

# Sensorische Funktionen. Gehör und Audiometrie.

**Balázs Kiss**

kissb3@gmail.com



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

*08. März 2022.*

# 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

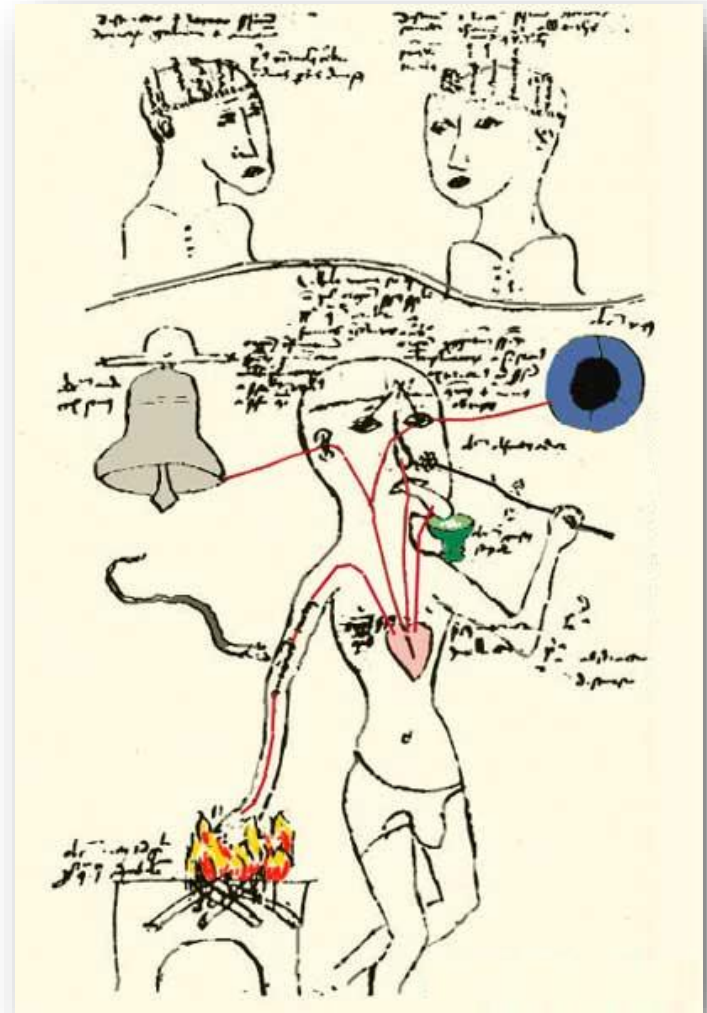
- **cardiozentrische These**

- 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



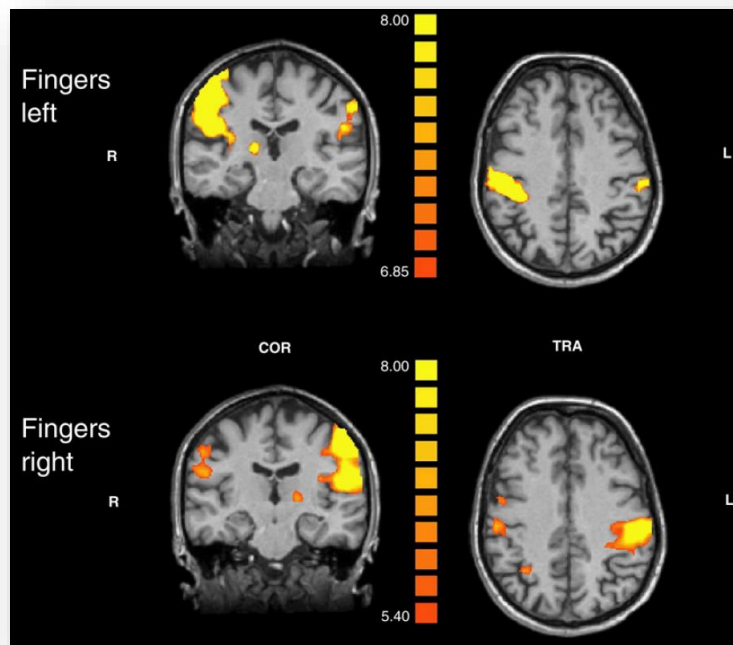
Nach Jung, 1984.

# 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

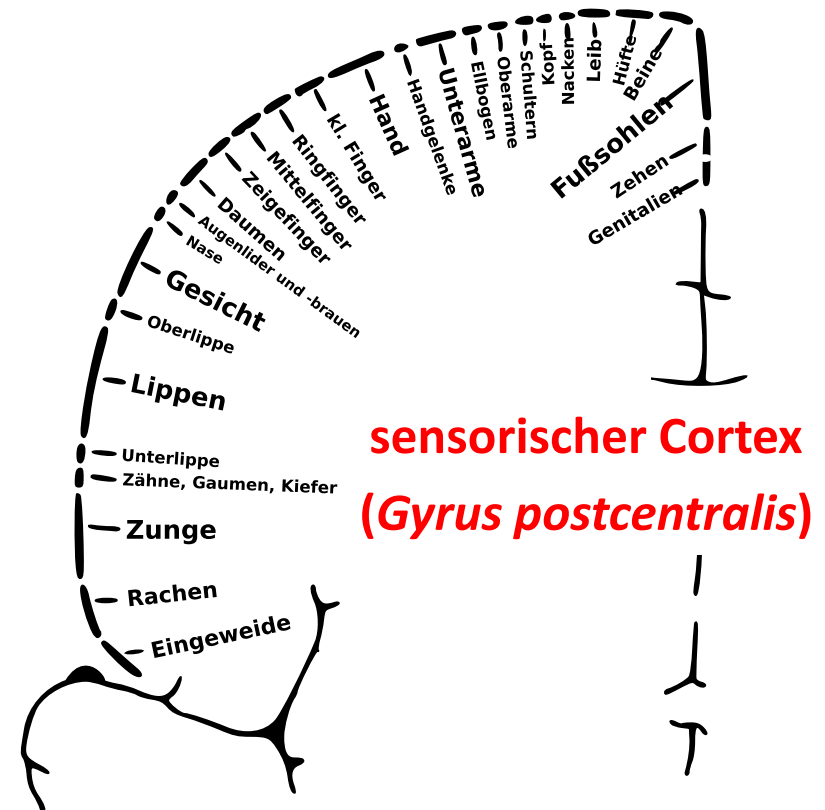


fMRI: BOLD-Mappe

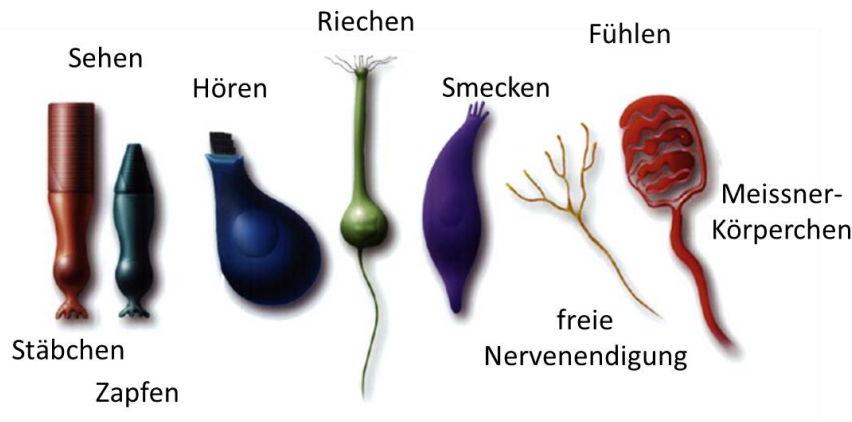
(Blood-Oxygen-Level-Dependent Imaging)

## 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.

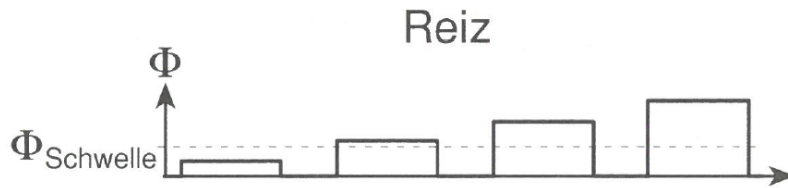
wahrgenommen	Modalität	Rezeptor	Organ
	Sehen	Stäbchen und Zapfen	Auge
	Hören	Haarzelle	Ohr (Corti-Organ)
	Riechen	Olfaktorisches Neuron	Schleimhaut
	Schmecken	Geschmacksrezeptoren	Geschmacksknospe
	Radialbeschleunigung	Haarzelle	Ohr (Gleichgewichtsorgan)
	Lineare Beschleunigung	Haarzelle	Ohr (Gleichgewichtsorgan)
	Druck, Tastgefühl	Nervenendigung	zahlreiche
	Temperatur	Nervenendigung	zahlreiche
	Schmerz	Nervenendigung	zahlreiche
nicht wahrgenommen	Gelenkbewegung	Nervenendigung	zahlreiche
	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 Nervenfasern

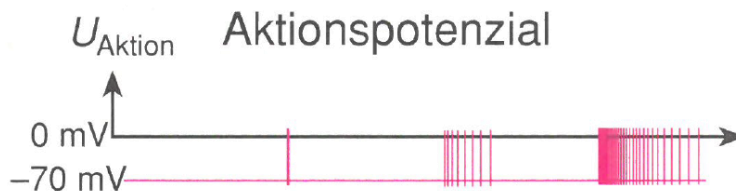
- adäquater Reiz:** wofür ein Rezeptor die größte Empfindlichkeit besitzt



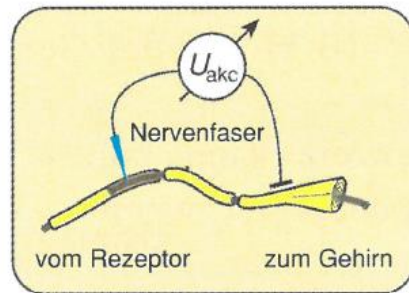
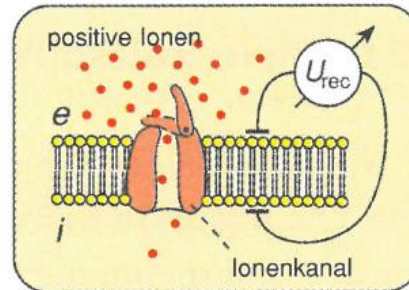
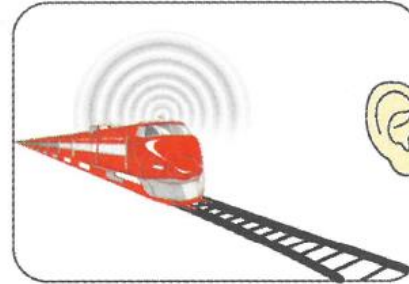
- Amplitudenkodierung:**  $U_{\text{gen}} \sim \Phi$
- Adaptation**



