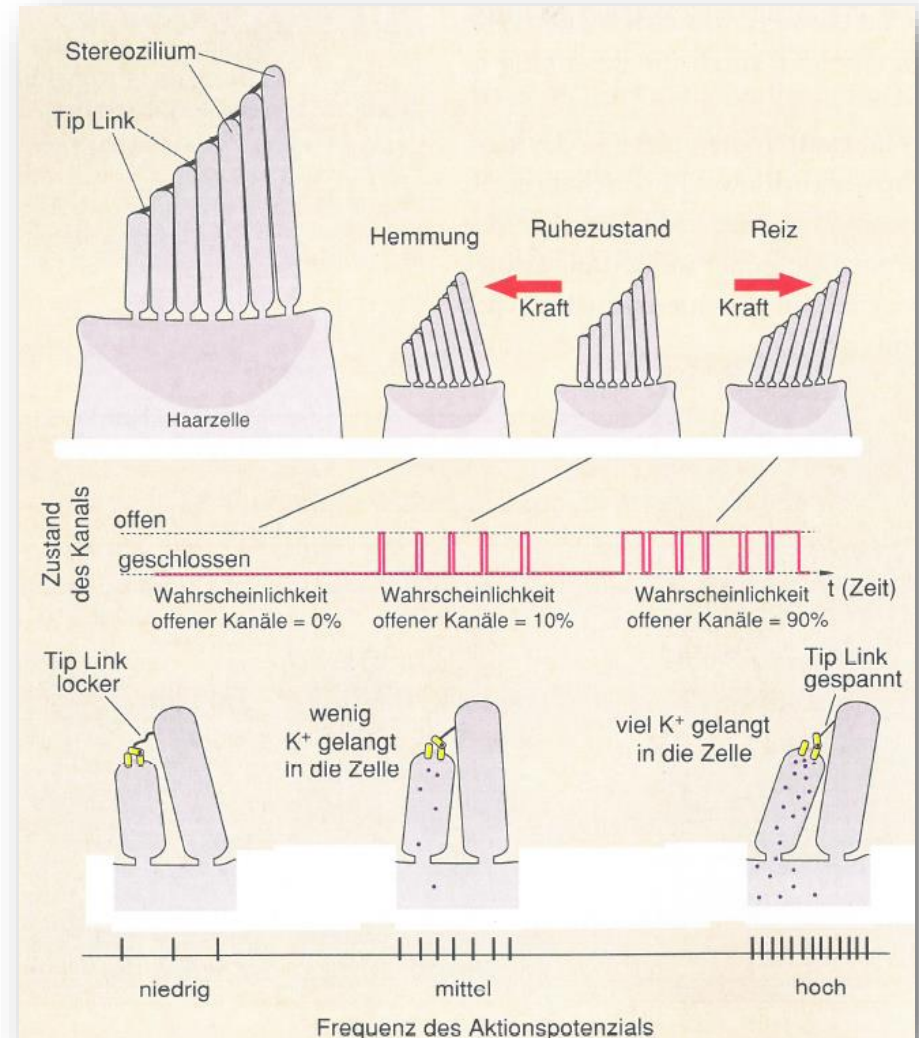
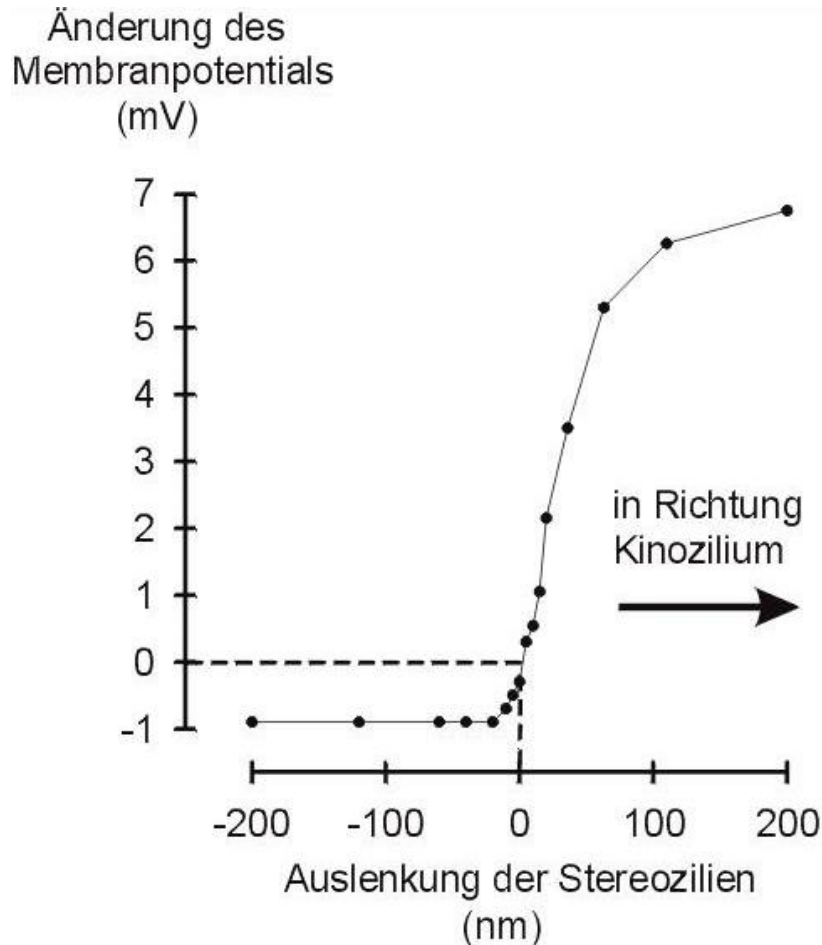
Die Funktion der **innere** Haarzellen #2



