

# Sensorische Funktionen. Gehör und Audiometrie.

**Balázs Kiss**

kissb3@gmail.com



**Nanobiotechnologie und Einzelmolekül-Forschungsgruppe und  
Myofilament-Mechanobiophysik Forschungsgruppe,  
Semmelweis Universität,  
Insitut für Biophysik und Strahlenbiologie.**

*17. Mai 2021.*

# 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“)

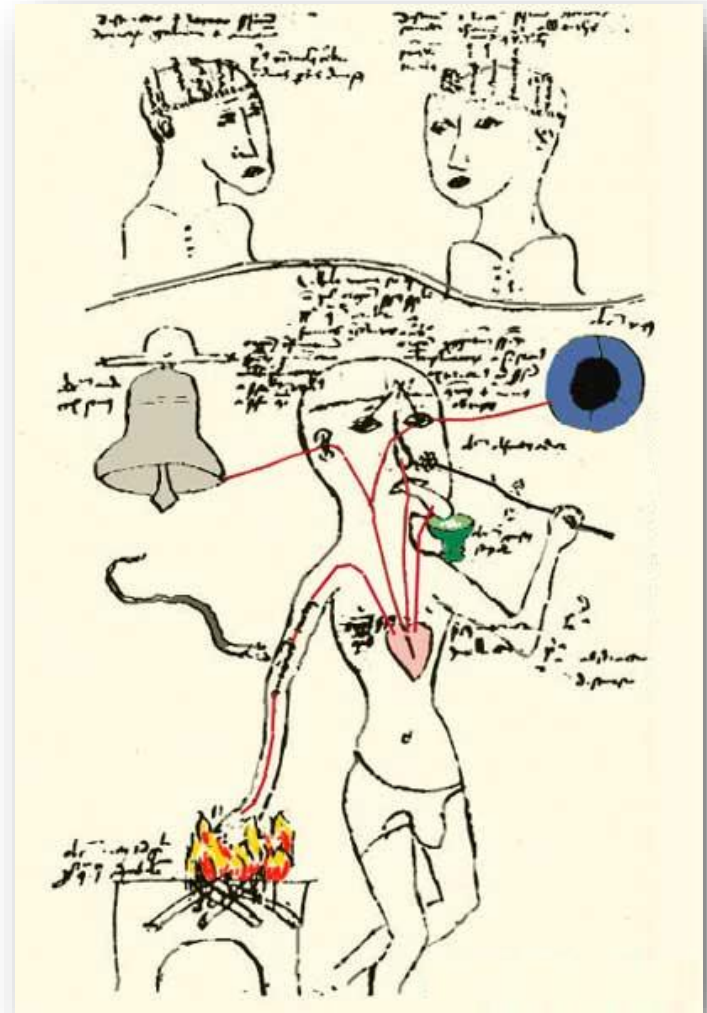
## 3. Das Sehen (s. 1. Semester, 5. Vorlesung: Optik des Auges)

# **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



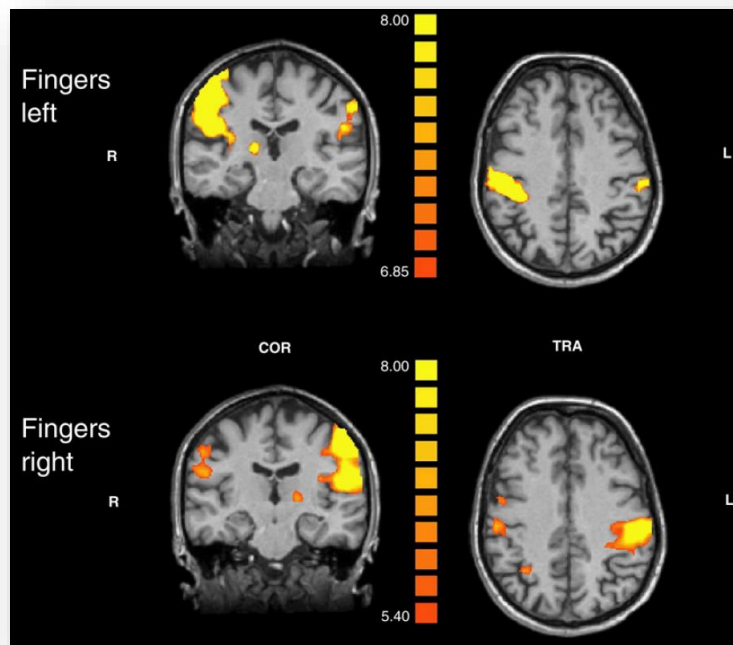
Nach Jung, 1984.

# 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

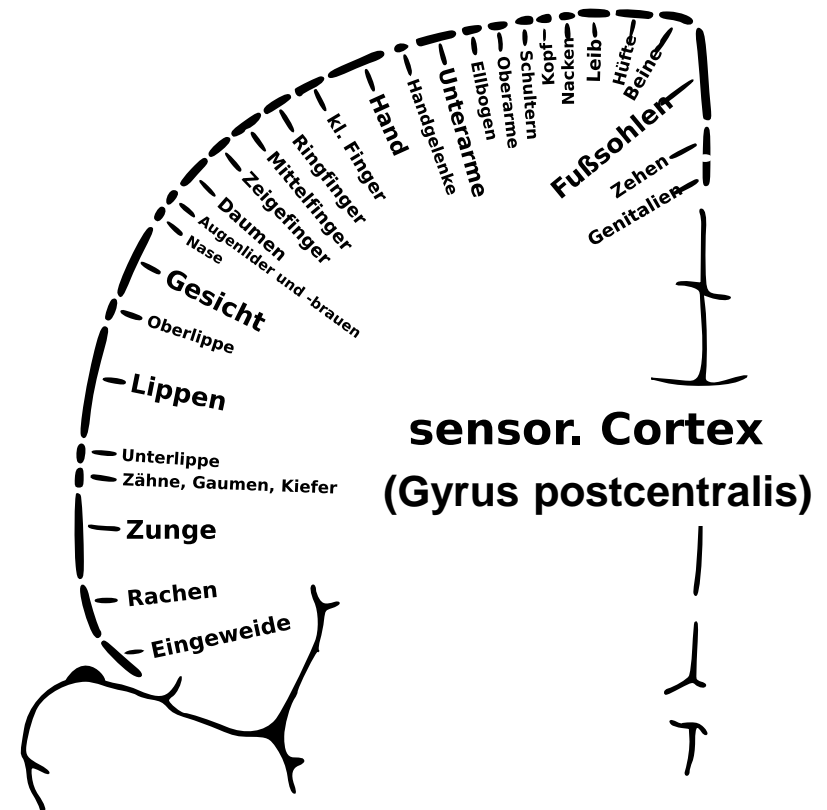


fMRI: BOLD-Mappe

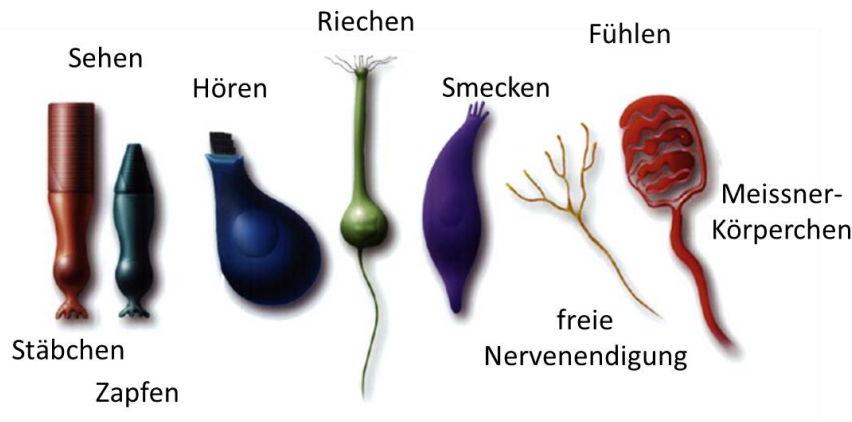
(Blood-Oxygen-Level-Dependent Imaging)

## 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.

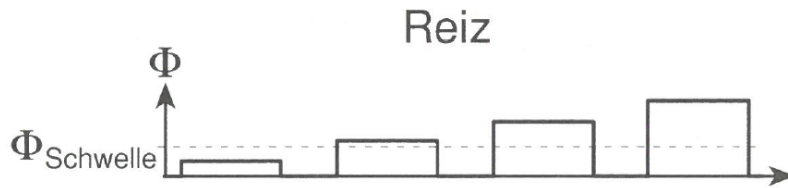
	Modalität	Rezeptor	Organ
wahrgenommen	Sehen	Stäbchen und Zapfen	Auge
	Hören	Haarzelle	Ohr (Corti-Organ)
	Riechen	Olfaktorisches Neuron	Schleimhaut
	Schmecken	Geschmacksrezeptoren	Geschmacksknospe
	Radialbeschleunigung	Haarzelle	Ohr (Gleichgewichtsorgan)
	Lineare Beschleunigung	Haarzelle	Ohr (Gleichgewichtsorgan)
	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**

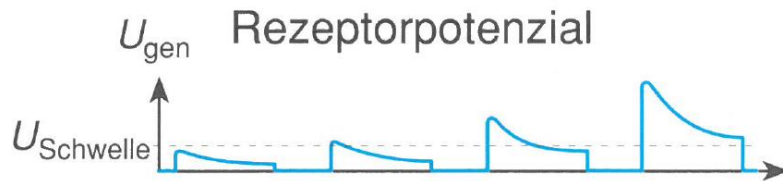
- akustische Rezeptoren: thermische Bewegung der  $N_2$  und  $O_2$  Moleküle in der Luft
- Photorezeptoren: 1-2 Photonen

# Die Rezeptoren und die Nervenfaser

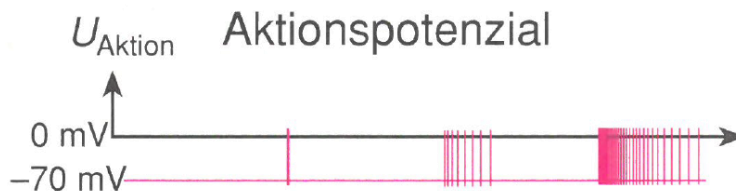
- **adäquater Reiz:** wofür ein Rezeptor die größte Empfindlichkeit besitzt



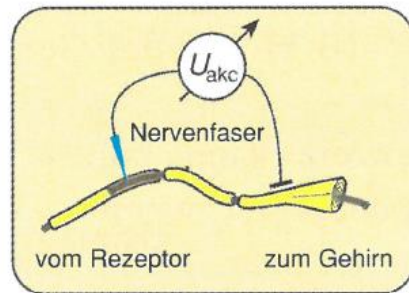
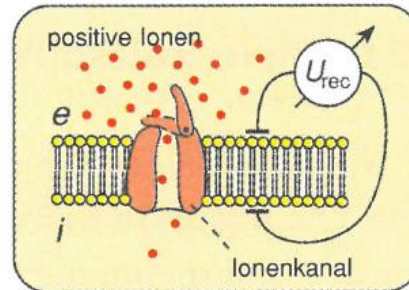
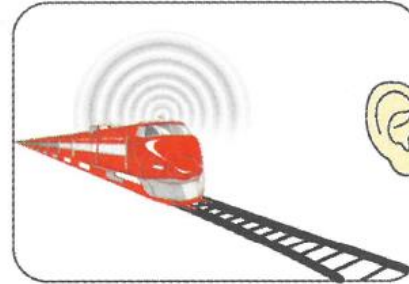
- ↓
- **Amplitudenkodierung**
  - **Adaptation**



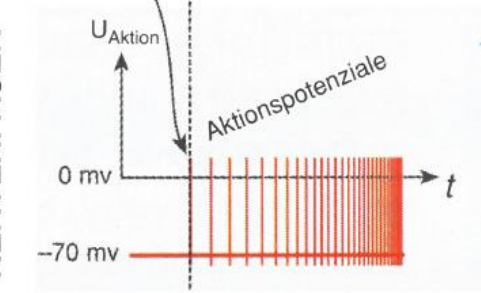
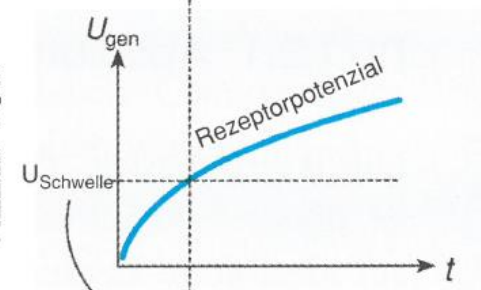
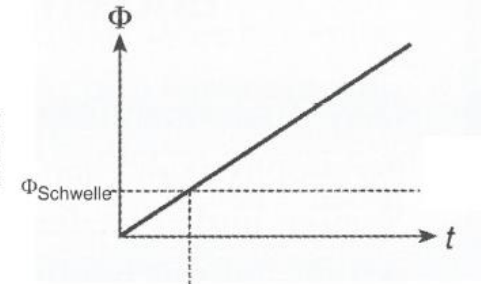
- ↓
- **Frequenzkodierung**  
Modalität (Typ), Intensität, Zeitdauer, Ort, usw.