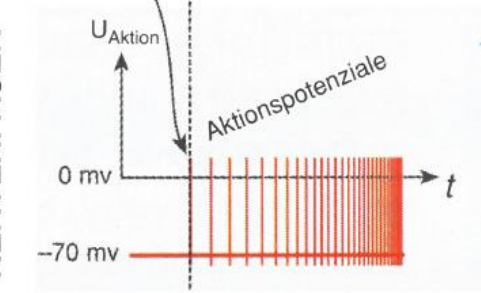
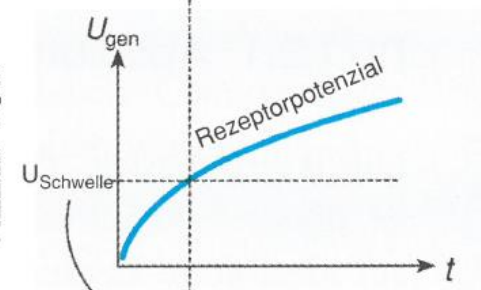
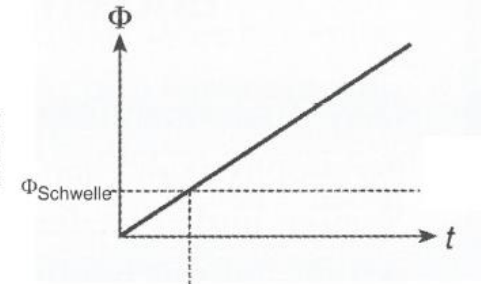
- Frequenzkodierung:**  $f_{\text{AP}} \sim \Phi$   
Modalität (Typ), Intensität, Zeitdauer, Ort, usw.