1. **Kraftwirkung:** Auslenkung der Zilien.
2. **K^+ -Einstrom:** Öffnung der **mechano-sensitiven K^+ -Kanäle (Tip Link)**.
3. **Depolarisation:** Änderung des Ruhepotentials.
4. **Ca^{2+} -Einstrom:** Öffnung der spannungsempfindlichen Ca^{2+} -Kanäle.
5. **Neurotransmitter-Freisetzung:** in den synaptischen Spalt.
6. **Depolarisation des afferenten Neurons:** Aktionspotenzial Impulse in die Richtung des Gehirns.

Die Funktion der **innere** Haarzellen #3

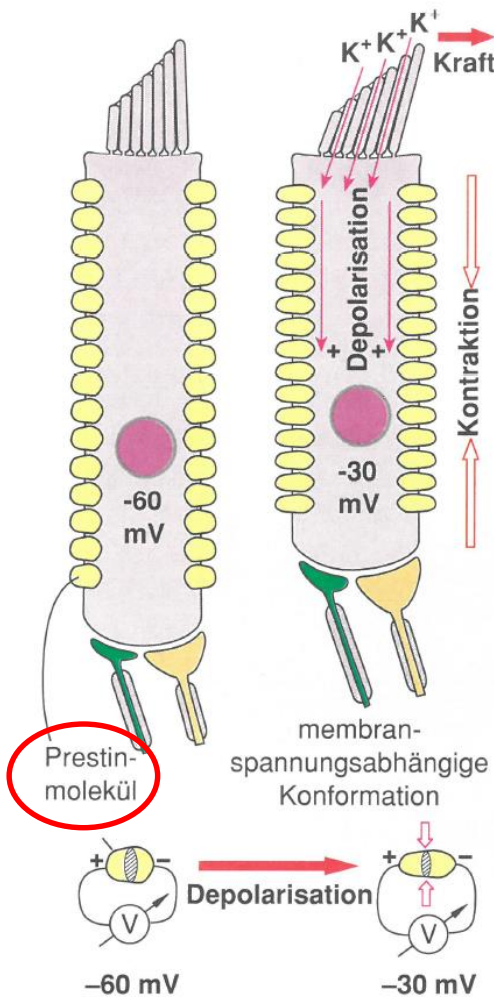
Rezeptorpotenzial (Mikrophonpotenzial)



Die Funktion der äußeren Haarzellen

Aktive mechanische Verstärkung

Die Länge der Haarzellen ändert
im Takt der Töne



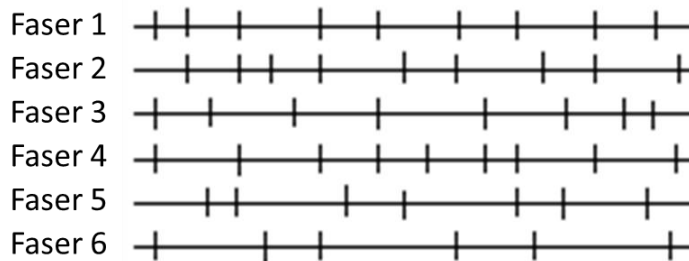
Vibration der Haarzellen → Schwingung der
Basilarmembran mit höherer Amplitude →
positiv rückgekoppelter Verstärker (+50 dB)