## Prozess: Gehör

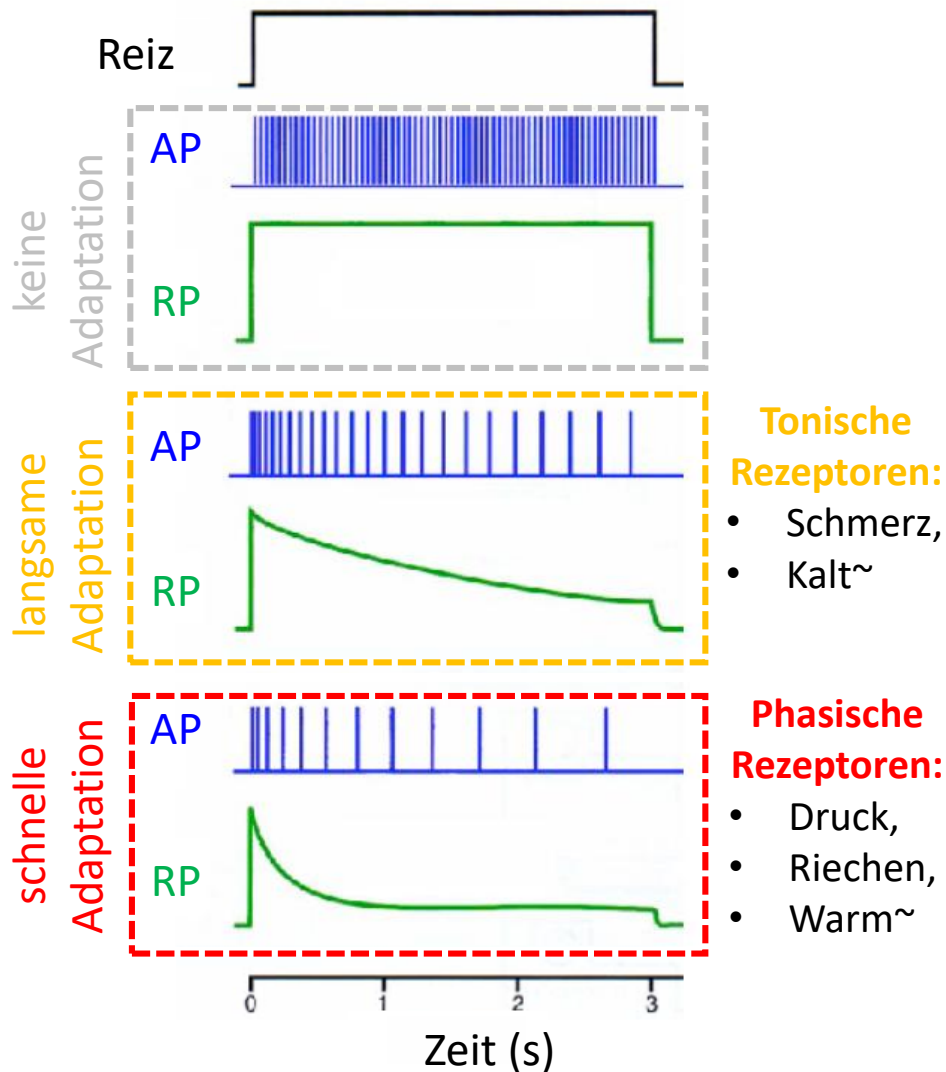


## gemessenes Signal

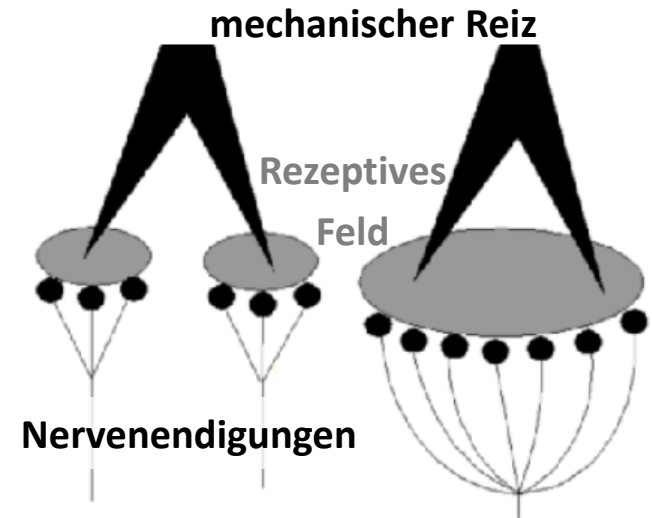


# Spezifische Aspekte der Rezeptoren

## Zeitdauer, Adaptation

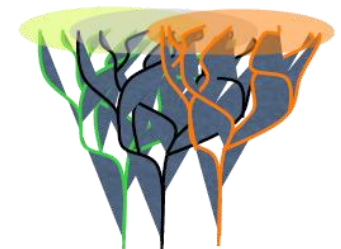


## Ortsbestimmung



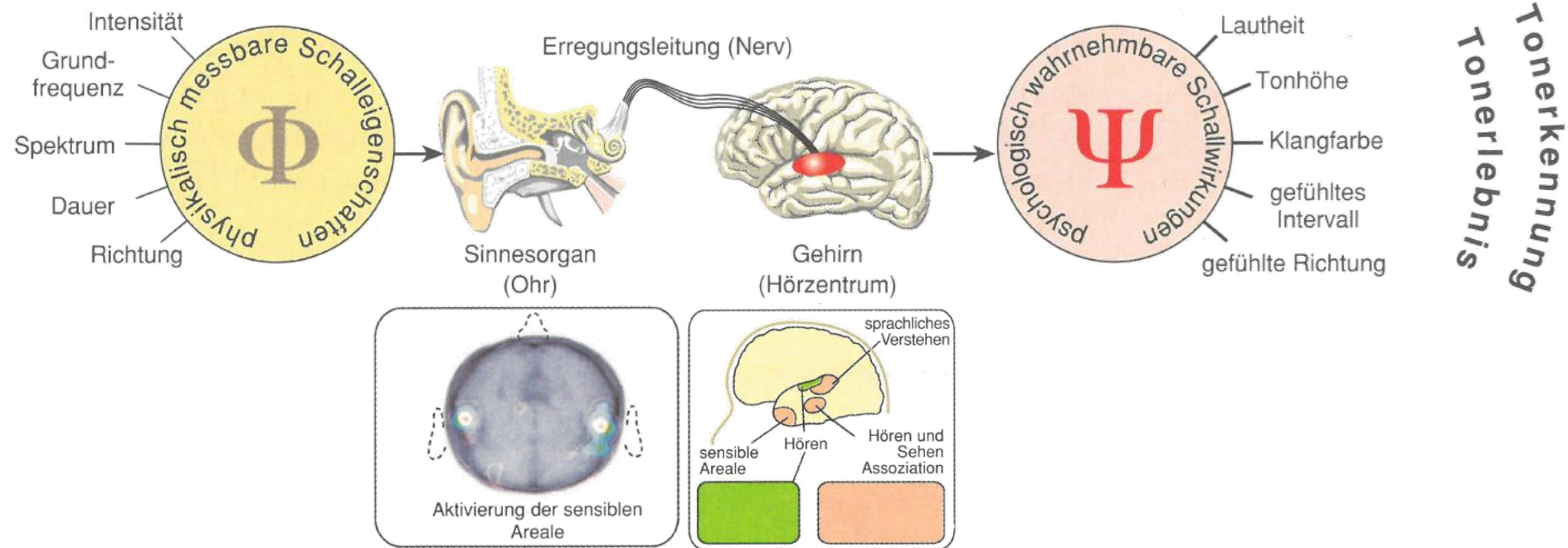
**Rezeptives Feld:** Bereich von Sinnesrezeptoren, der an ein einziges nachgeschaltetes Neuron Informationen weiterleitet.

- Konvergenz
- Überlappung





# Psychophysische Gesetze



## Weber-Fechner Gesetz

Die relative Änderung des Reizes ist proportional zur Änderung der Empfindungsstärke.

$$\Delta \Psi = \text{konst} \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Phi} \rightarrow \Psi = \text{konst} \cdot \lg \frac{\Phi}{\Phi_0}$$

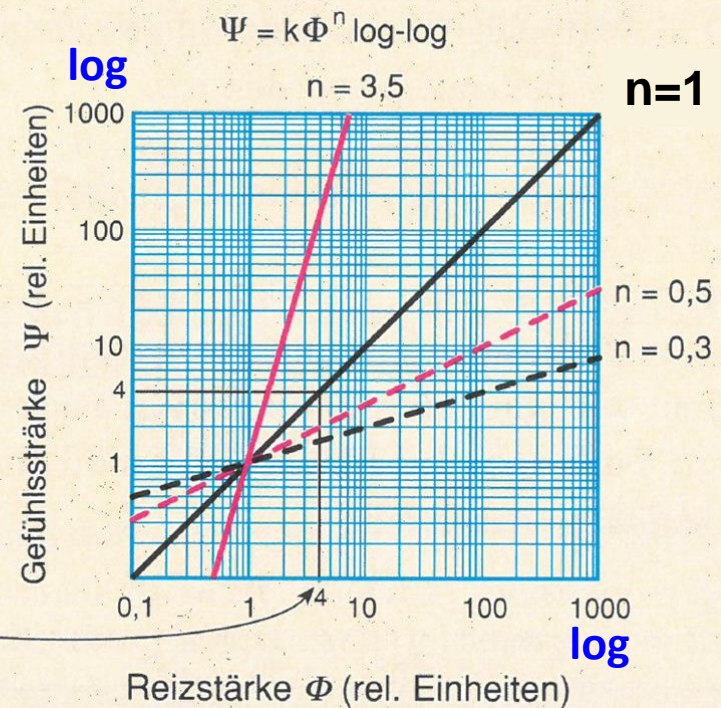
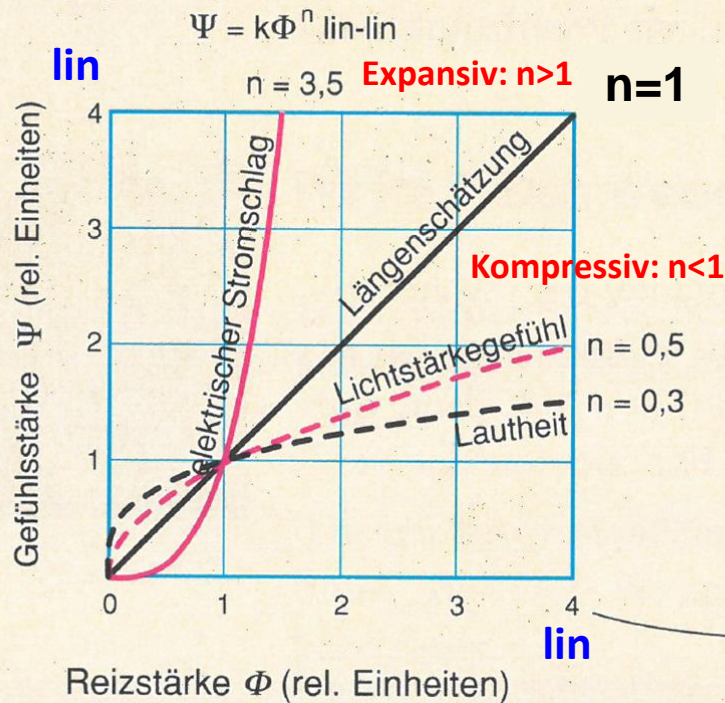
## Stevens-Gesetz

Die relative Änderung des Reizes ist proportional zur relativen Änderung des Gefühls.

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

# 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

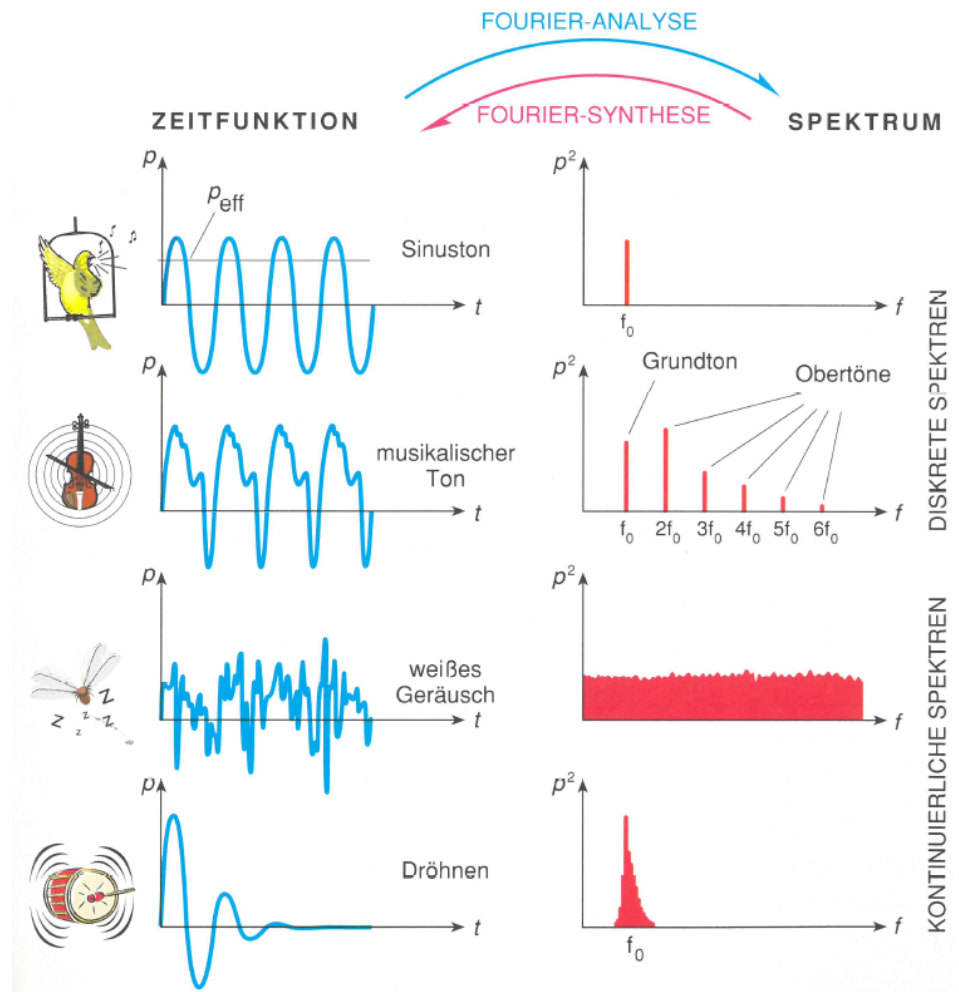
- „... wird von der **Frequenz und der relativen Stärke der sog. Obertöne... d. h. vom Schwingungsspektrum des Tones** bestimmt.” (Helmholtz)

### • Sinuston:

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

### • musikalischer Ton:

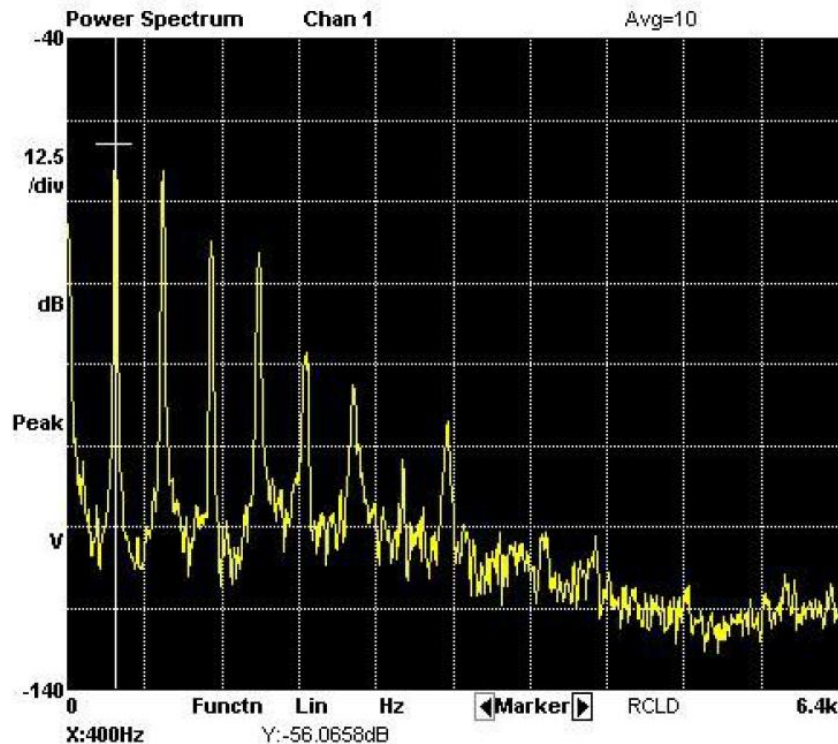
$$p(t) = p_1 \cdot \sin(\omega t) + p_2 \cdot \sin(2\omega t) + p_3 \cdot \sin(3\omega t) + \dots$$