## Prozess: Gehör



## gemessenes Signal

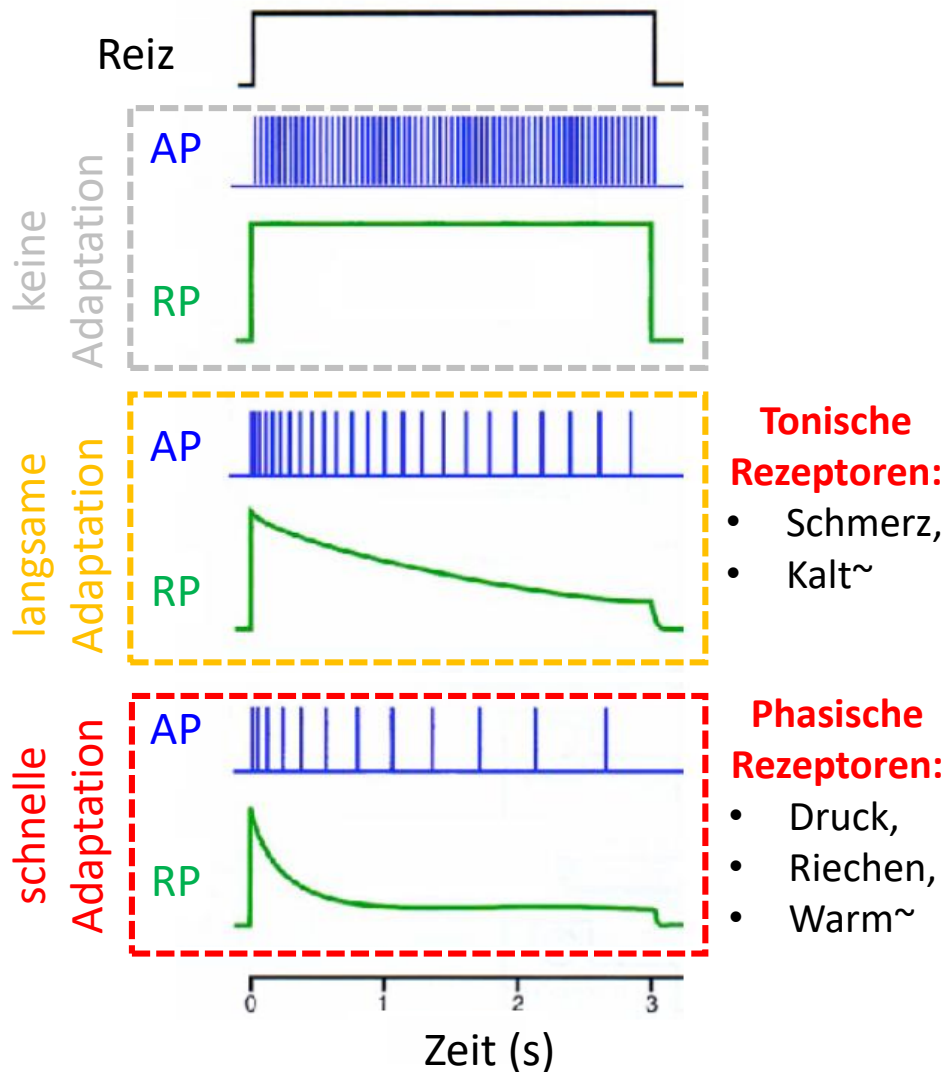


$$T_{\text{AP}} \quad f_{\text{AP}} = \frac{1}{T_{\text{AP}}}$$

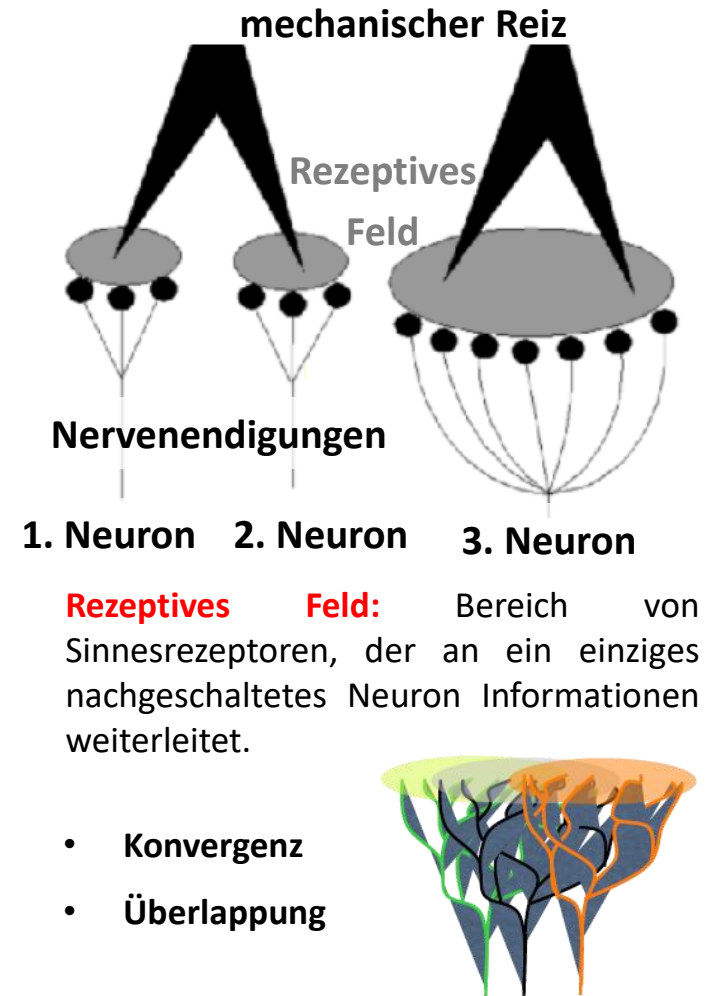


# Spezifische Aspekte der Rezeptoren

## Zeitdauer, Adaptation



## Ortsbestimmung

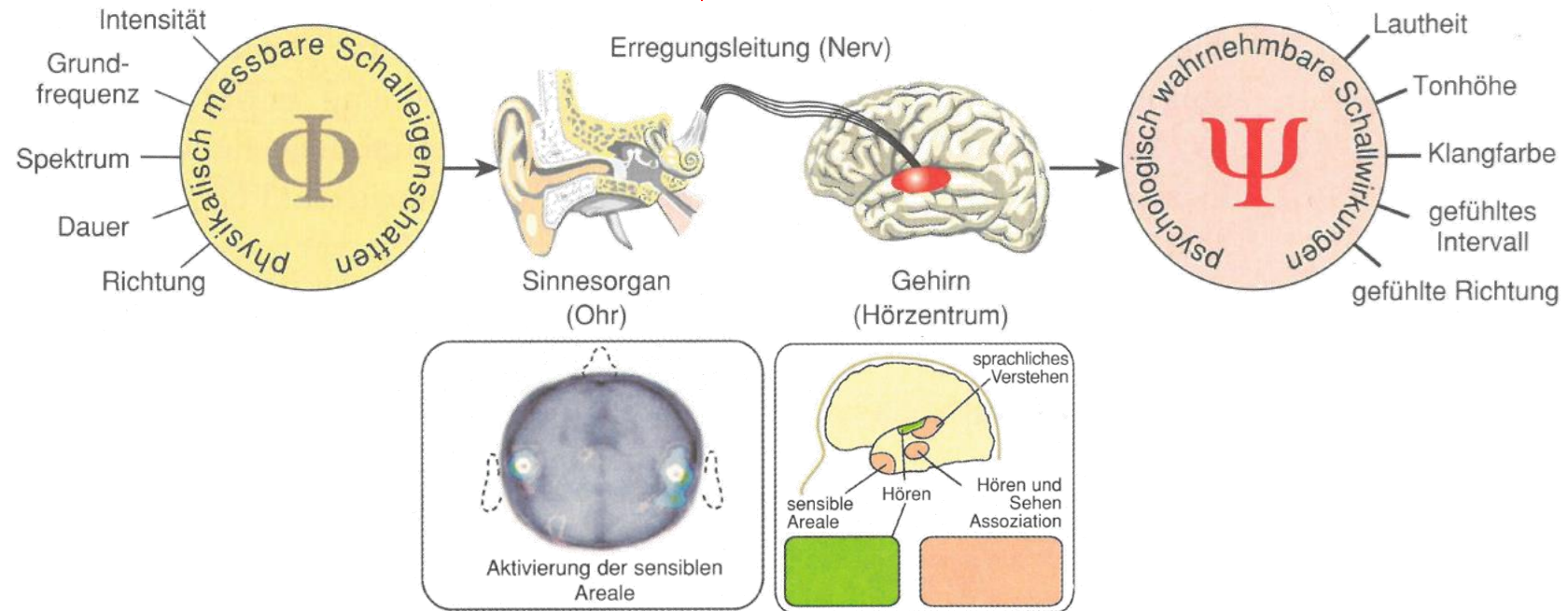




# Psychophysische Gesetze

$\psi$

$\phi$



## 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

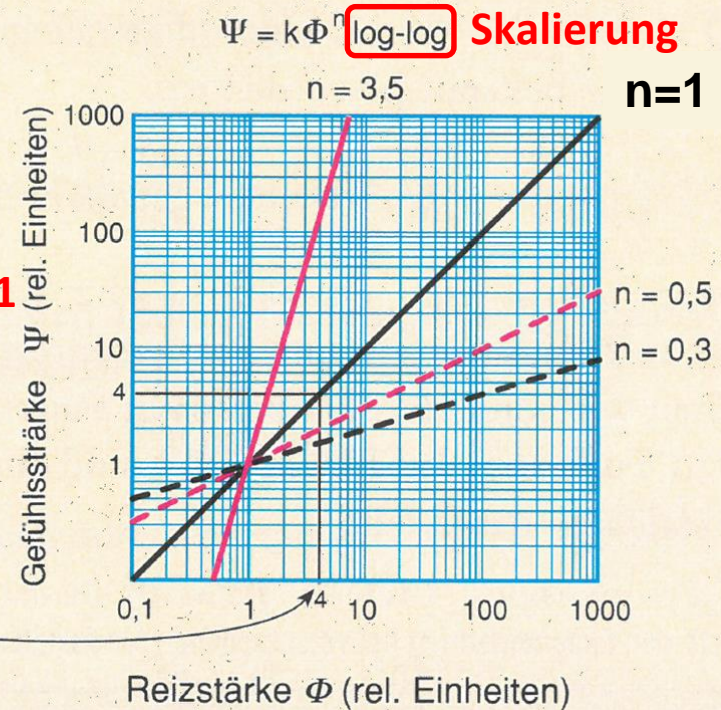
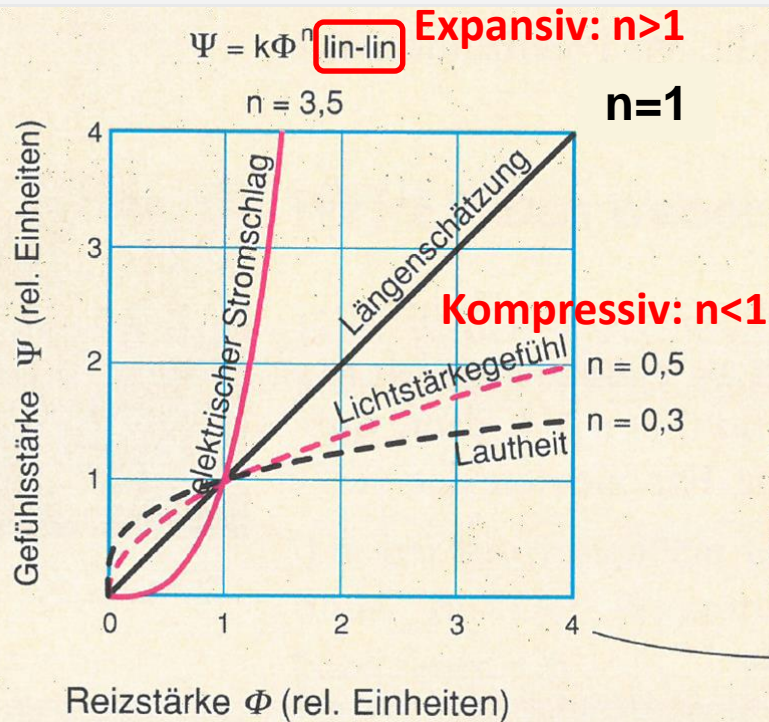
Die relative Änderung des Gefühls ist proportional zur relativen Änderung der Reizstärke.

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

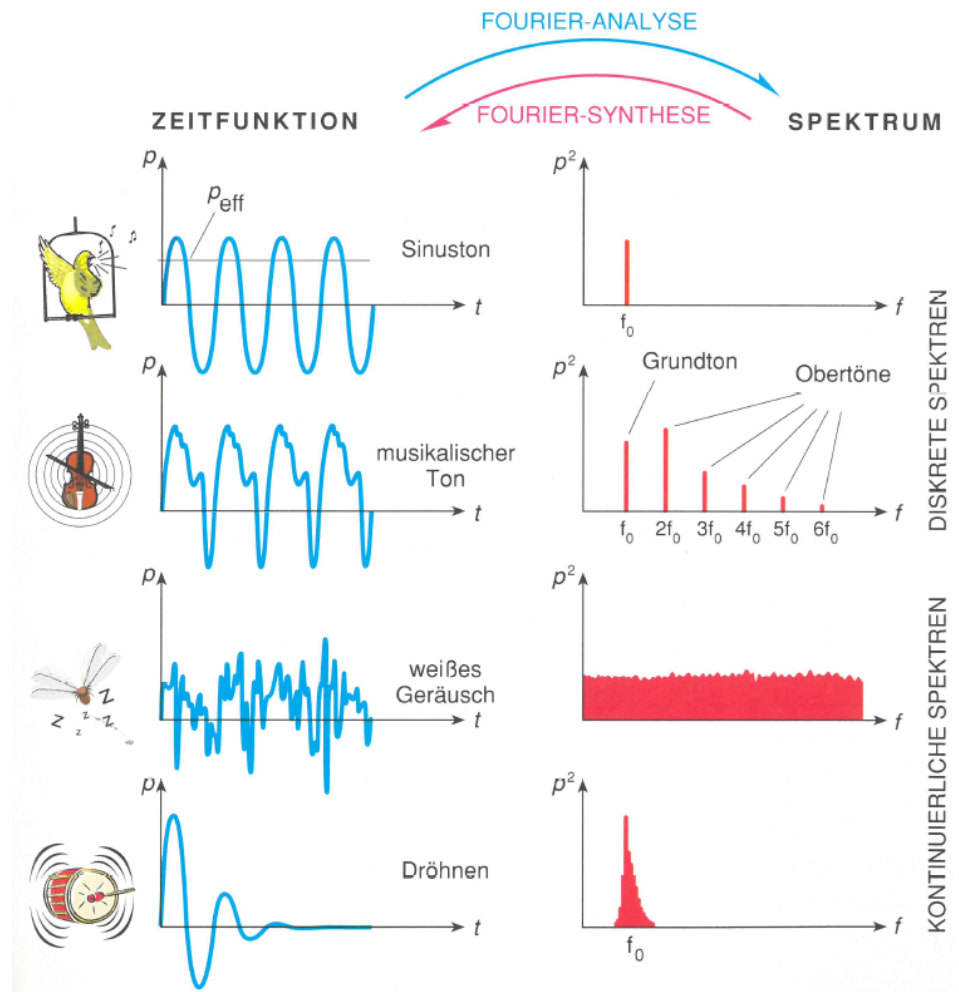
- „... wird von der **Frequenz und der relativen Stärke der sog. Obertöne**... d. h. vom **Schwingungsspektrum** des Tones bestimmt.” (Helmholtz)

### • Sinuston:

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

### • musikalischer Ton:

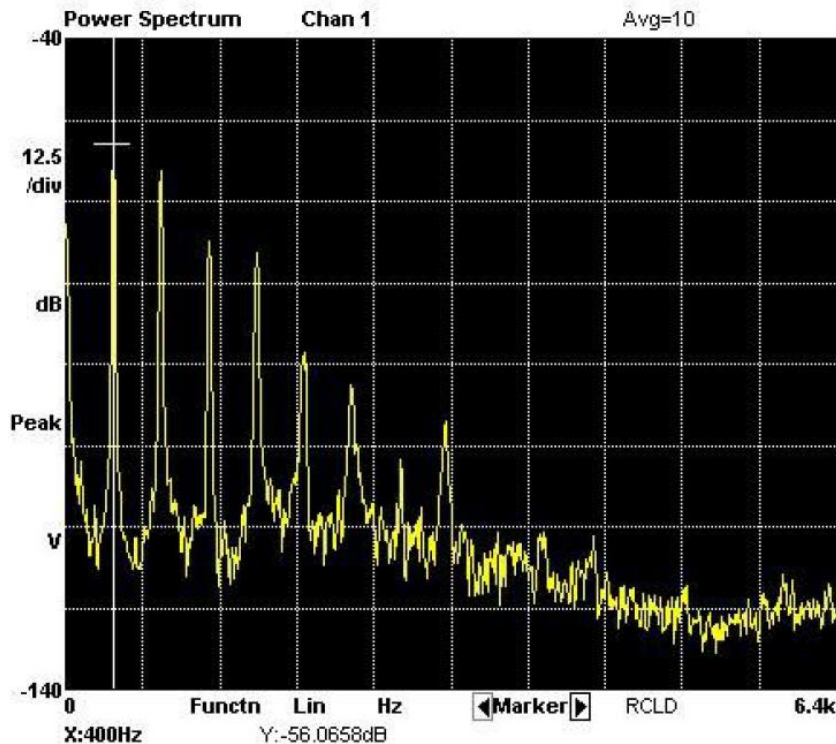
$$p(t) = p_1 \cdot \sin(\omega t) + p_2 \cdot \sin(2\omega t) + p_3 \cdot \sin(3\omega t) + \dots$$