Die Kodierung der akustischen Information

„Volleyballtheorie“

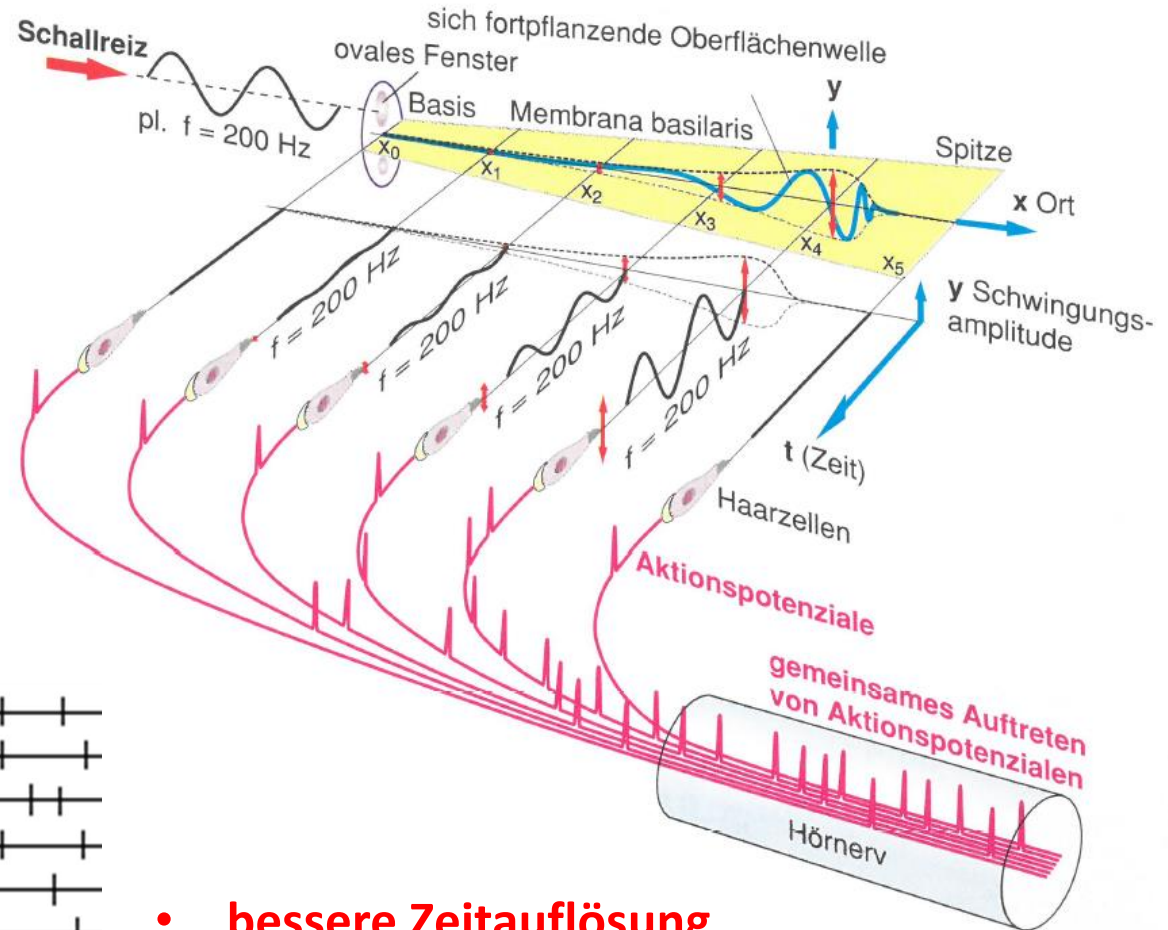


Größere Zahl der gemeinsamen Berührungen erleichtert das Abschlagen des Balls.