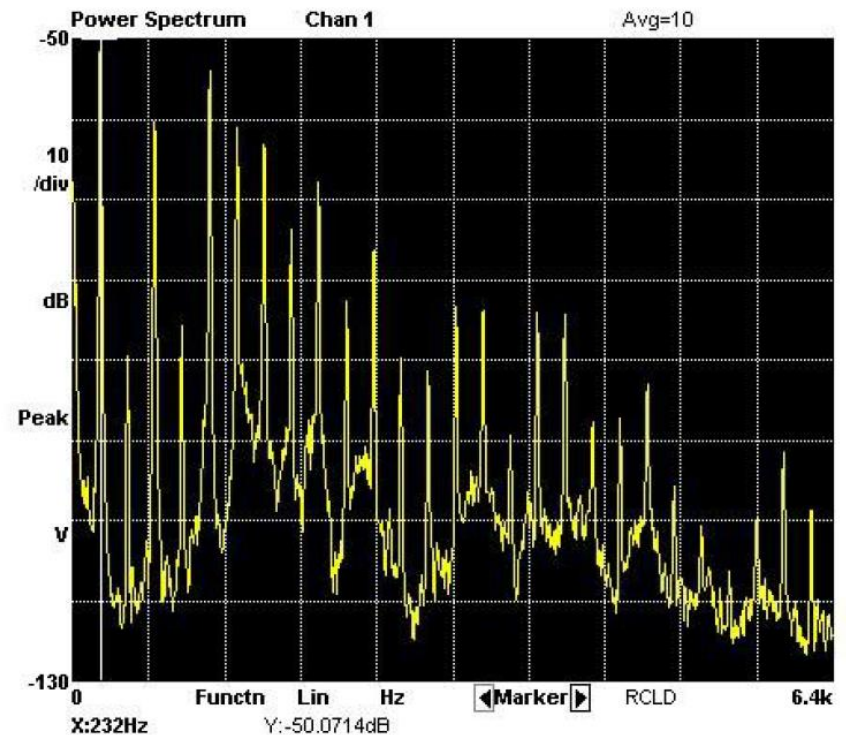


# Frequenzspektren von unterschiedlichen Musikinstrumenten

Querflöte



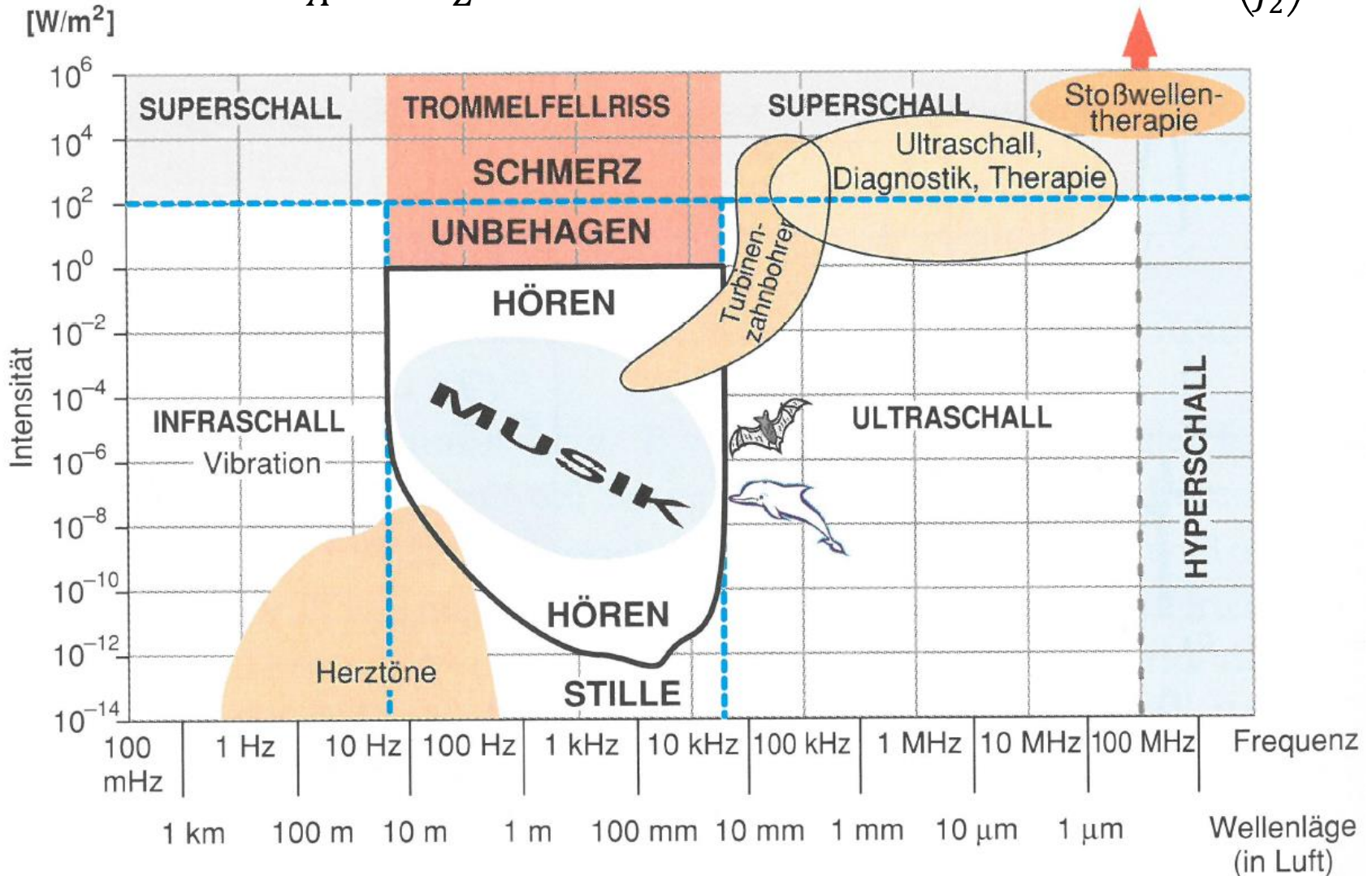
Klarinette



Spektralanalyse: mit Soundcard Scope

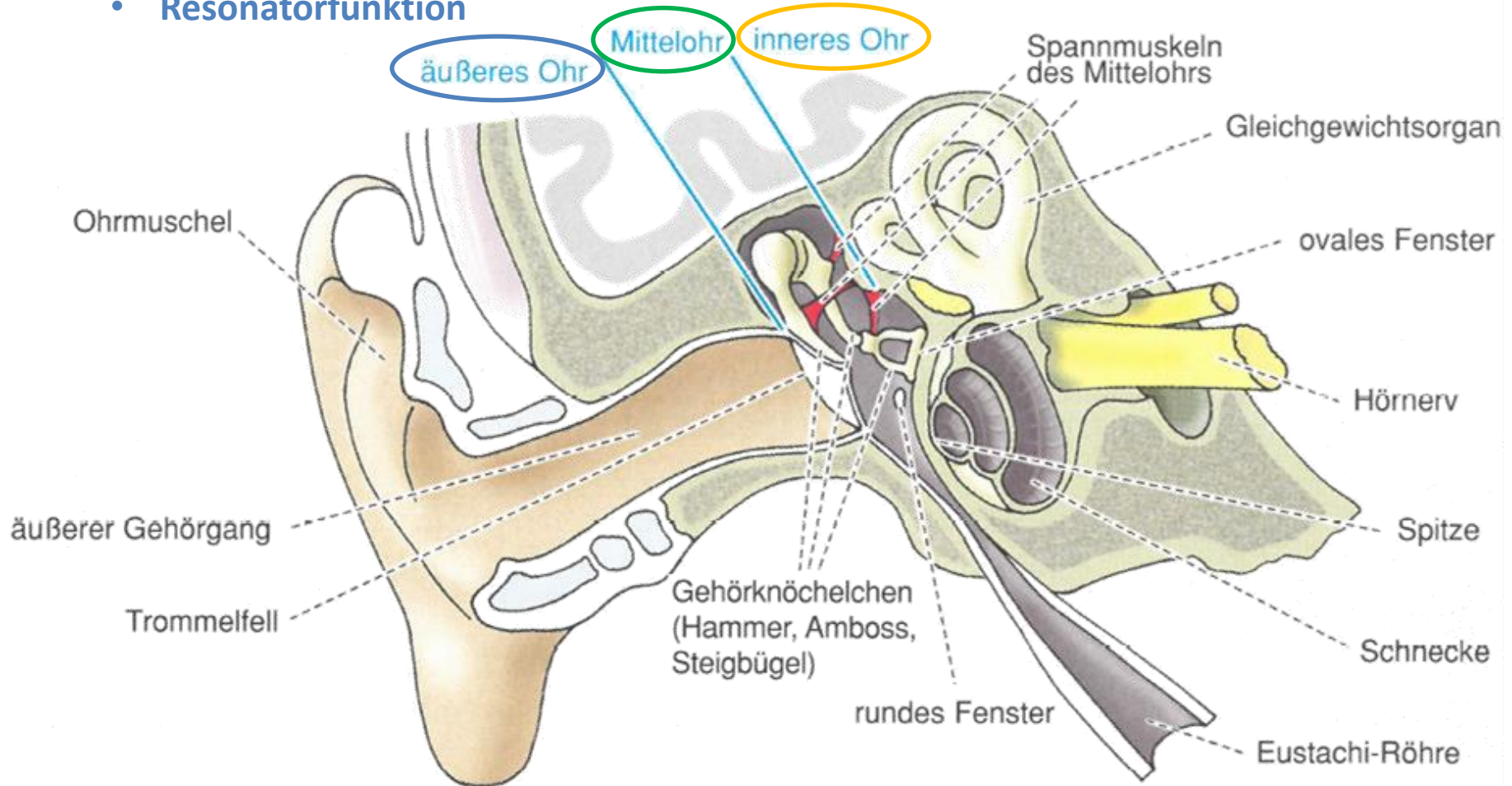
# Frequenz- und Intensitätsbereiche der Töne

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

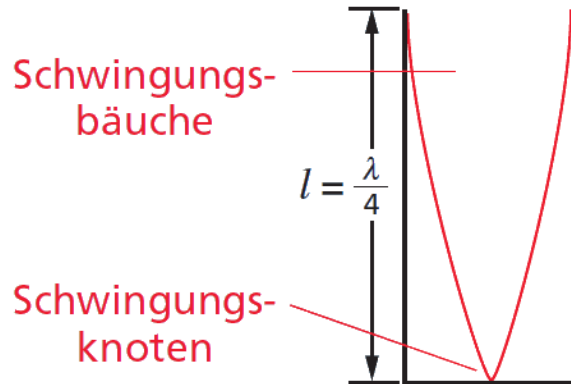
- Impedanzanpassung
- Verstärkung
- Resonatorfunktion
- Schallempfindung
- Beschleunigungsempfindung



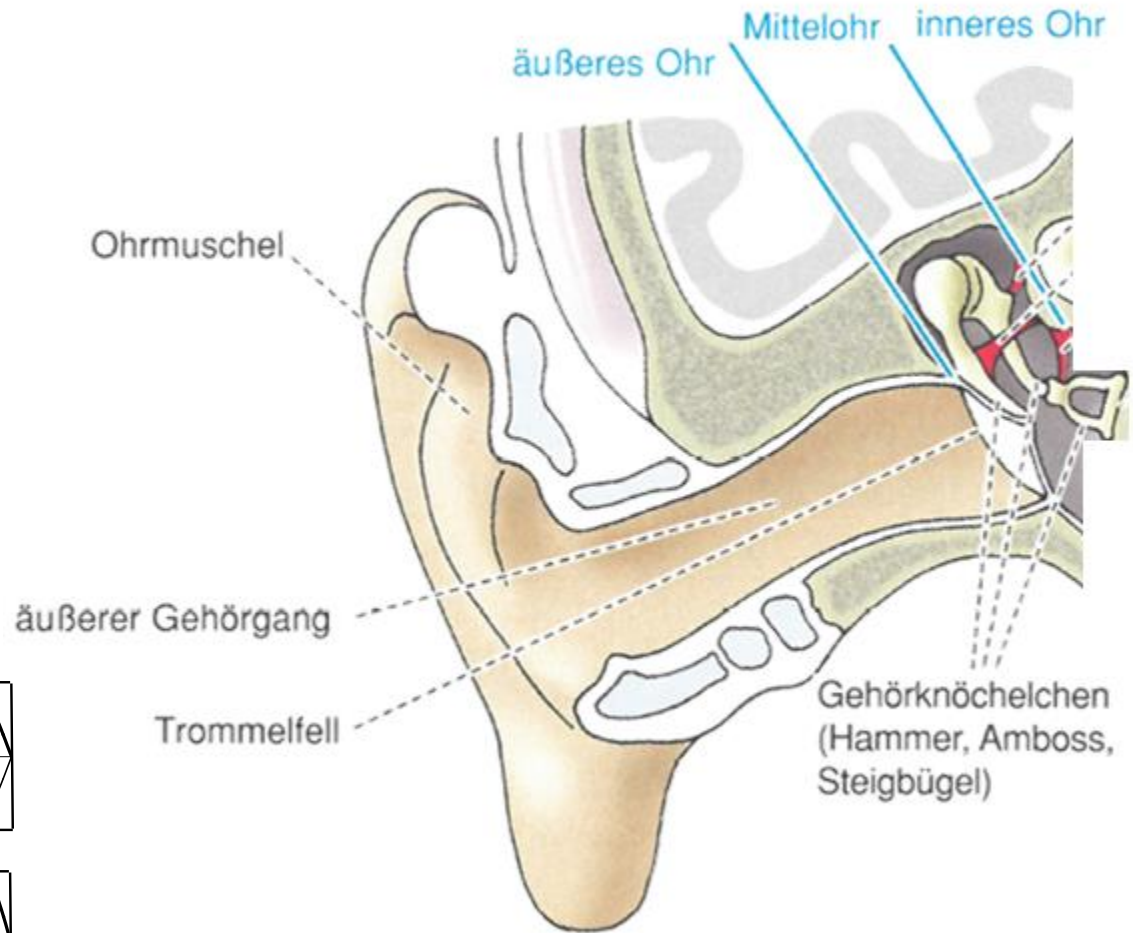
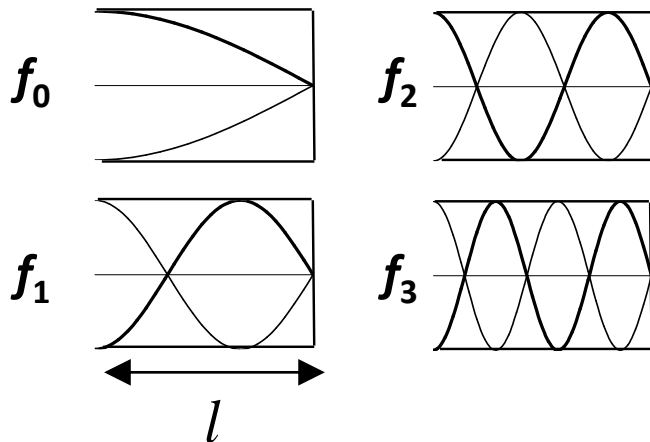