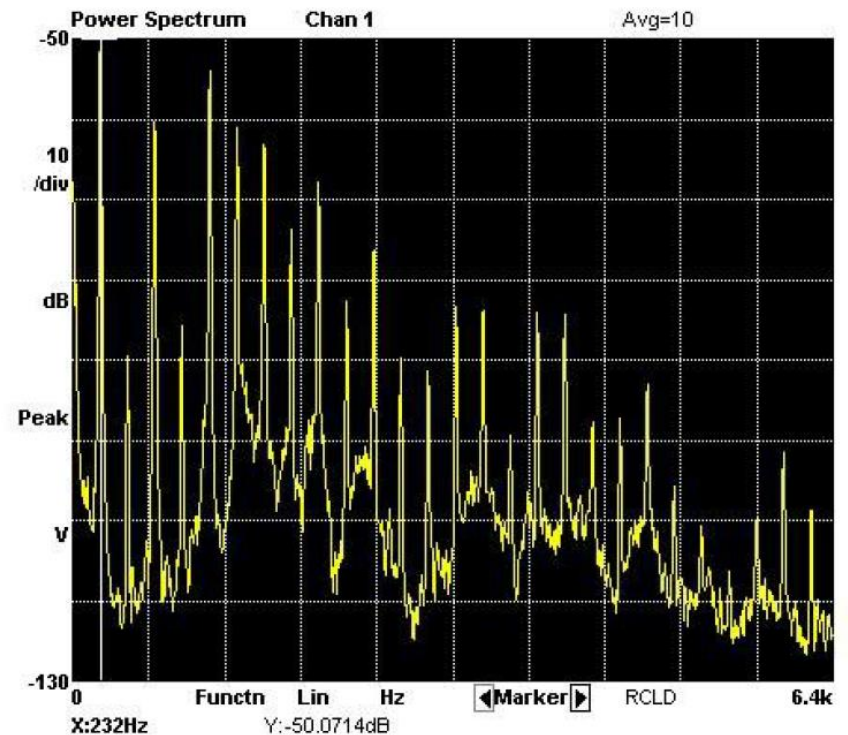


# Frequenzspektren von unterschiedlichen Musikinstrumenten

Querflöte



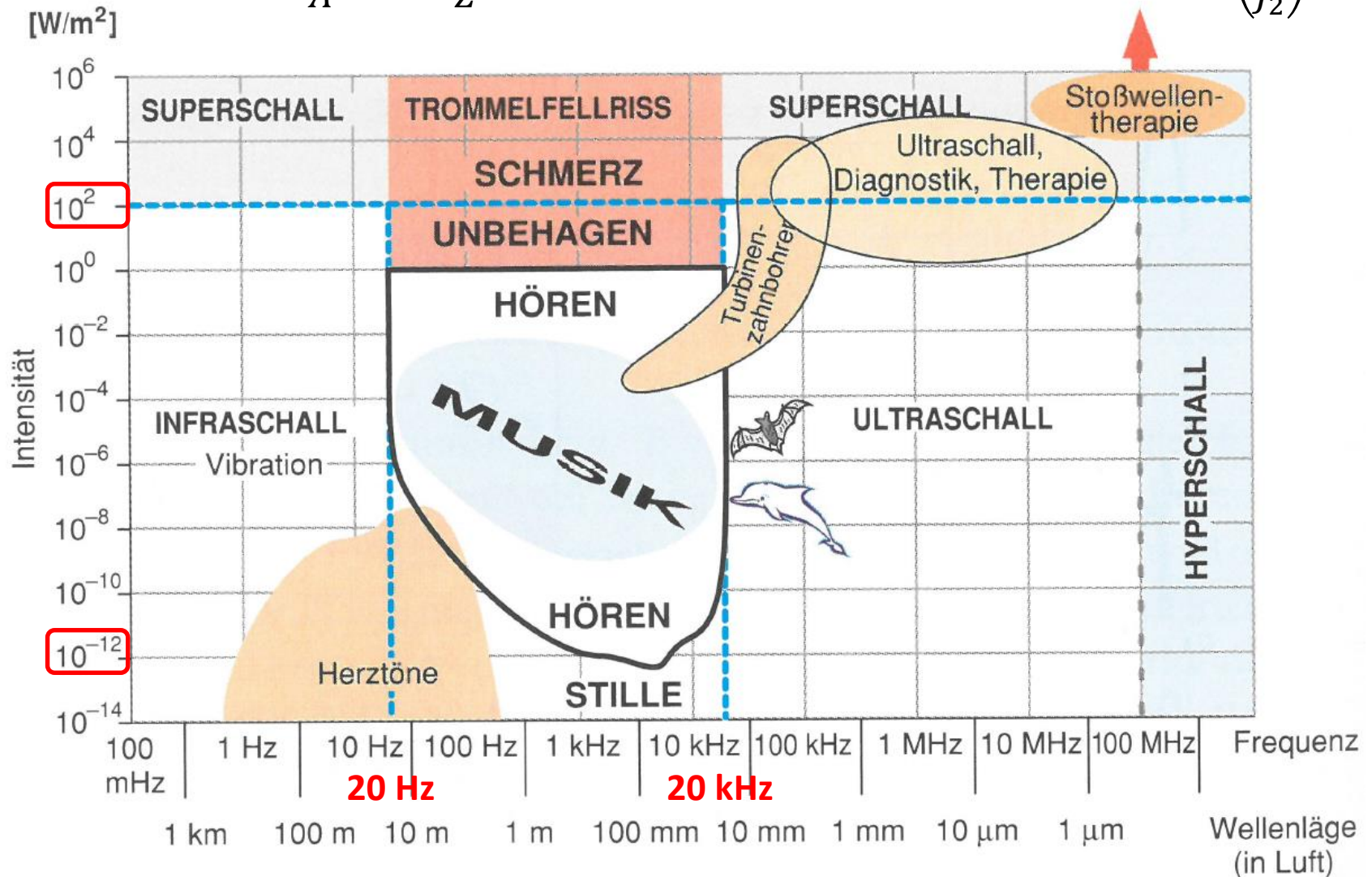
Klarinette



Spektralanalyse: mit Soundcard Scope

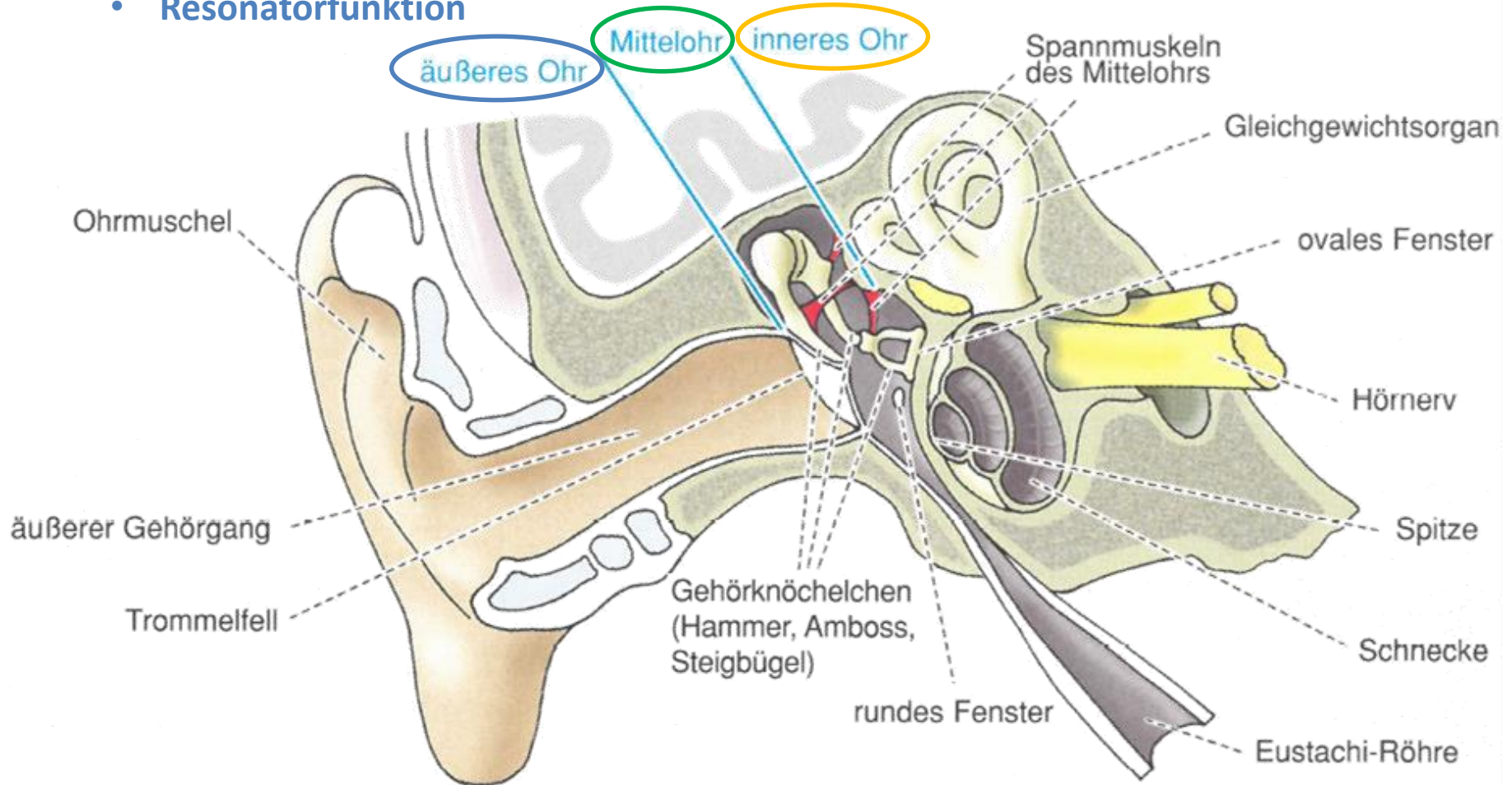
# Frequenz- und Intensitätsbereiche der Töne