Zusammen

Signal



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

Richtungshören

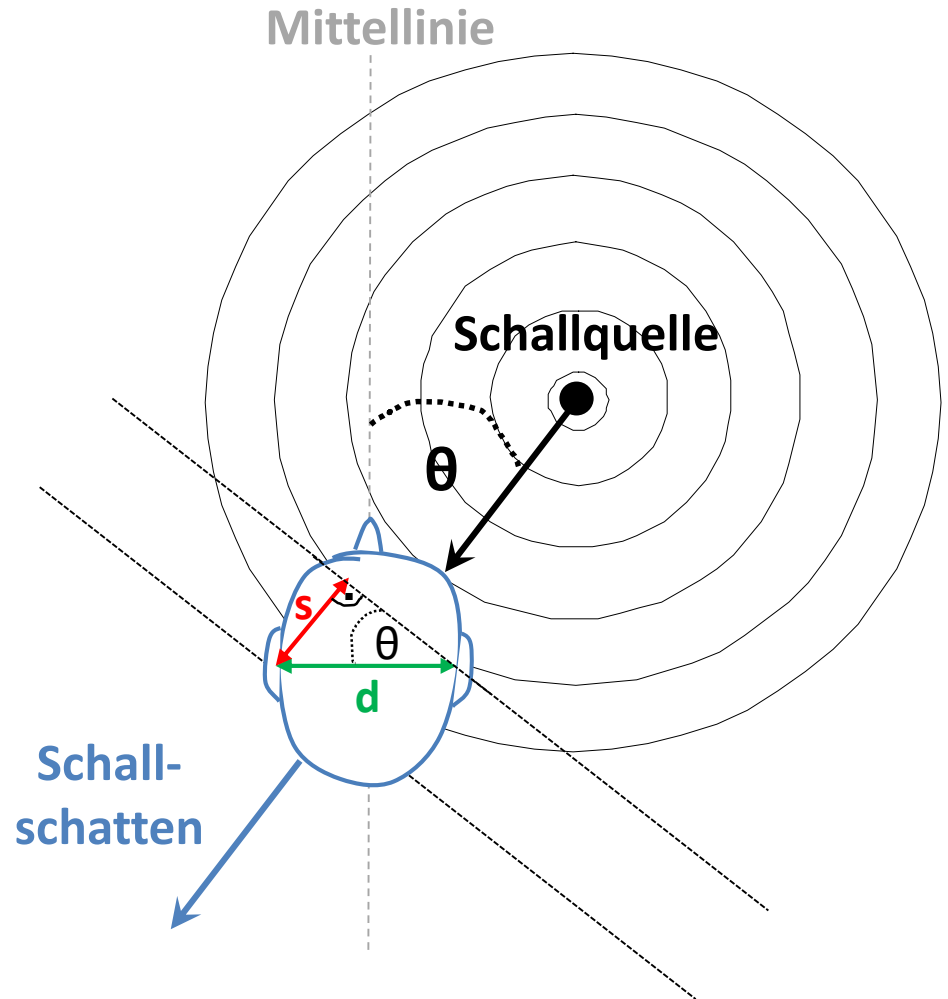
zweiohriges Richtungshören

- aufgrund der **Zeitverzögerung** (Das Gehör kann Laufzeitdifferenzen ab $10\text{ }\mu\text{s}$ erkennen),
 - sei **$d = 20\text{ cm}$**
 - sei $\theta = 1^\circ$ und 90°