# Resonatorfunktion des Außenohres

## Resonanz bei einer geschlossenen Pfeife



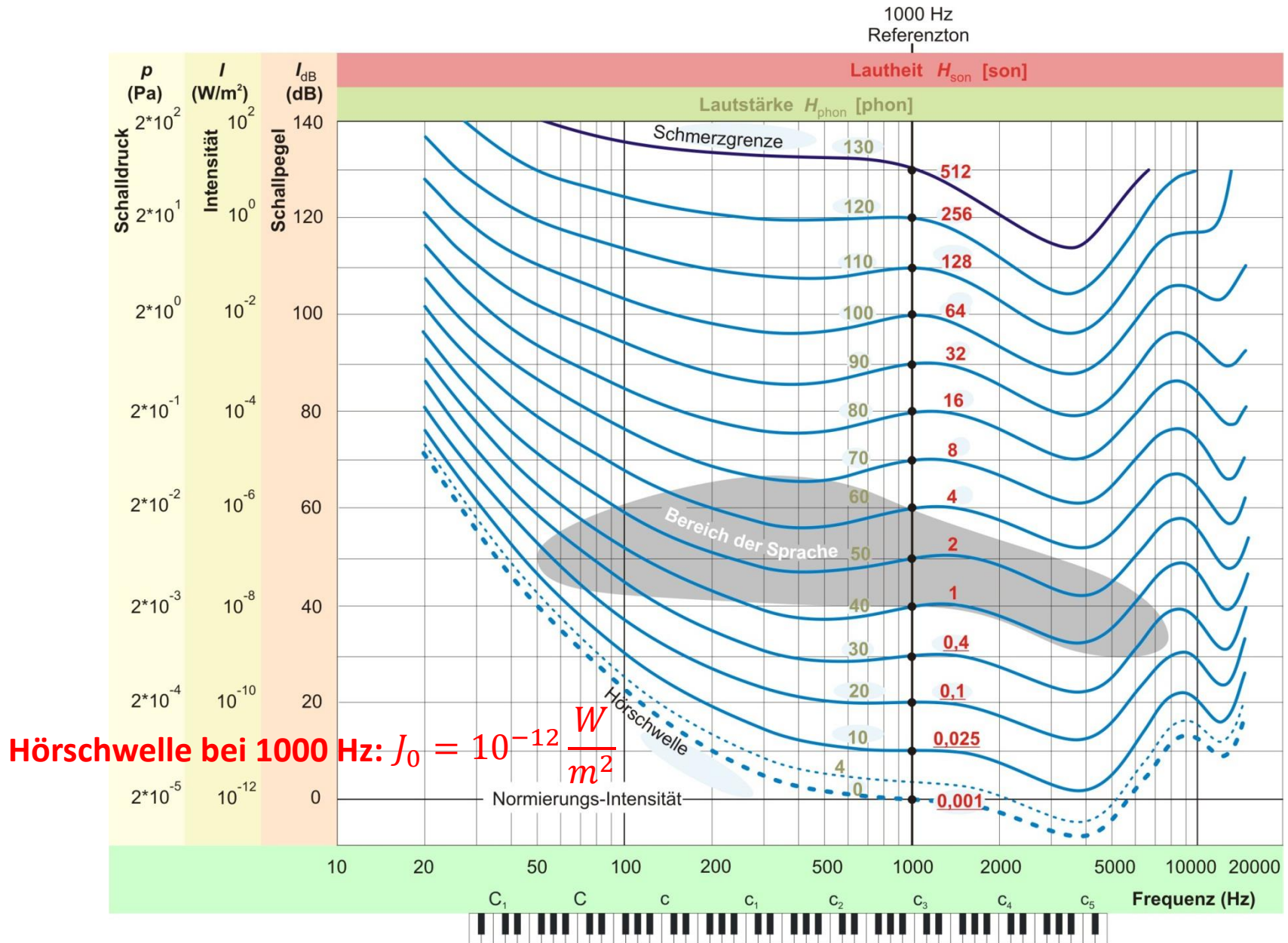
$$f_0 = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4 \cdot l}$$



$$f_0 = 3400 \text{ Hz}$$



# Kurven gleicher Lautstärke



# Das Mittelohr als Impedanzanpasser

**Problem: Reflexion** der Schallwellen durch die Grenzfläche Luft/Gewebe

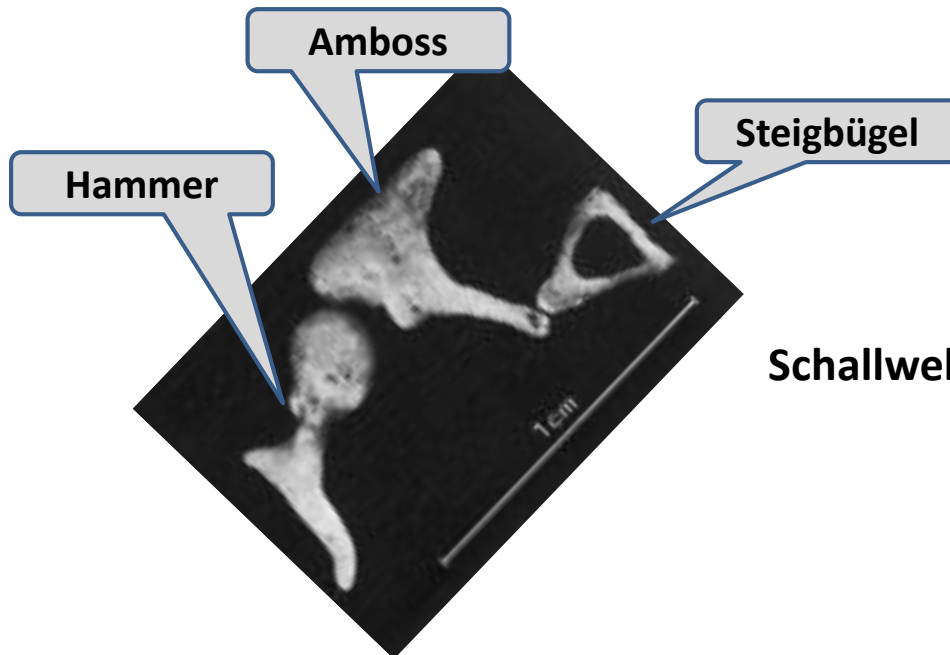
$$R = \frac{J_{\text{refl}}}{J_{\text{ein}}} \approx \left( \frac{Z_{\text{Wasser}} - Z_{\text{Luft}}}{Z_{\text{Wasser}} + Z_{\text{Luft}}} \right)^2 = 0,9989 \quad !$$

Modell des Gewebes: Wasser

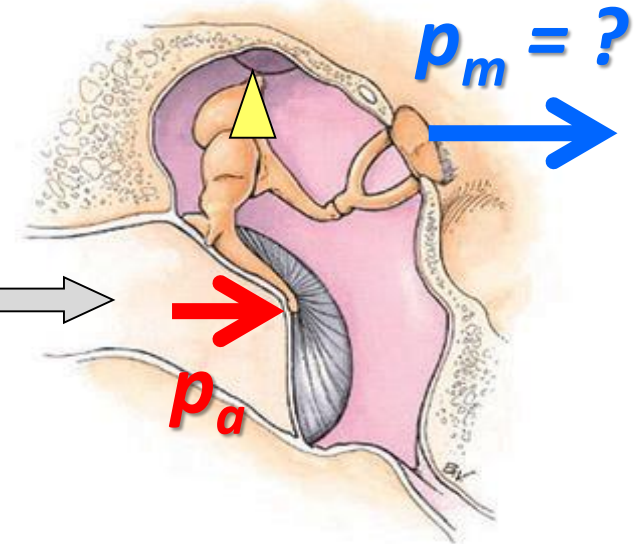
Akustische Impedanz:  $Z = \rho \cdot c$

$$J_{\text{Trommelfell}} = 1 - R = 0,0011$$

Die Funktion von Gehörknöchelchen: Verstärkung durch ein **Hebelsystem**

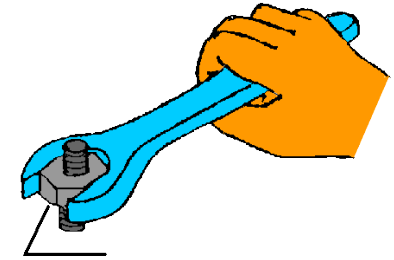
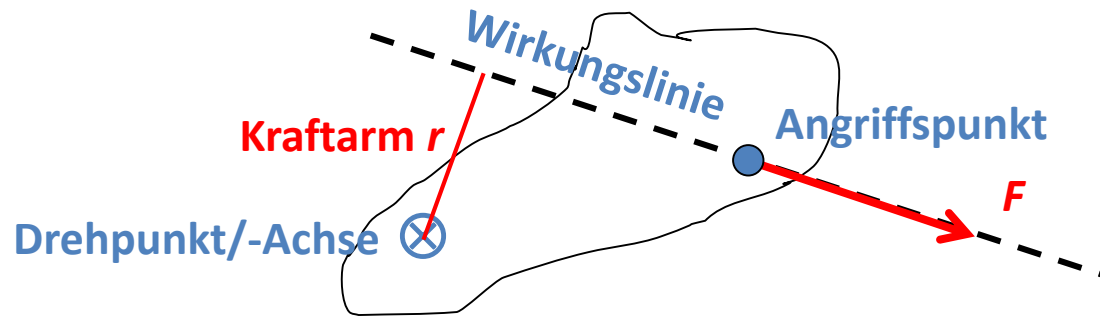


Schallwellen  $\Rightarrow$

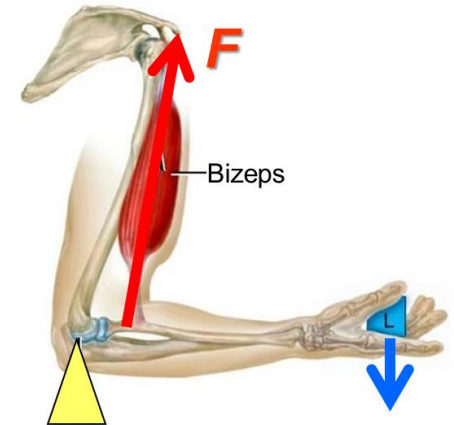


# Wiederholung: Hebelgesetz

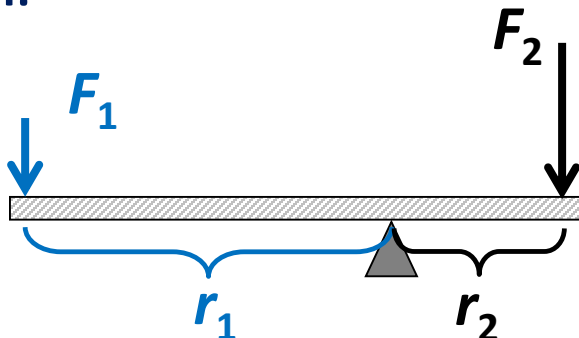
Drehmoment ( $M$ ):  $M = r \cdot F$  (Nm)



Gleichgewicht:  $\sum M_i = 0$



Hebel:



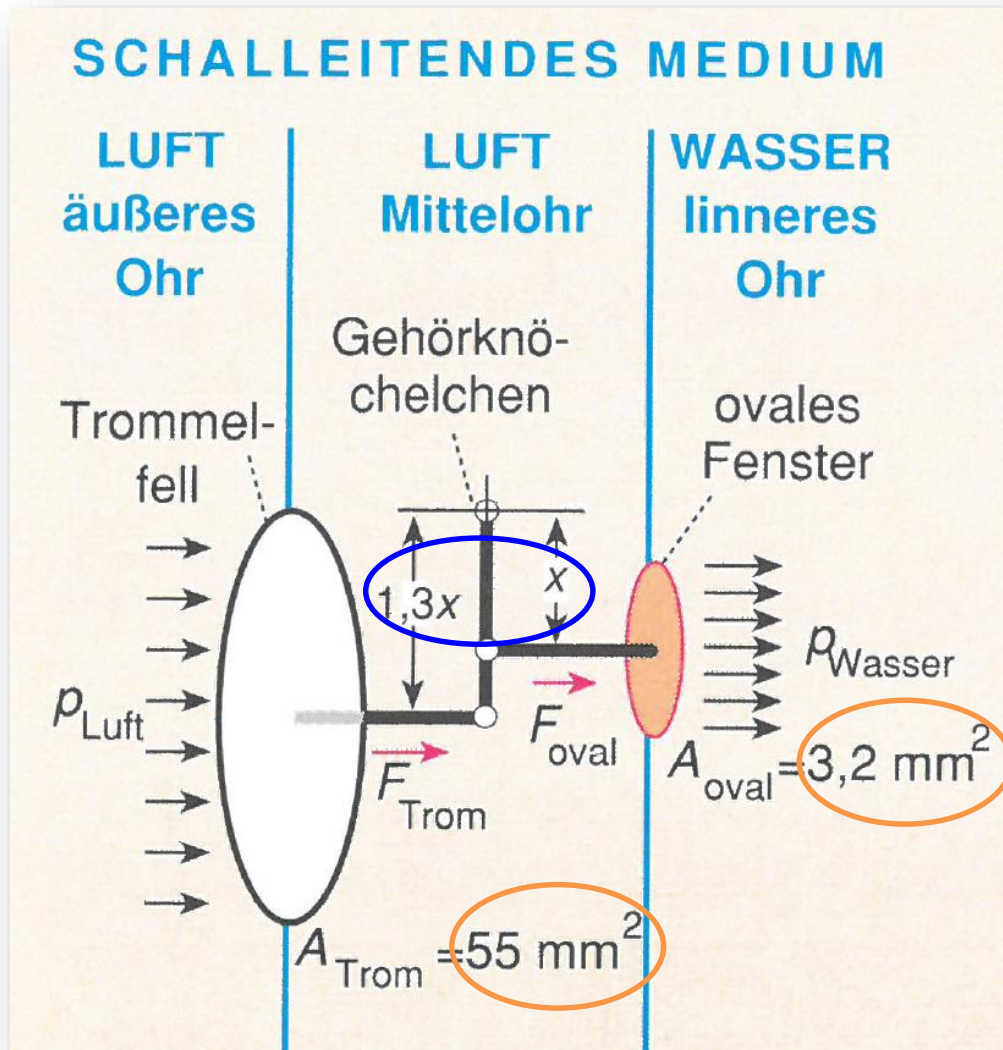
Hebelgesetz:

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



Kraftvervielfachung

# Die Druckerhöhung im Mittelohr



## Druckverstärkung:

- Hebel
- Flächenverkleinerung

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

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

## Intensitätsverstärkung:

- etwa 125-fach

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

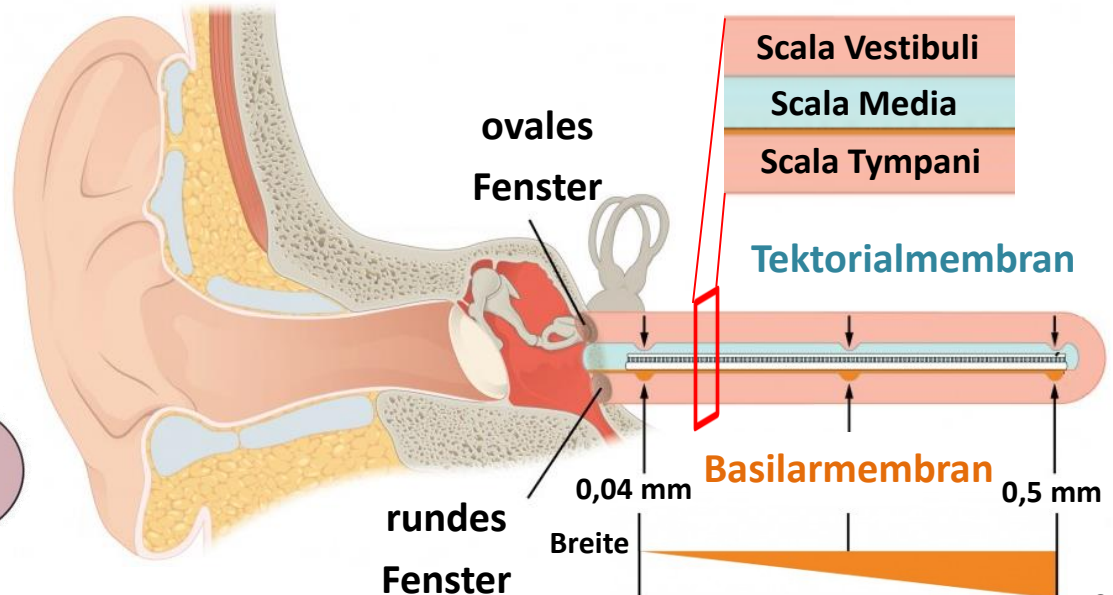
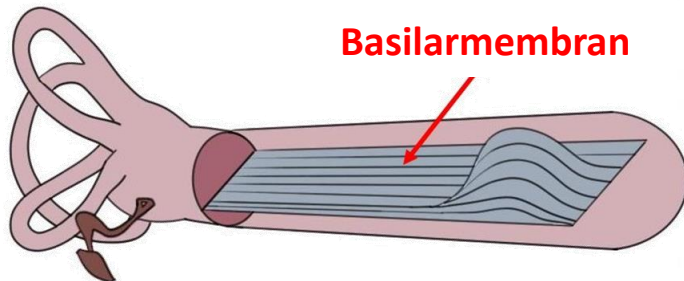
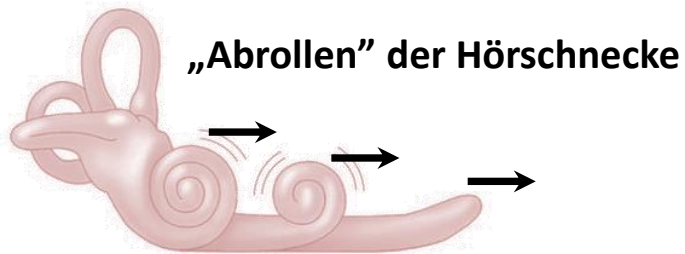
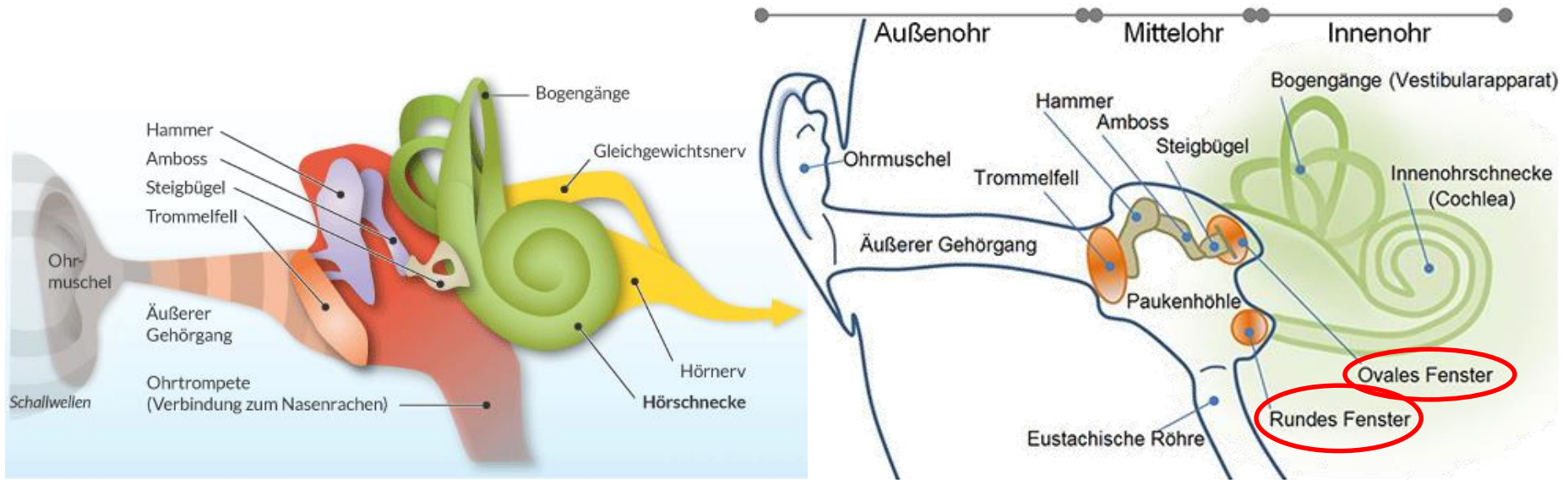
$$Z_{\text{Wasser}} = 1000 * 1500 = 1,5 * 10^6 \text{ rayl}$$