**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

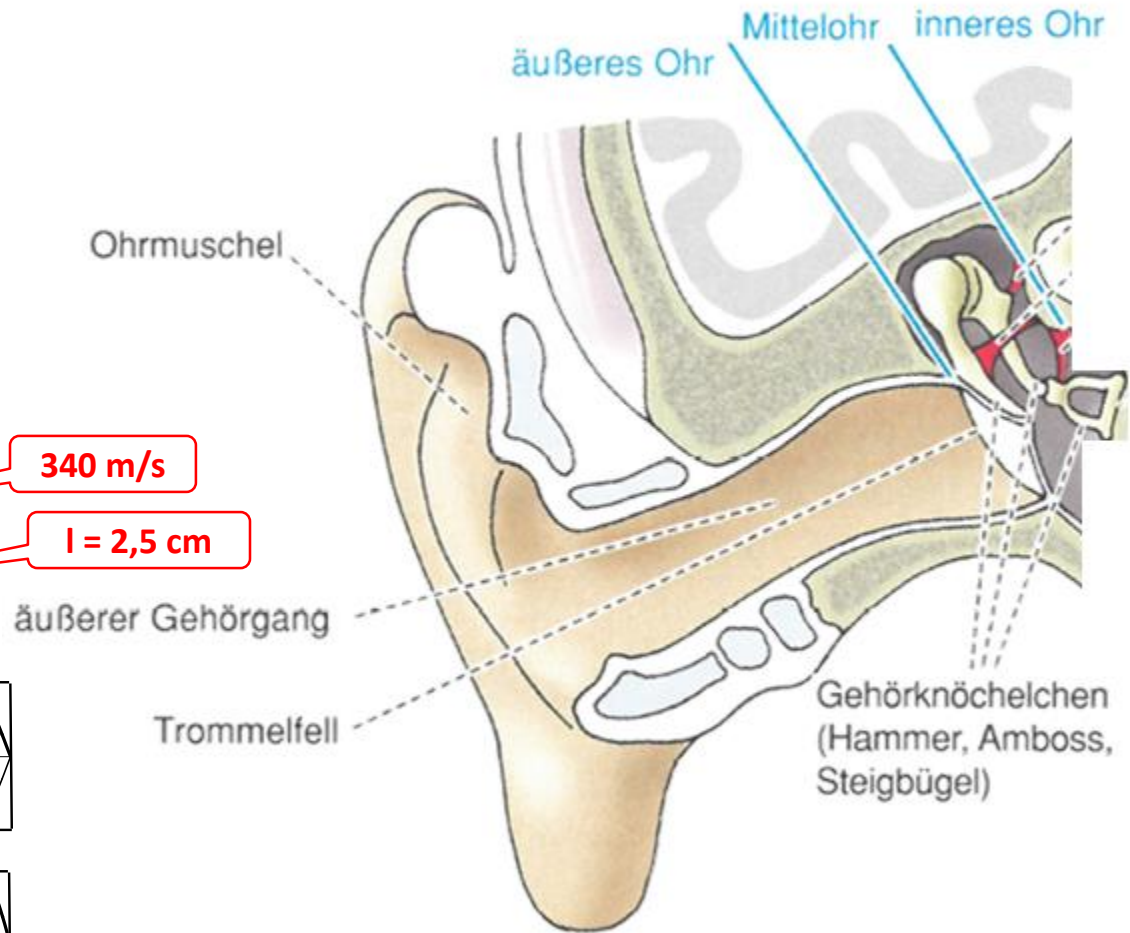
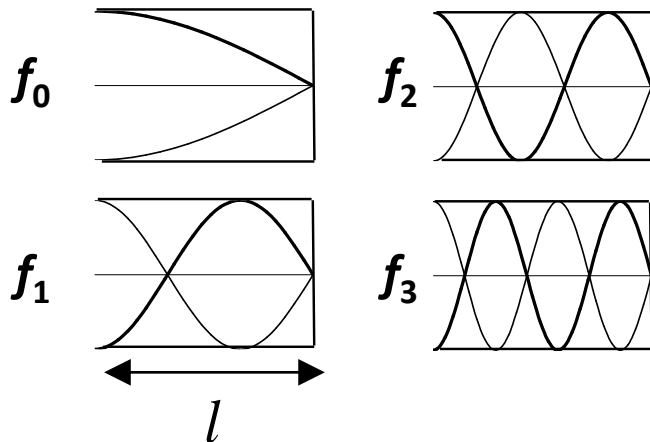
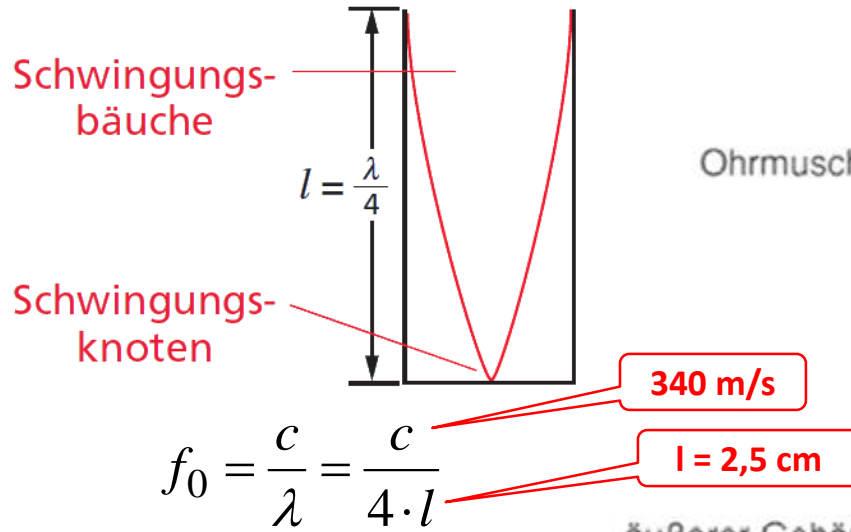
- Impedanzanpassung
- Verstärkung
- Resonatorfunktion
- Schallempfindung
- Beschleunigungsempfindung





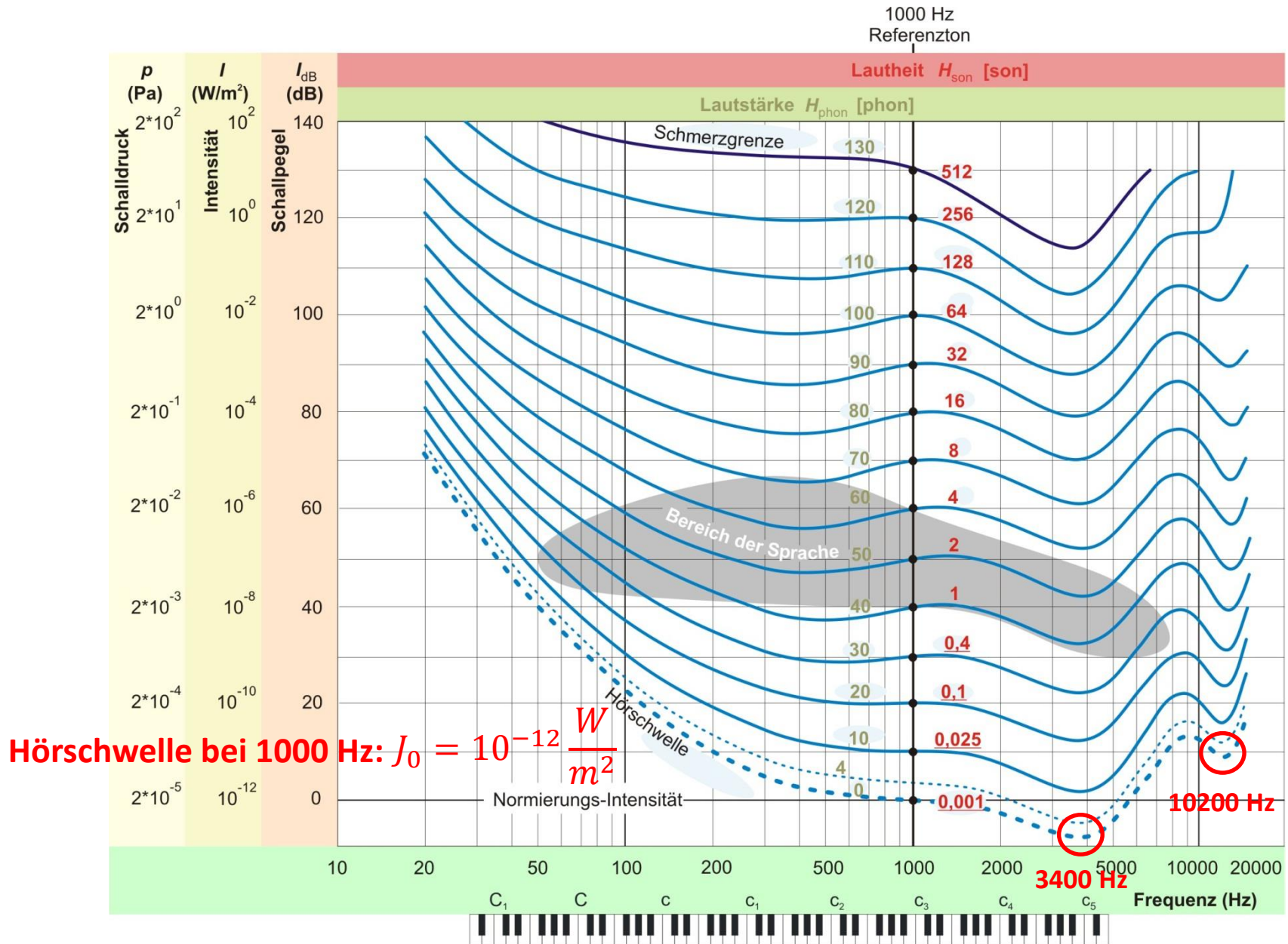
# Resonatorfunktion des Außenohres

## Resonanz bei einer geschlossenen Pfeife



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

# Kurven gleicher Lautstärke



# Das Mittelohr als Impedanzanpasser

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

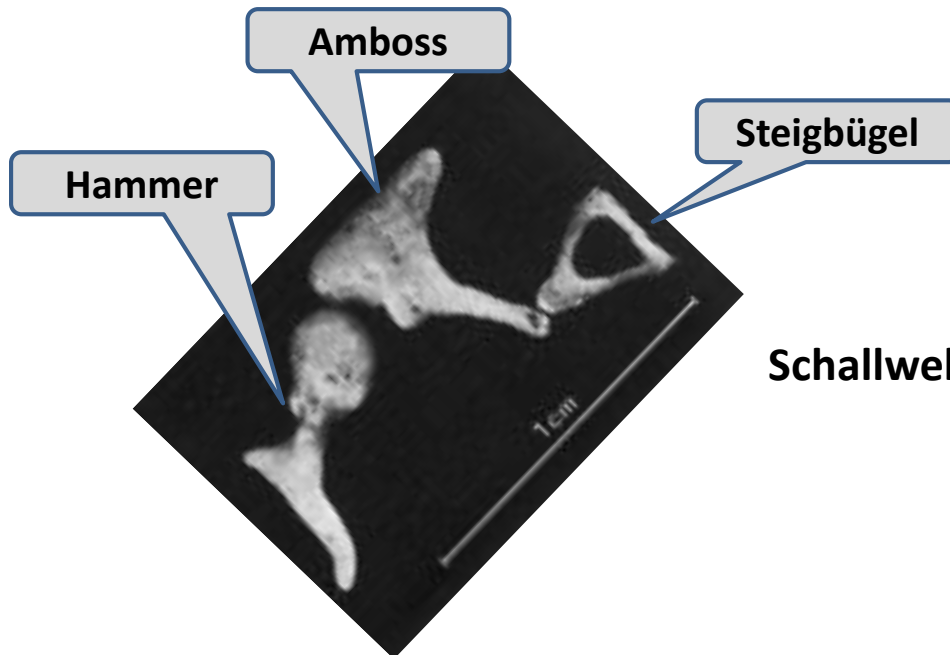
$$R = \frac{J_{\text{refl}}}{J_{\text{ein}}} \approx \left( \frac{Z_{\text{Wasser}} - Z_{\text{Luft}}}{Z_{\text{Wasser}} + Z_{\text{Luft}}} \right)^2 = 0,9989 \quad !$$