$$s = d \cdot \sin \theta$$

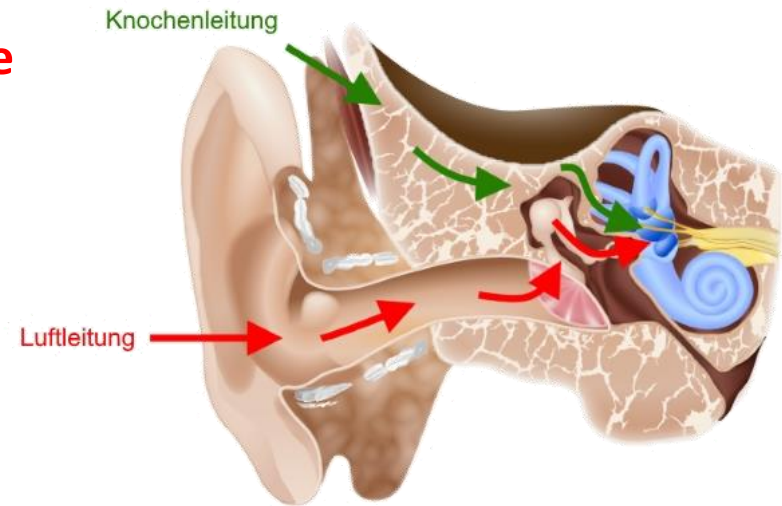
$$t = \frac{s}{c} = \frac{s}{340}$$

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



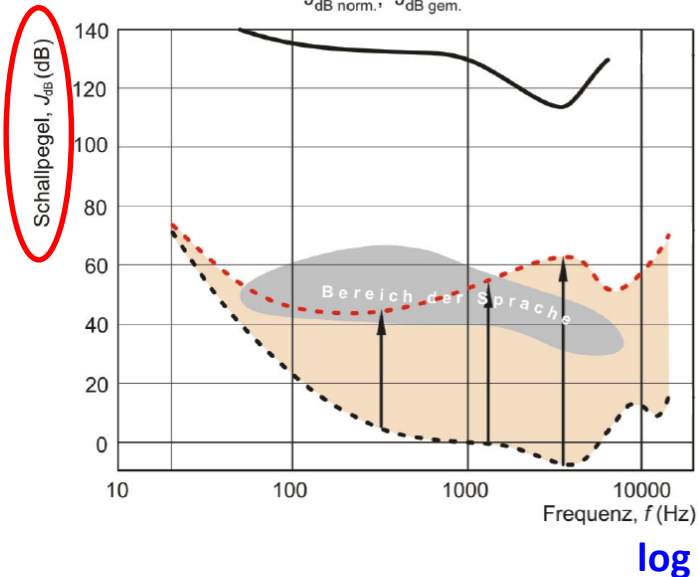
Audiometrie #1: Prinzip

- Sprachaudiometrie ↔ Tonaudiometrie
- Luftleitung ↔ Knochenleitung



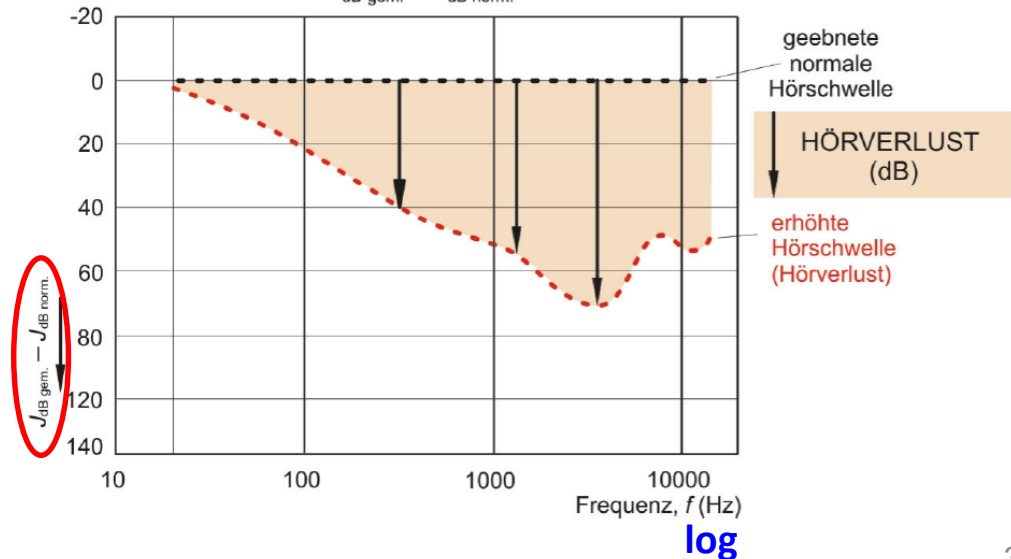
ISOPHONE