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

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



# Aufbau des Innenohres



# Schallempfindung im Innenohr

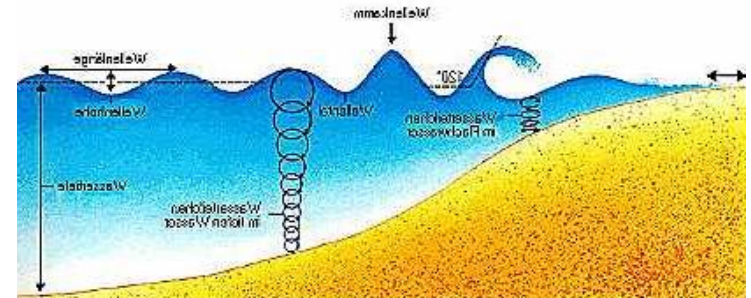
- „Saitentheorie“

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

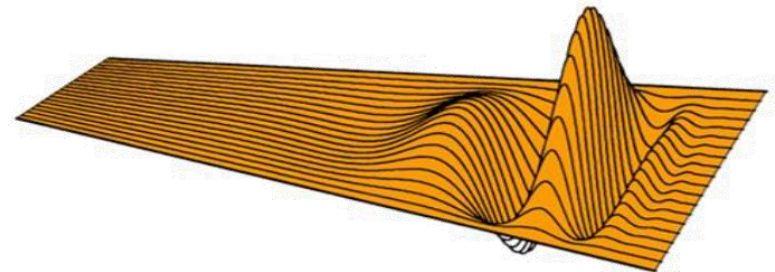


- **Wanderwellen-Theorie**

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

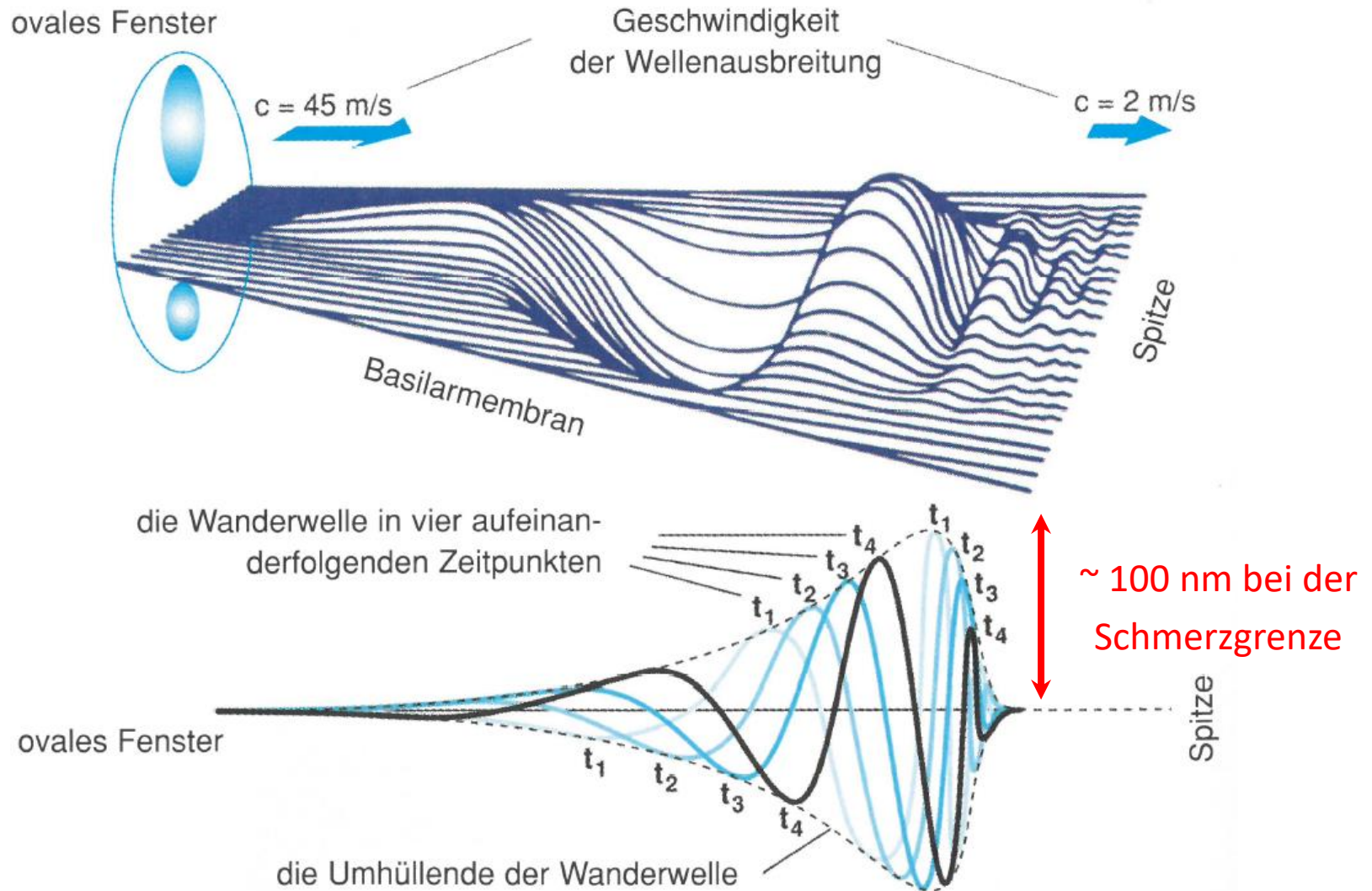


Laufrichtung der Wellen  $\longrightarrow$



# Bewegung der Wanderwellen

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



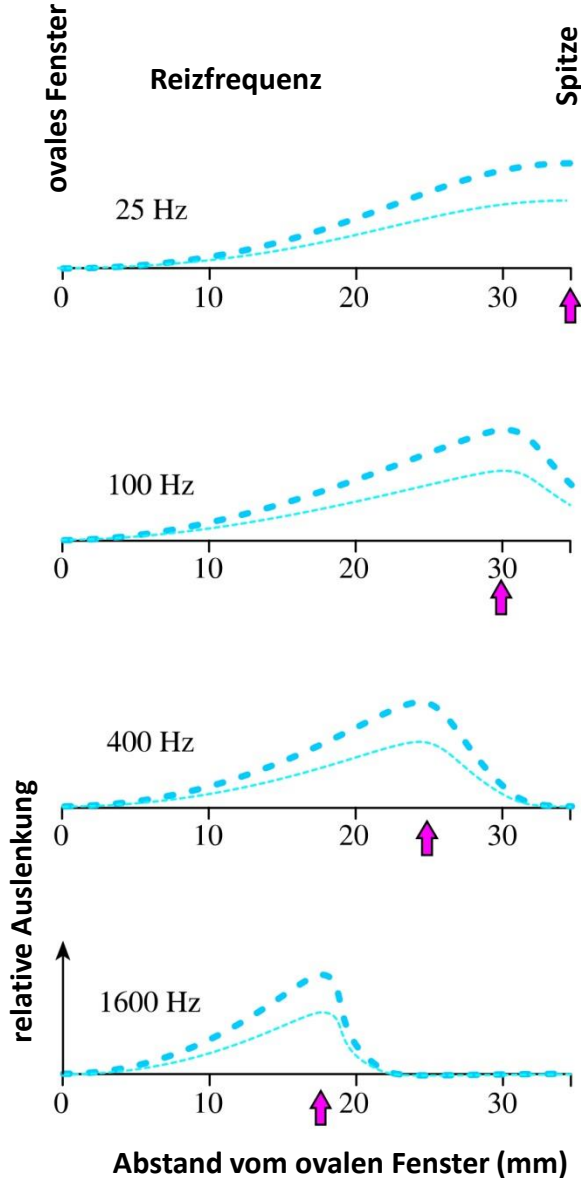


# Wanderwellen - Simulation





# Frequenz- und Intensitätsanalyse

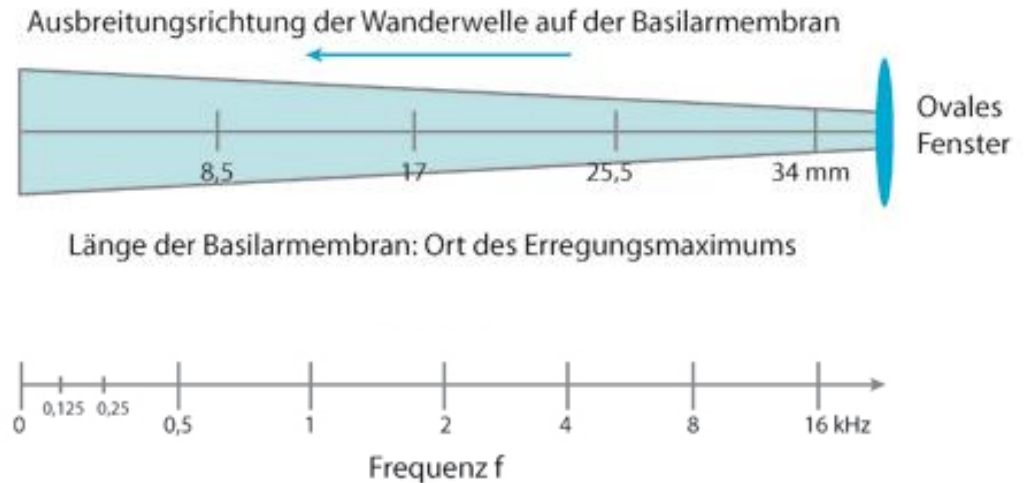


## Frequenz:

- ~Maximumstelle (Abstand vom ovalen Fenster) der Umhüllende der Wanderwelle.

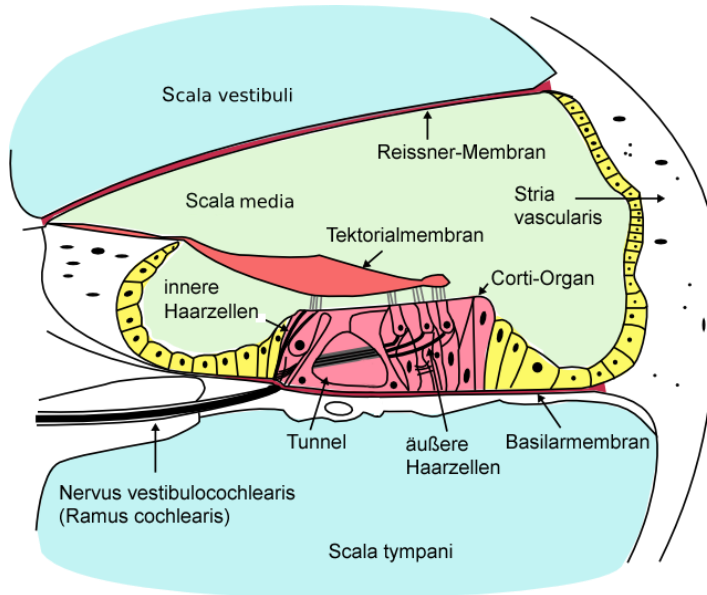
## Intensität:

- ~Maximale Auslenkung (Amplitude) der Wanderwelle.

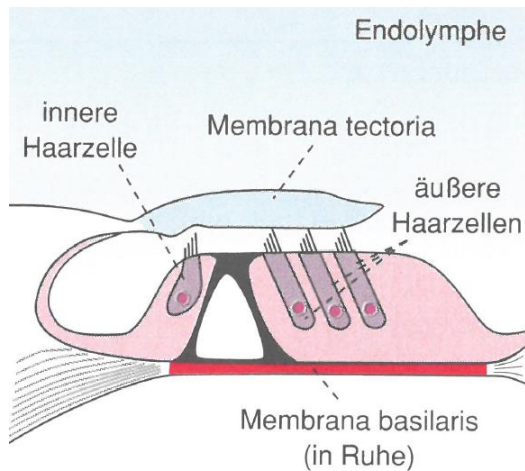
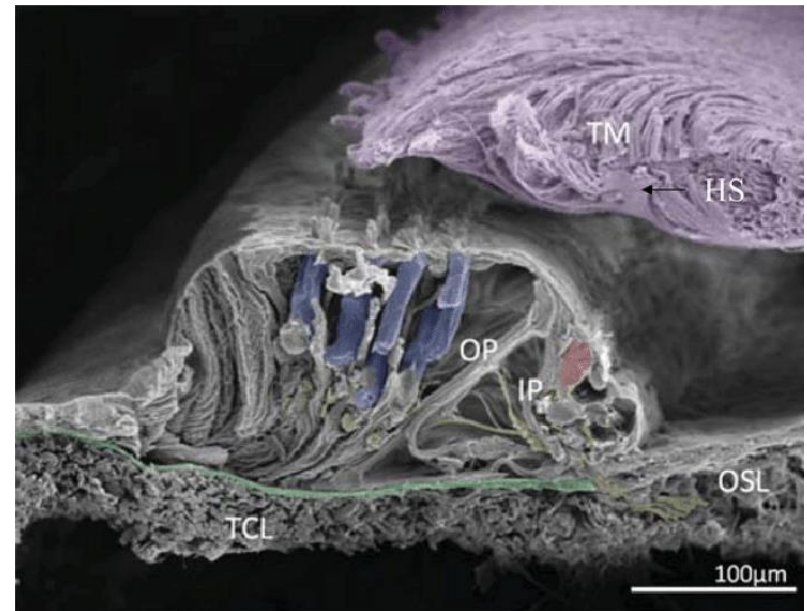


# Der Aufbau des Corti-Organ

## Schnitt durch die Hörschnecke



## Aufnahme mit Rasterelektronenmikroskop



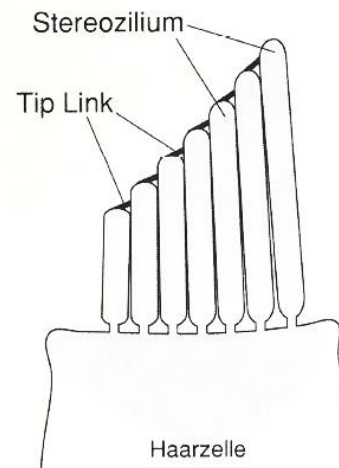
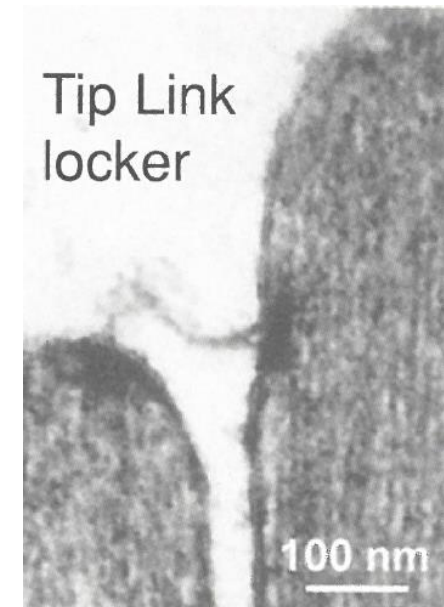
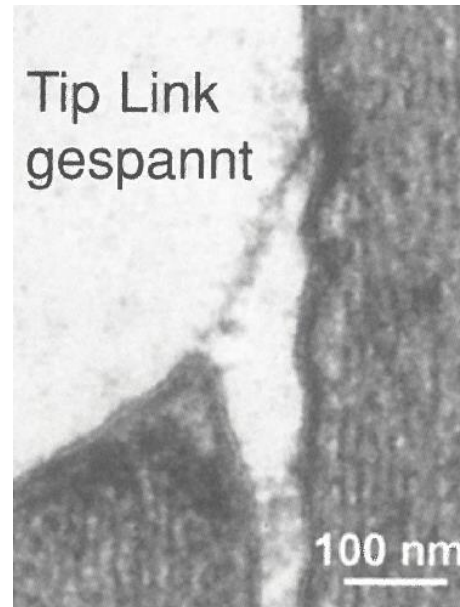
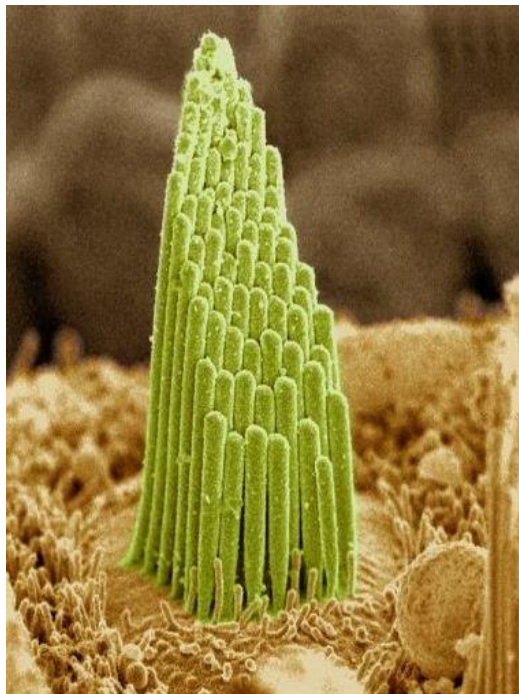
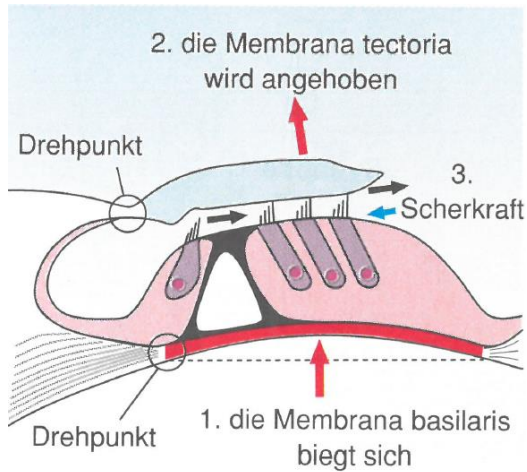
### Innere Haarzellen:

- Anzahl: 3500
- **mechano-elektrische Signalumwandlung**

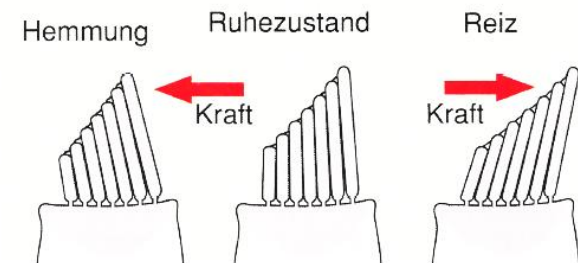
### Äußere Haarzellen:

- Anzahl: 12-20 000
- **mechanische Verstärkung**

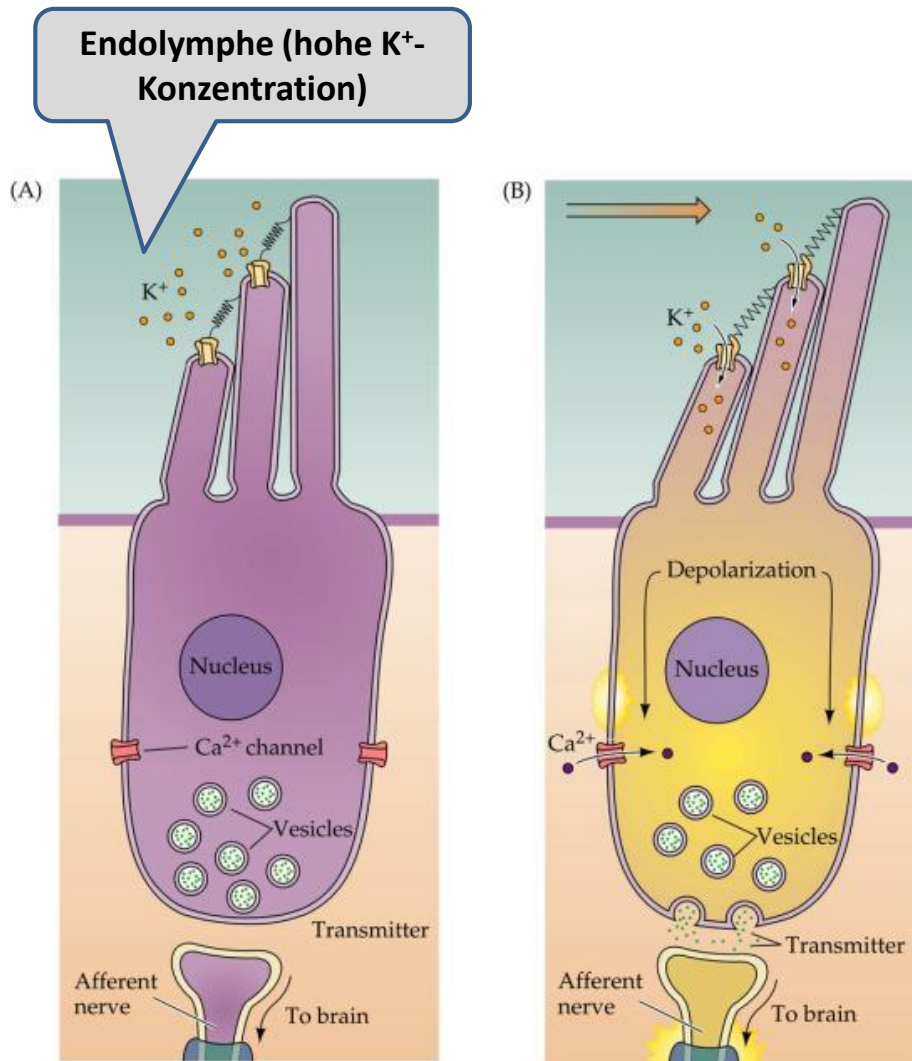
# Die Funktion der innere Haarzellen #1



- **mechano-elelektrische Signalumwandlung**



# Die Funktion der innere Haarzellen #2

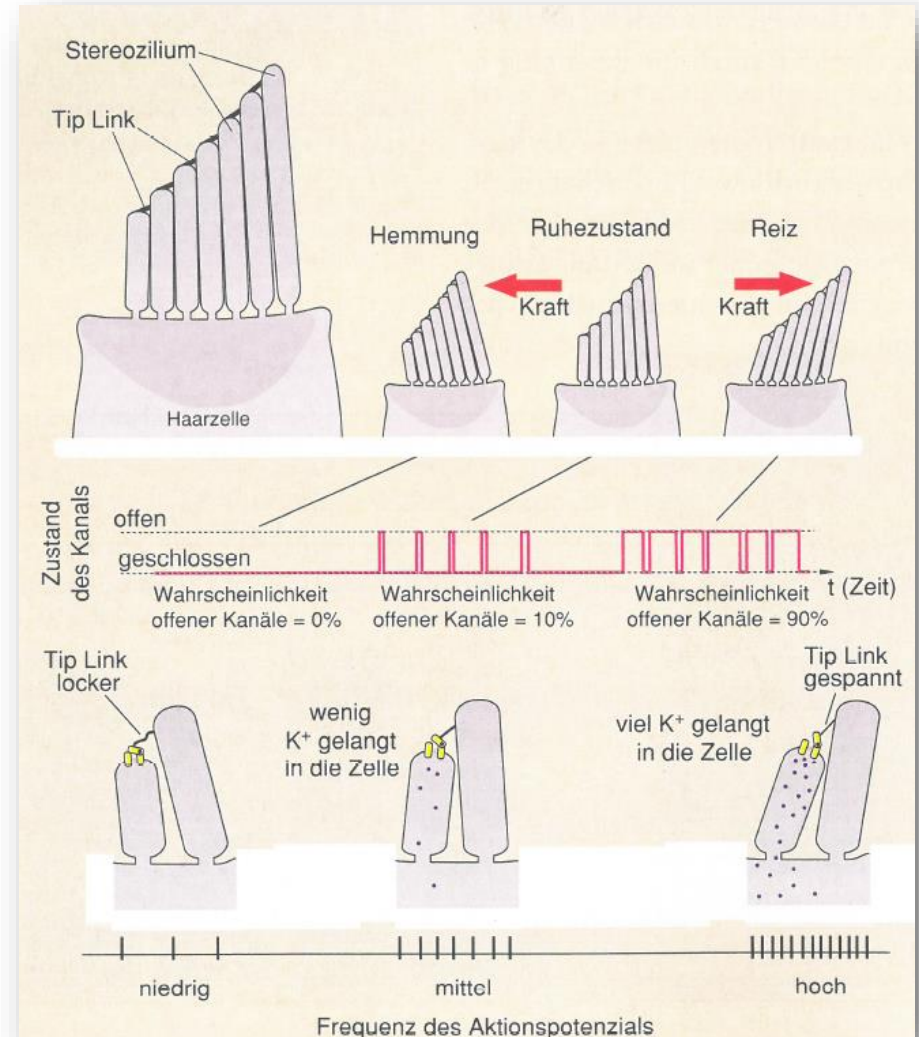
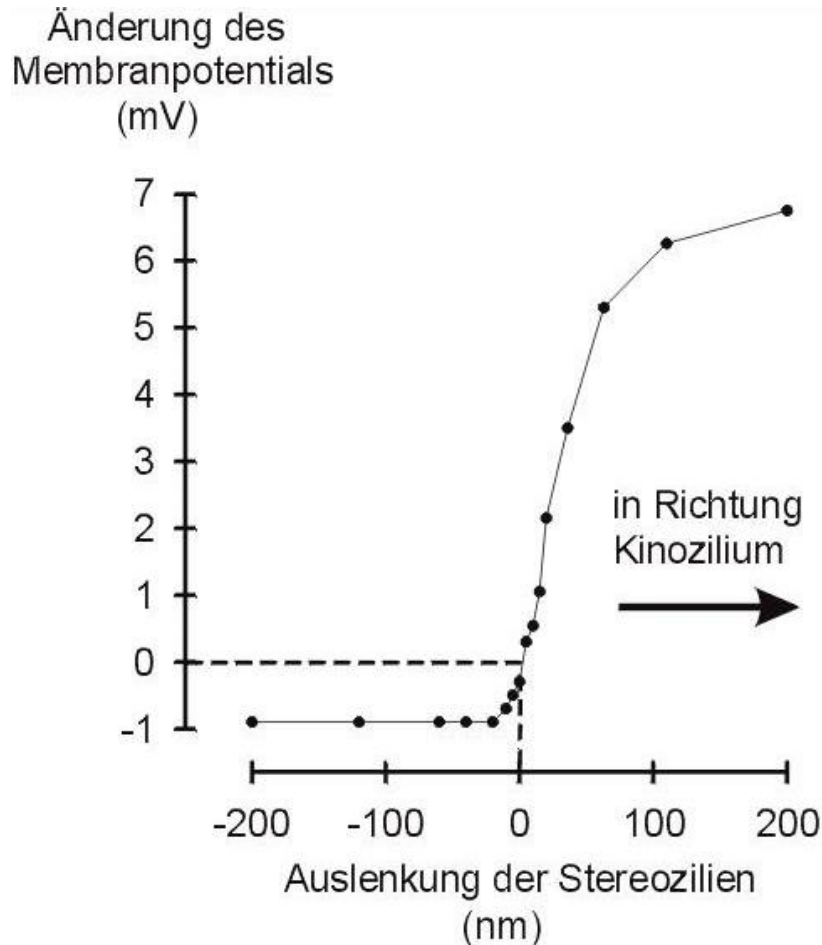


1. **Kraftwirkung:** Auslenkung der Zilien.
2.  **$K^+$ -Einstrom:** Öffnung der mechano-sensitiven  $K^+$ -Kanäle (Tip Link).
3. **Depolarisation:** Änderung des Ruhepotentials.
4.  **$Ca^{2+}$ -Einstrom:** Öffnung der spannungsempfindlichen  $Ca^{2+}$ -Kanäle.
5. **Neurotransmitter-Freisetzung:** in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



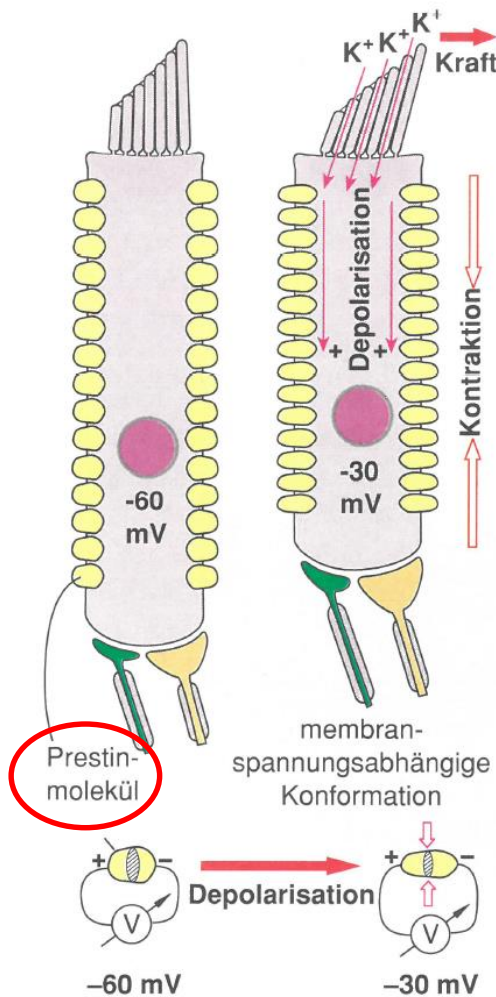
# Die Funktion der innere Haarzellen #3

## Rezeptorpotenzial (Mikrophonpotenzial)



# Die Funktion der äußere Haarzellen

## Aktive mechanische Verstärkung



## Die Länge der Haarzellen ändert im Takt der Töne



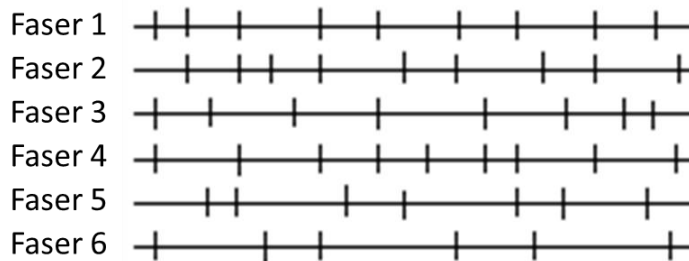
Vibration der Haarzellen → Schwingung der Basilarmembran mit höherer Amplitude → **positiv rückgekoppelter Verstärker (+50 dB)**

# Die Kodierung der akustischen Information

## „Volleyballtheorie“

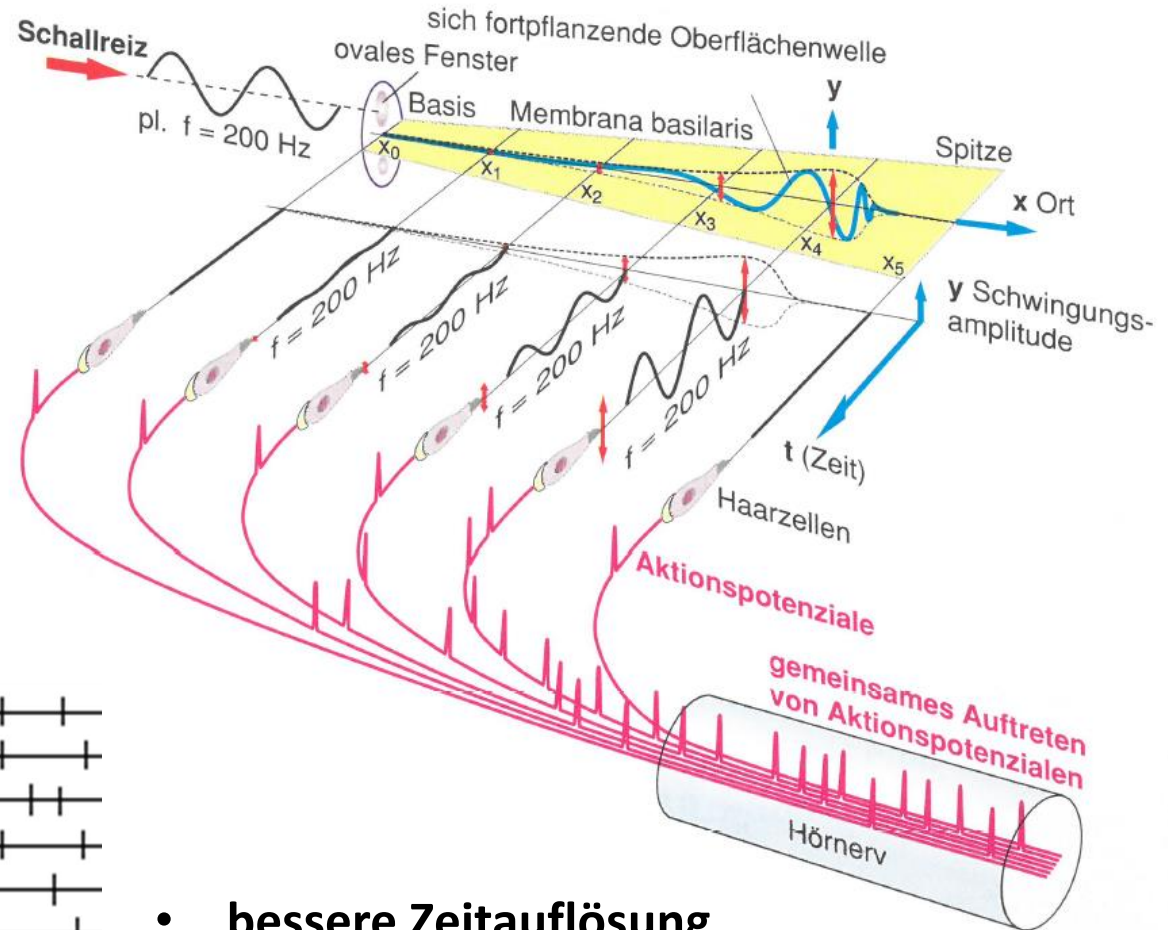


Größere Zahl der gemeinsamen Berührungen erleichtert das Abschlagen des Balls.