Modell des Gewebes: Wasser

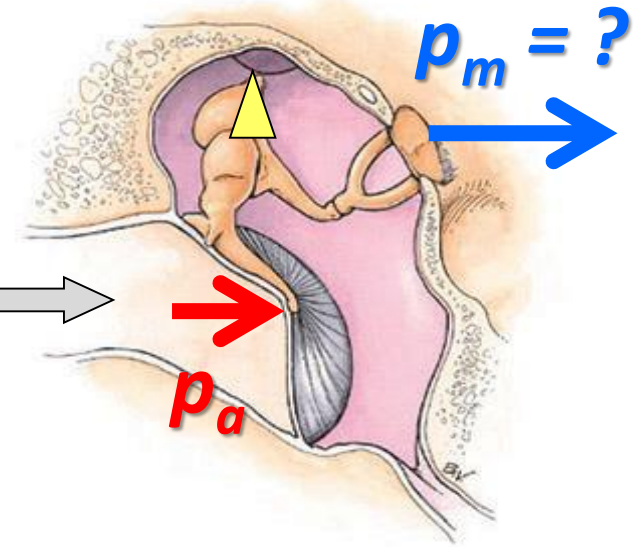
Akustische Impedanz:  $Z = \rho \cdot c$

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

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

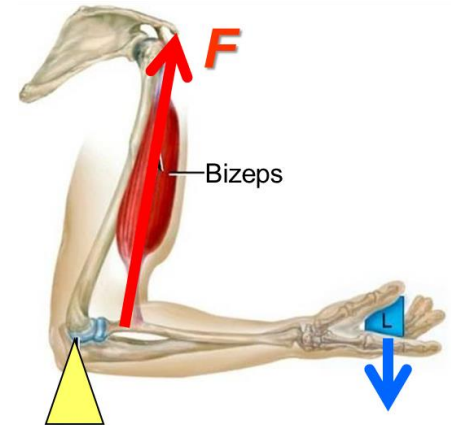
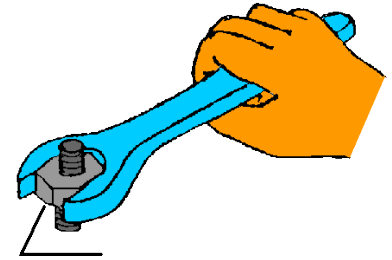
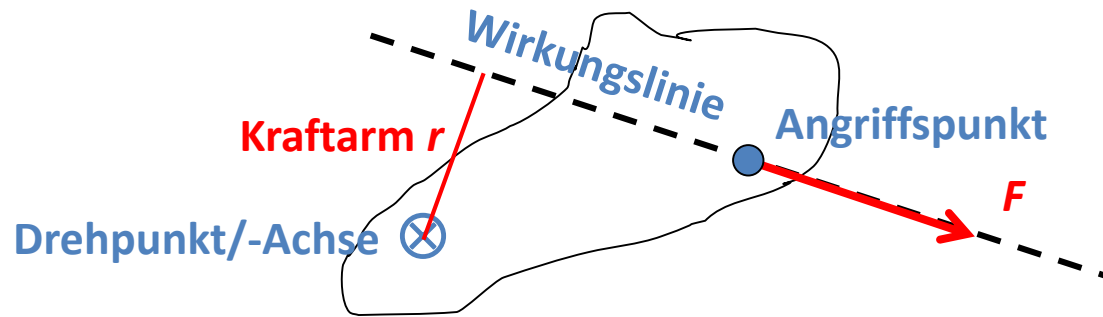


Schallwellen  $\Rightarrow$



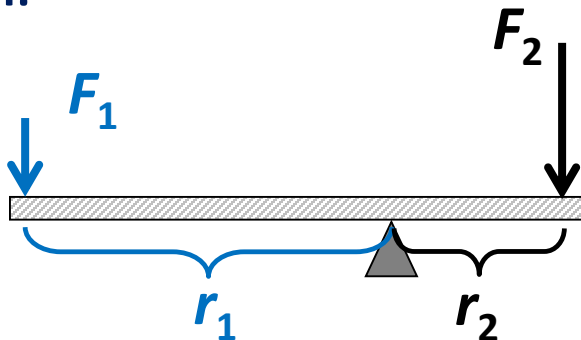
# Wiederholung: Hebelgesetz

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



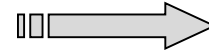
Gleichgewicht:  $\sum M_i = 0$

Hebel:



Hebelgesetz:

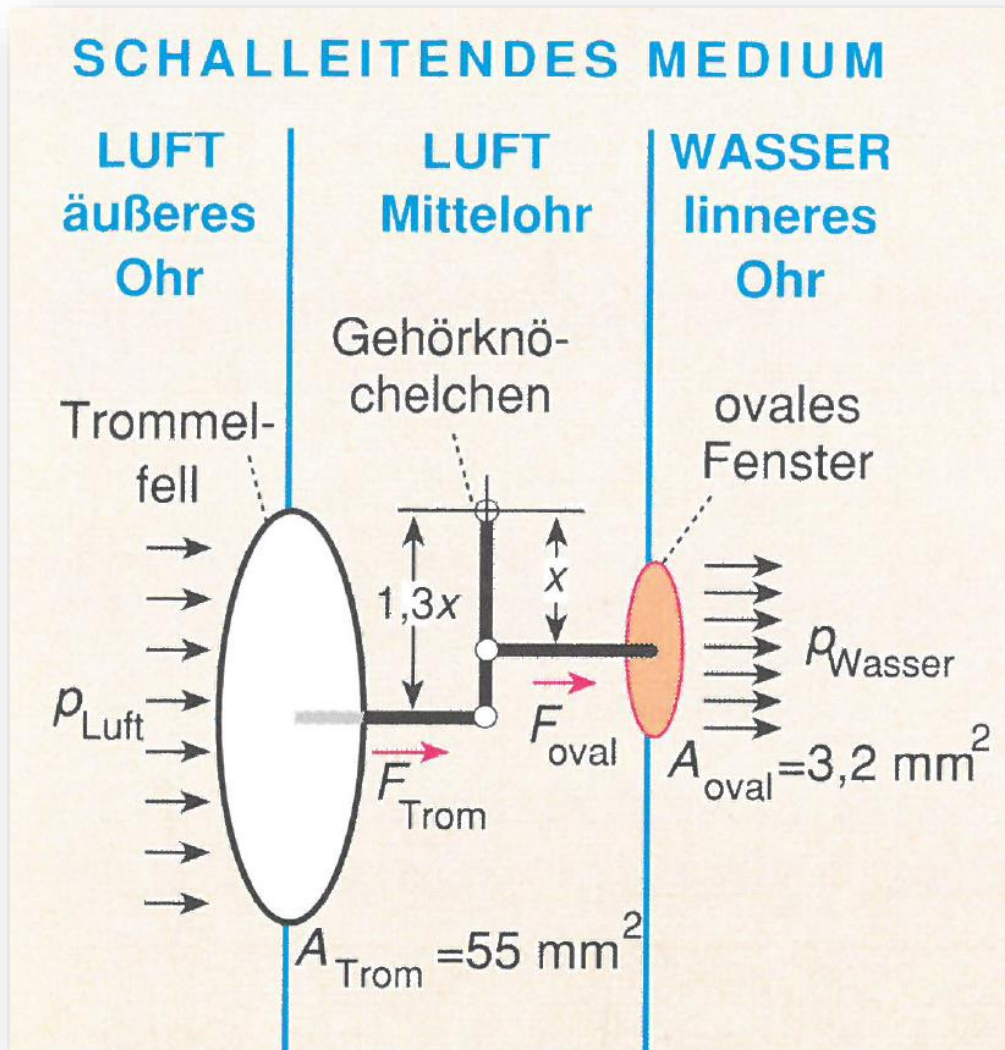
$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{r_1}{r_2}$$



Kraftvervielfachung



# Die Druckerhöhung im Mittelohr



## Druckverstärkung:

- Hebel
- Flächenverkleinerung

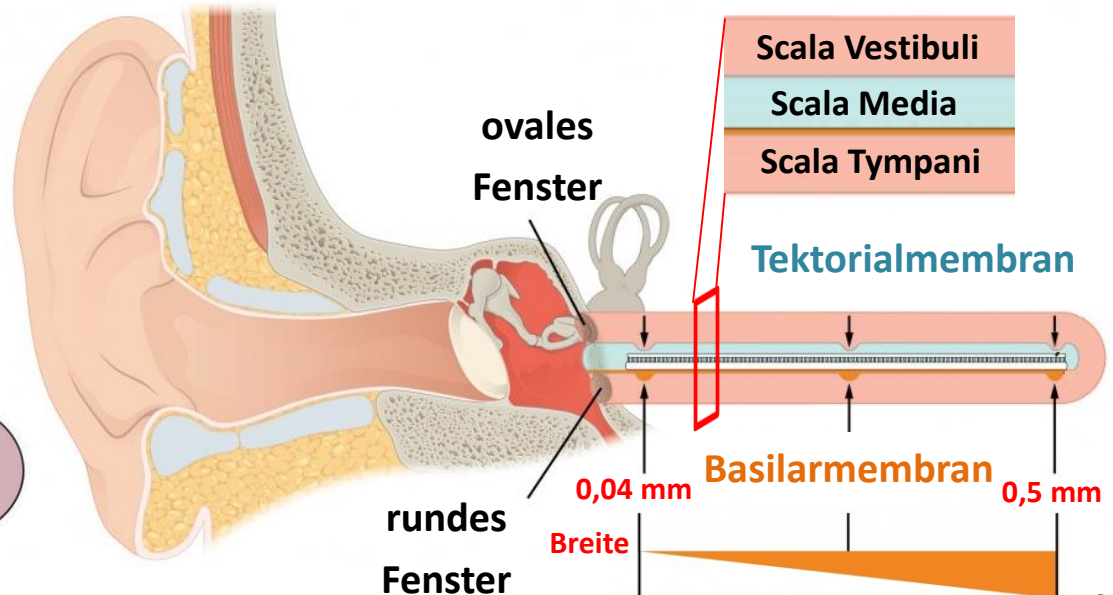
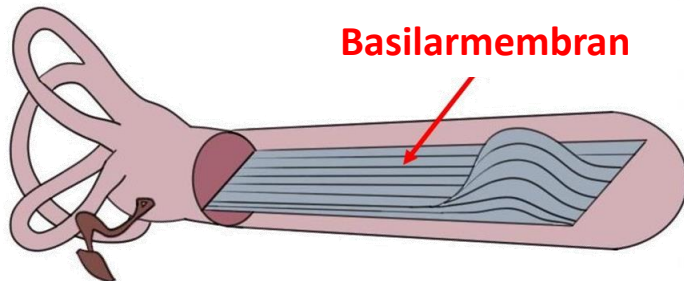
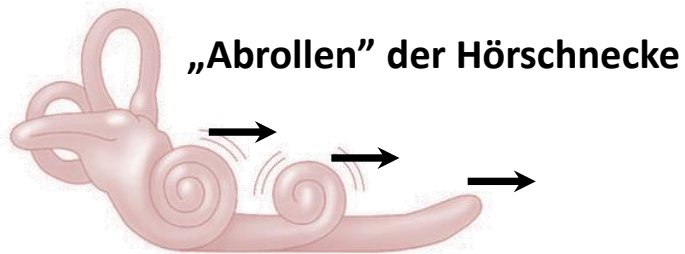
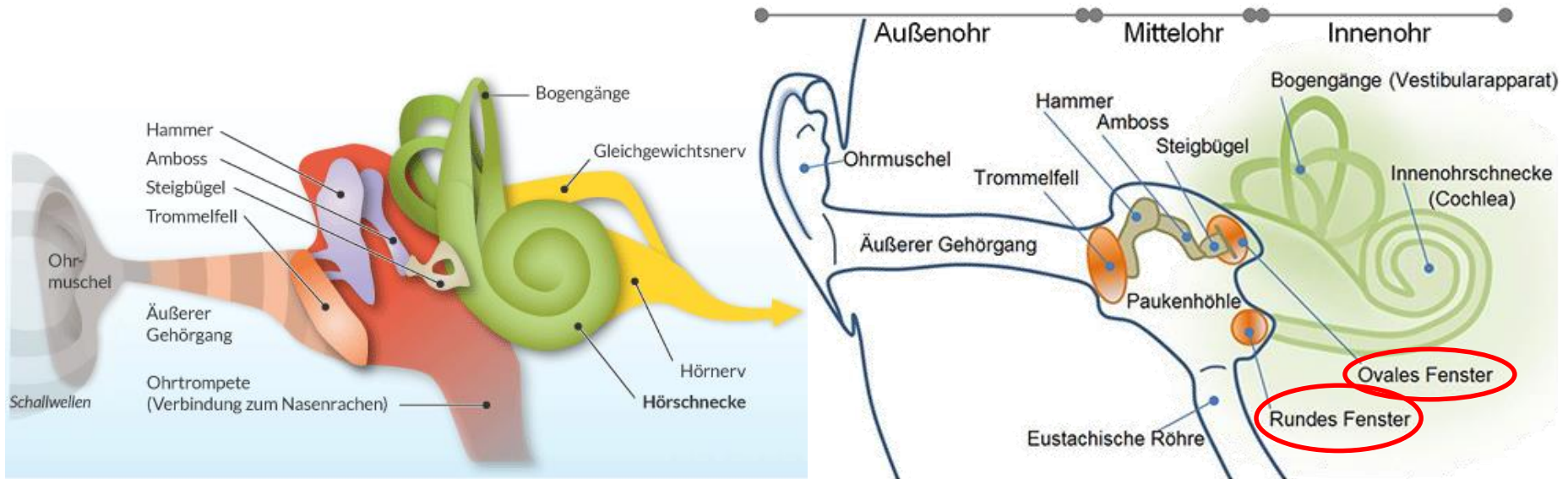
$$p_{\text{Wasser}}/p_{\text{Luft}} = 22,3$$