$J_{dB \text{ norm.}}$ $J_{dB \text{ gem.}}$

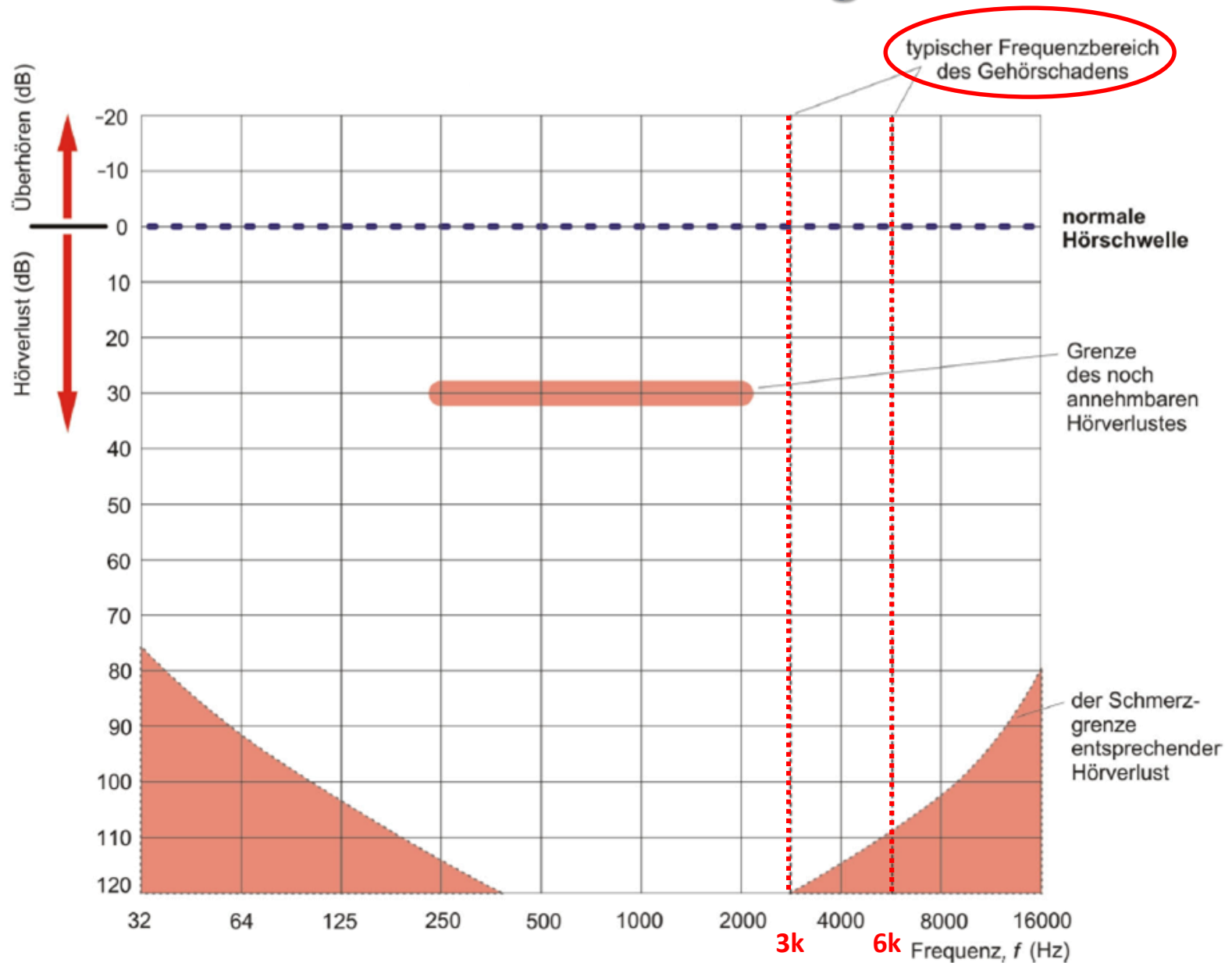


AUDIOGRAMM

$J_{dB \text{ gem.}}$ — $J_{dB \text{ norm.}}$

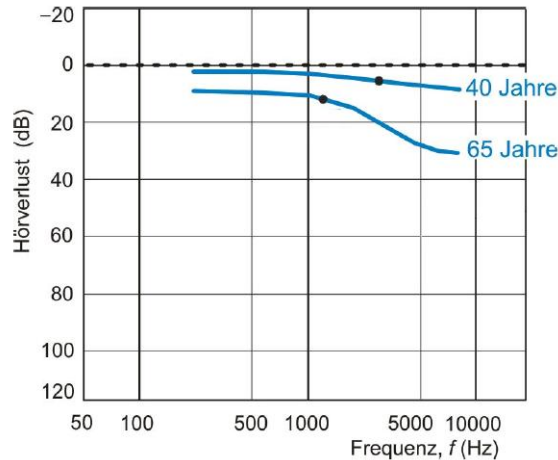


Audiometrie #2: Audiogramm



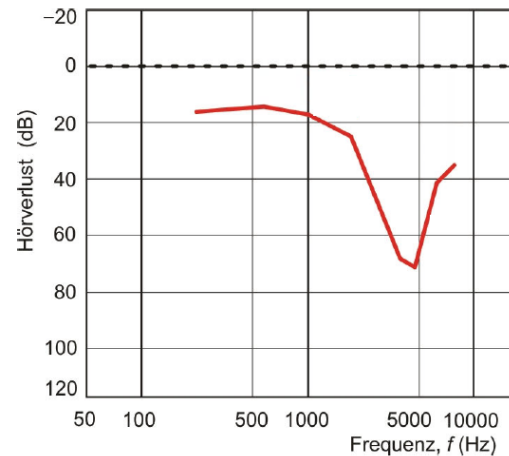
Audiometrie #3: Schwerhörigkeiten

Altersschwerhörigkeit



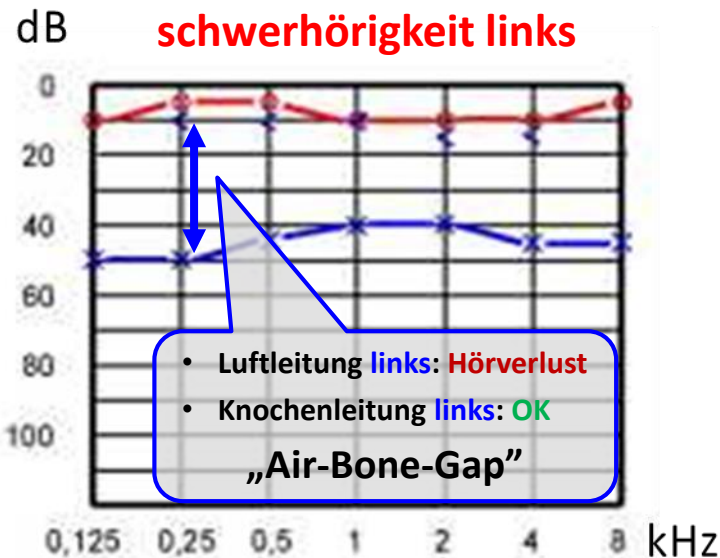
normale
Hörschwelle

Lärmschwerhörigkeit