Zusammen

Signal



- bessere Zeitauflösung
- die Refrakterphase (1 ms) bedeutet keine Limitation

# Richtungshören

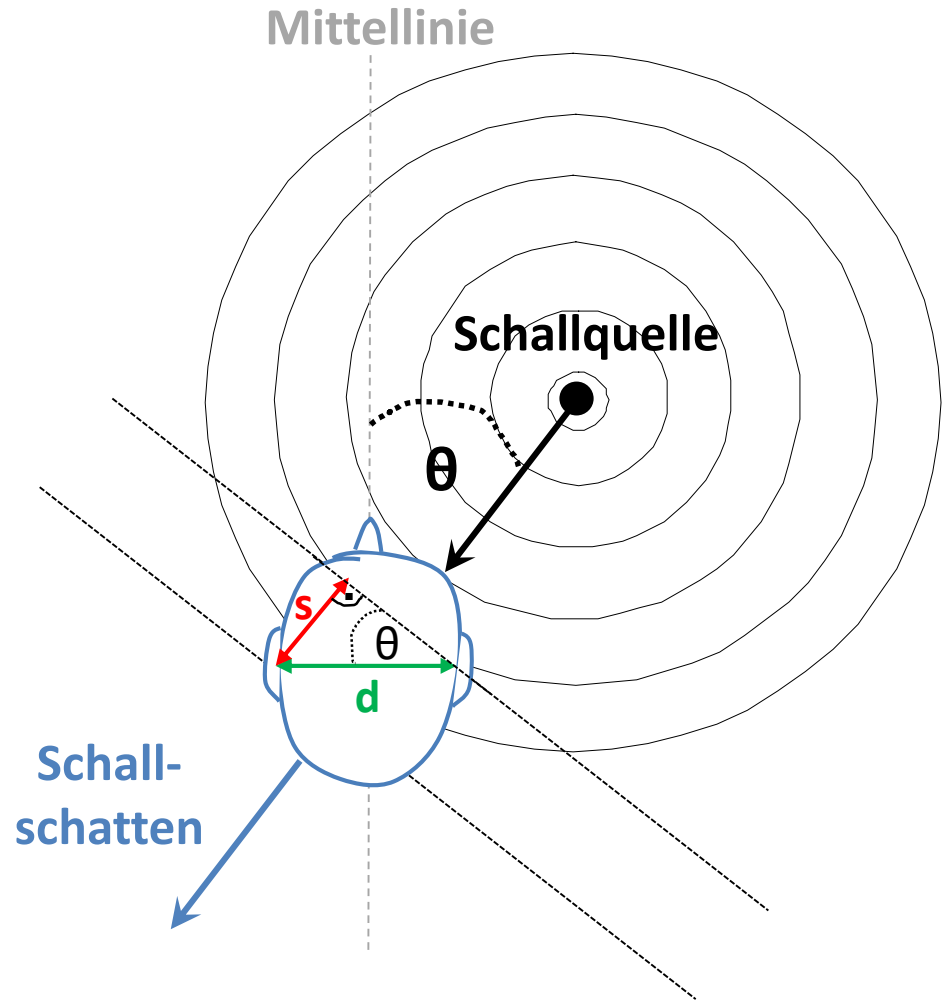
## zweiohriges Richtungshören

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

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

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

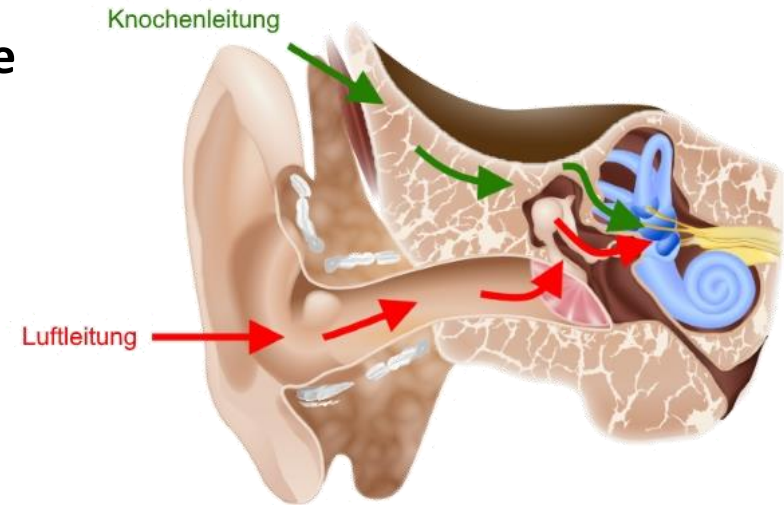
- aufgrund des **Intensitätsunterschiedes** (Dämpfung durch die Gehirngewebe).





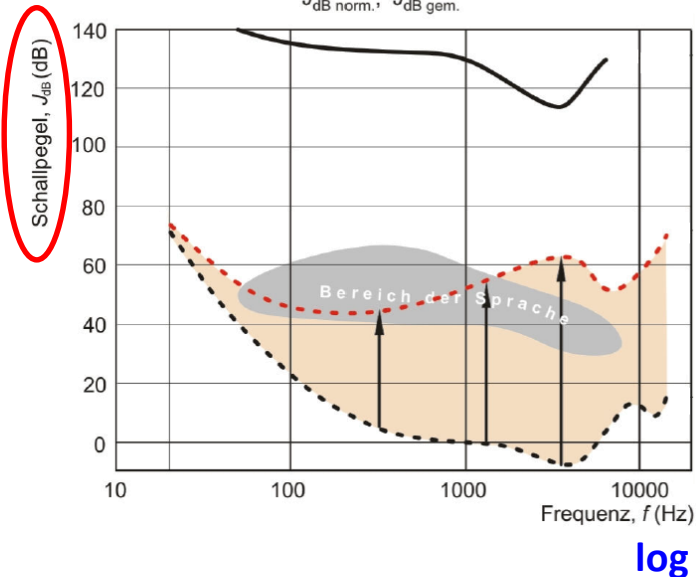
# Audiometrie #1: Prinzip

- Sprachaudiometrie ↔ Tonaudiometrie
- Luftleitung ↔ Knochenleitung



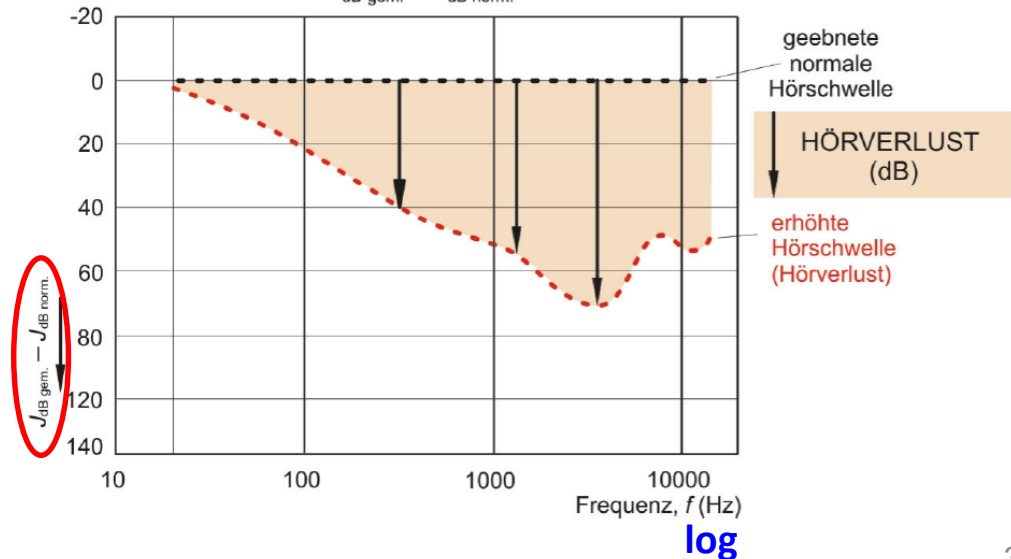
ISOPHONE

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

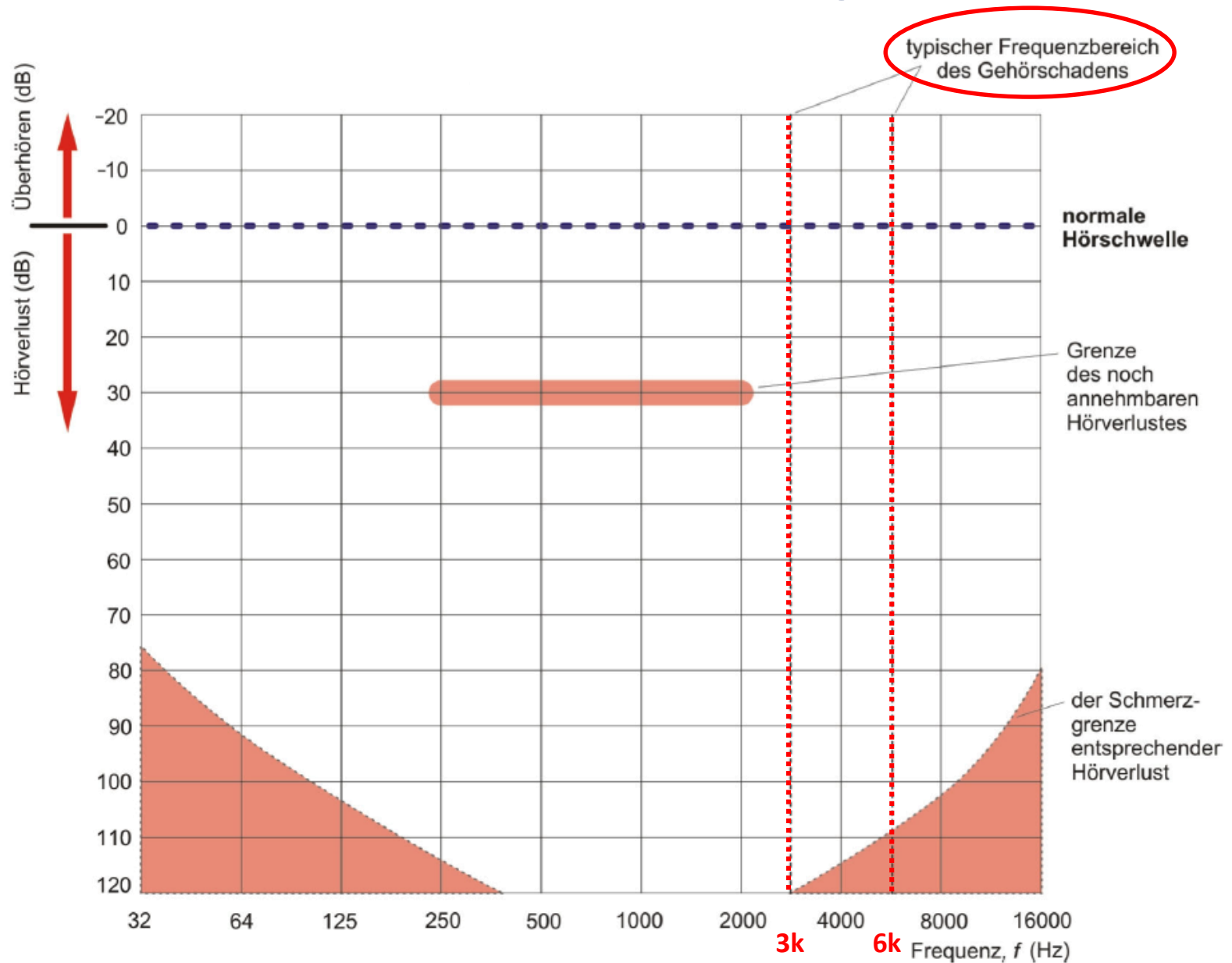


AUDIOGRAMM

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

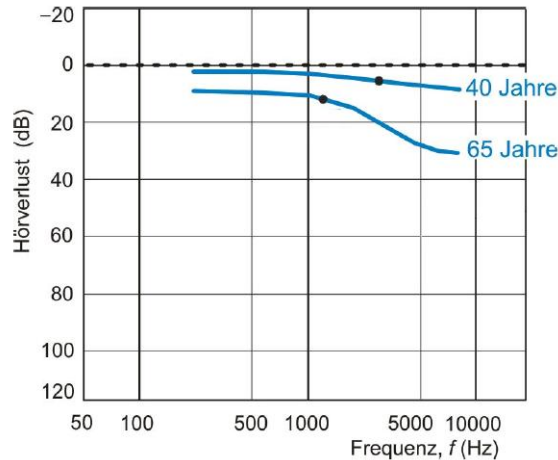


# Audiometrie #2: Audiogramm



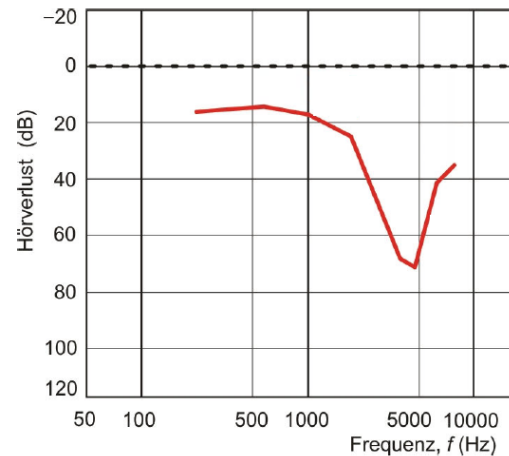
# Audiometrie #3: Schwerhörigkeiten

## Altersschwerhörigkeit



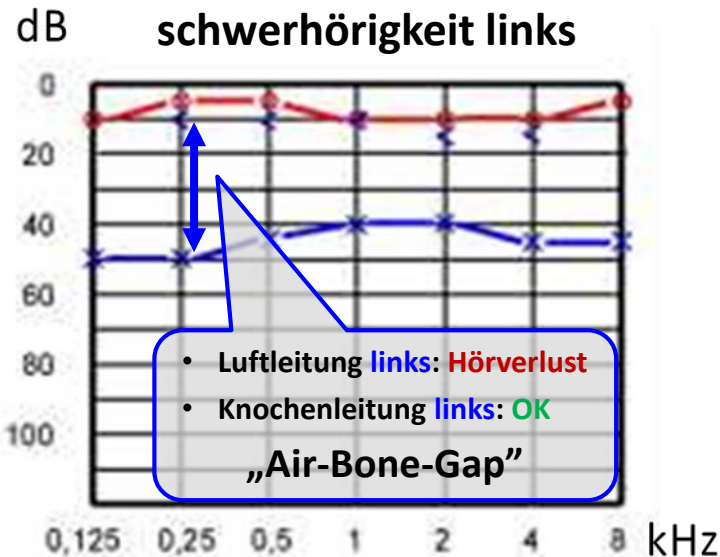
normale  
Hörschwelle

## Lärmschwerhörigkeit

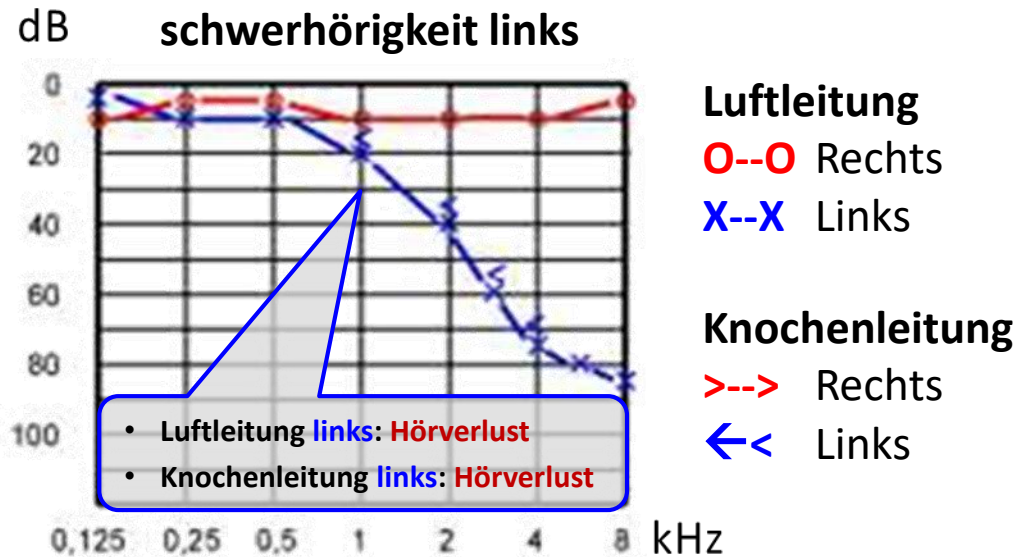


normale  
Hörschwelle

## Schallleitungs- schwerhörigkeit links



## Schallempfindungs- schwerhörigkeit links



# Feedback: QR-Kode