## Intensitätsverstärkung:

- etwa 125-fach

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

# Aufbau des Innenohres



# Schallempfindung im Innenohr

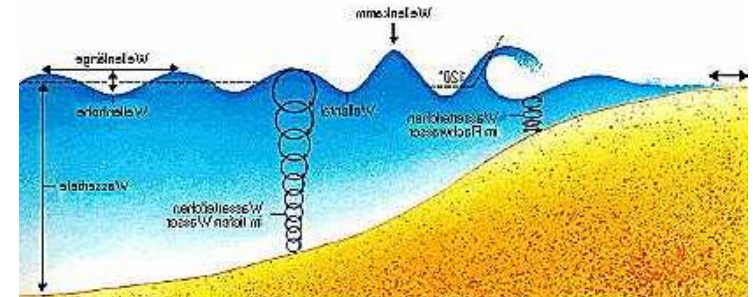
- „Saitentheorie“

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

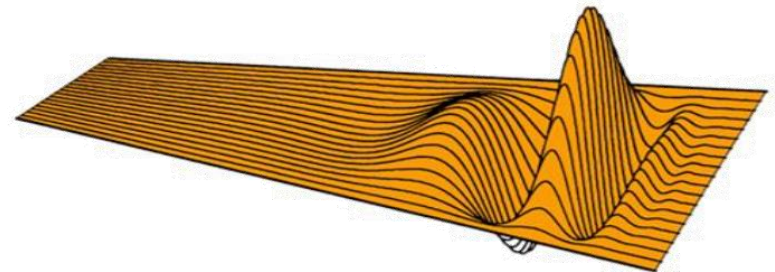


- **Wanderwellen-Theorie**

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



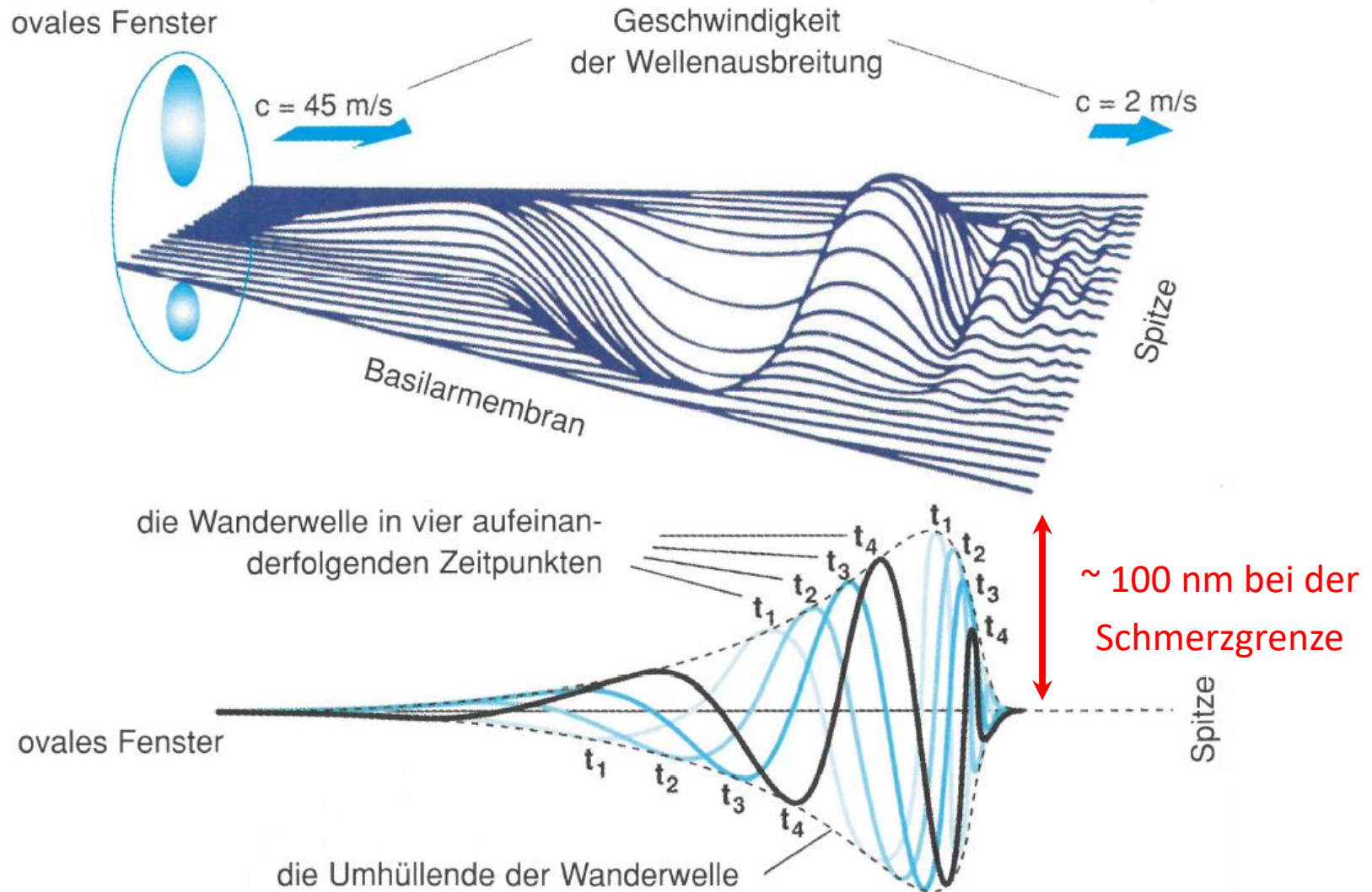
Laufrichtung der Wellen →





# Bewegung der Wanderwellen

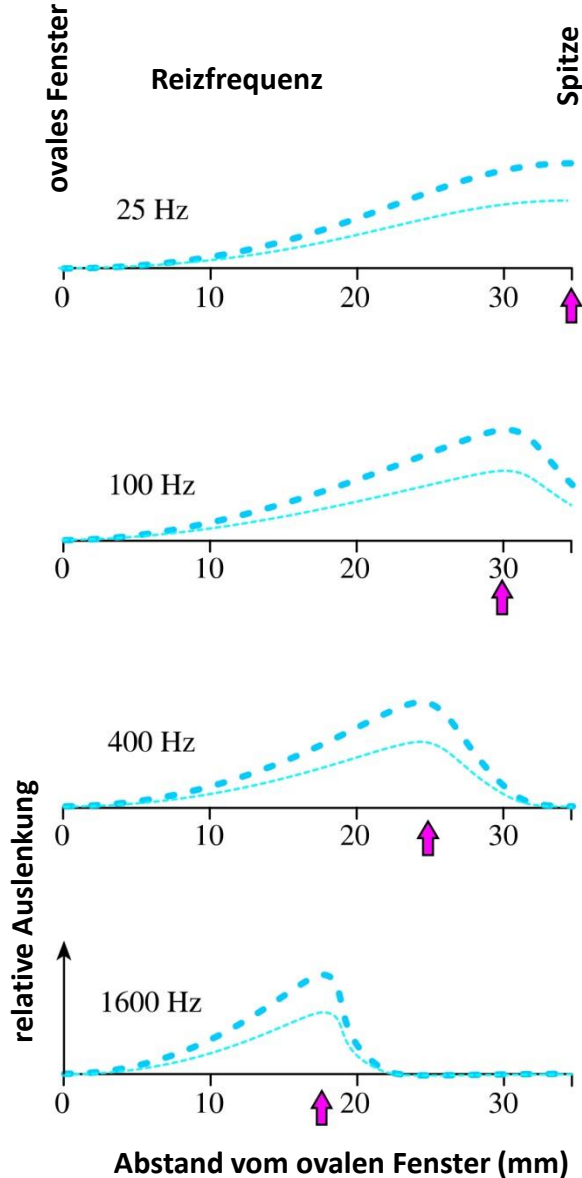
Die Geschwindigkeit der „Surfwellen“ ist kleiner, als die Schallgeschwindigkeit (1440 m/s).