normale
Hörschwelle

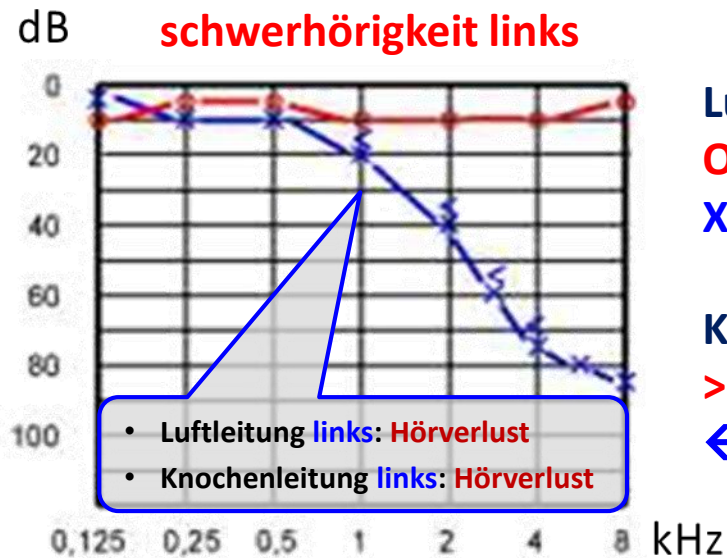
Schallleitungs- schwerhörigkeit links



- Luftleitung links: Hörverlust
- Knochenleitung links: OK

„Air-Bone-Gap“

Schallempfindungs- schwerhörigkeit links



- Luftleitung links: Hörverlust
- Knochenleitung links: Hörverlust

Luftleitung
O--O Rechts
X--X Links

Knochenleitung
>--> Rechts
←--← Links