# Wanderwellen - Simulation



# Frequenz- und Intensitätsanalyse

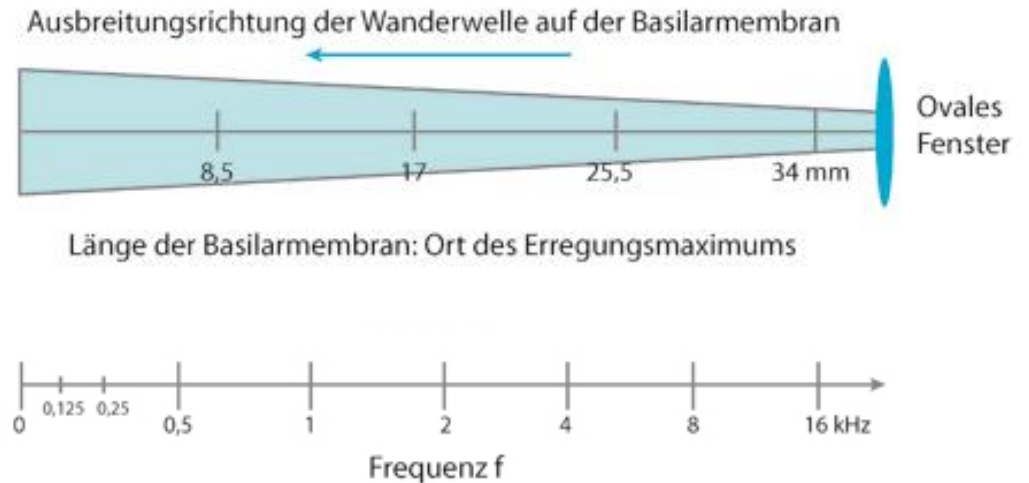


## Frequenz:

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

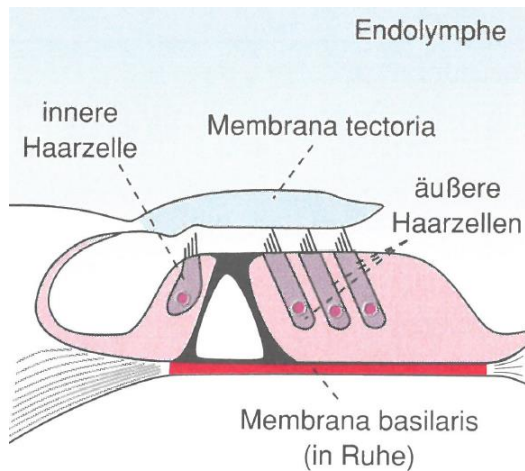
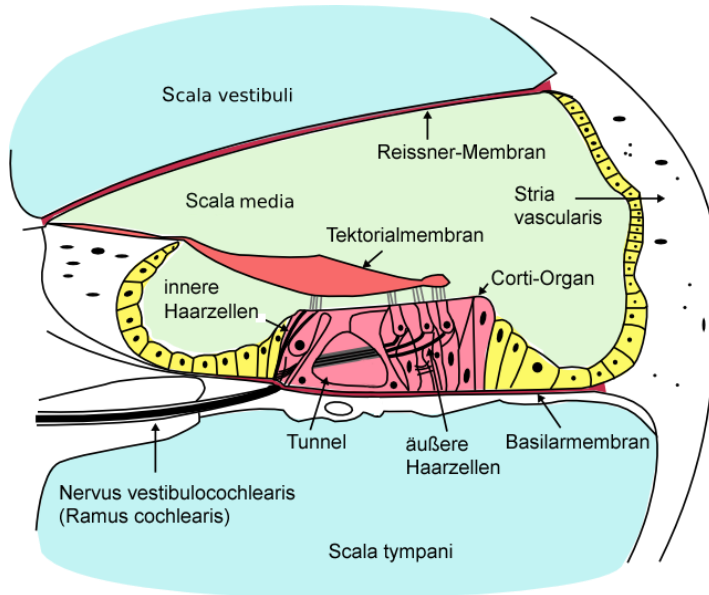
## Intensität:

- ~**Maximale Auslenkung** (Amplitude) der Wanderwelle.

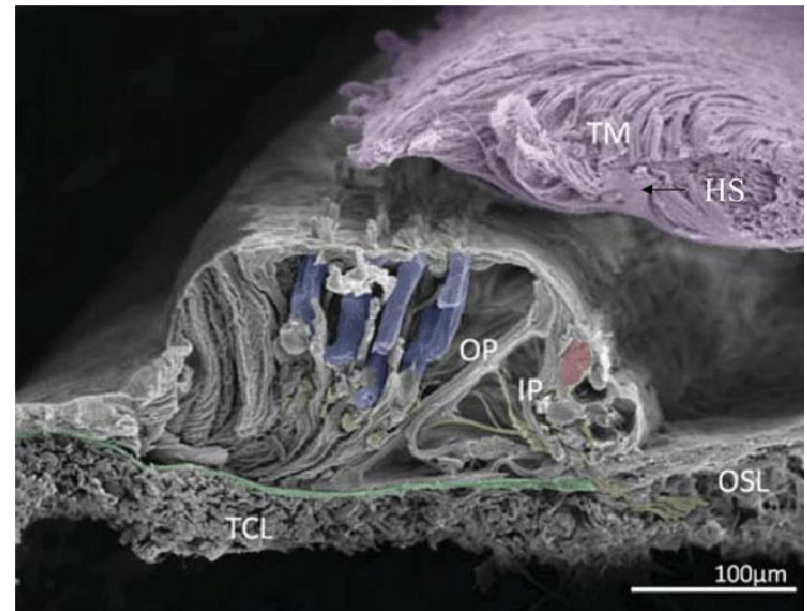


# Der Aufbau des Corti-Organ

## Schnitt durch die Hörschnecke



## Aufnahme mit Rasterelektronenmikroskop



### Innere Haarzellen:

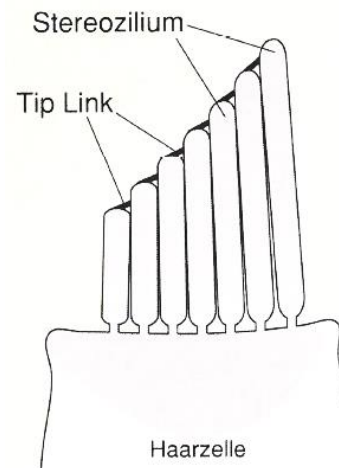
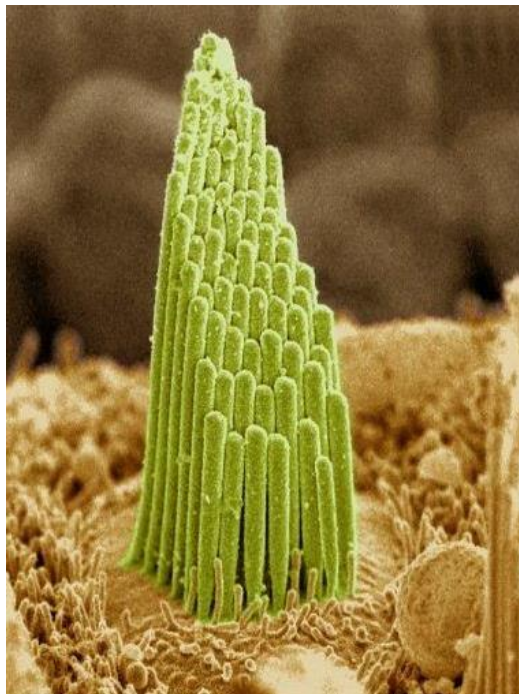
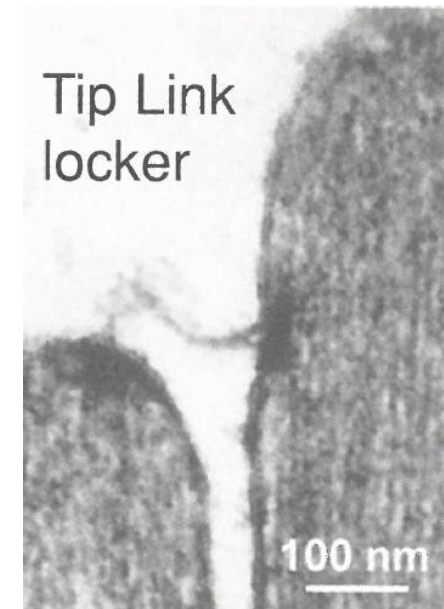
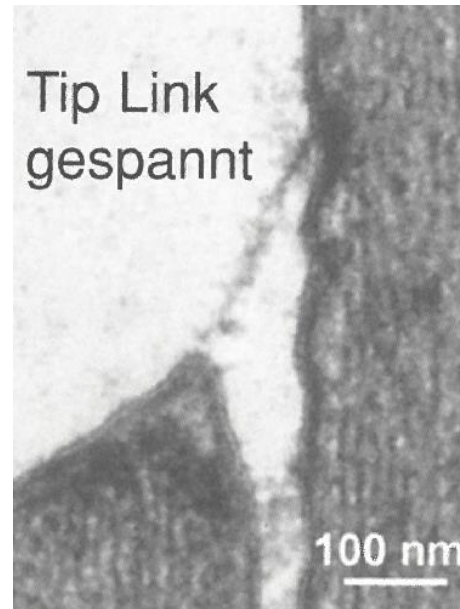
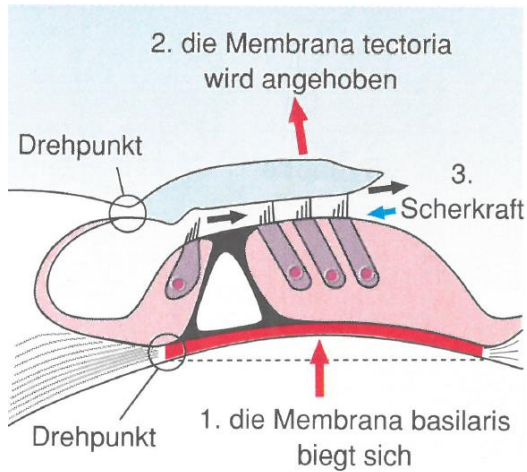
- Anzahl: 3500
- mechano-elektrische **Signalumwandlung**

### Äußere Haarzellen:

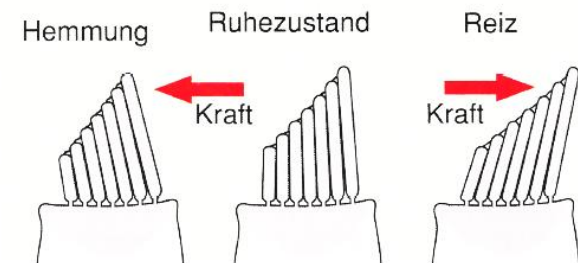
- Anzahl: 12-20 000
- mechanische **Verstärkung**



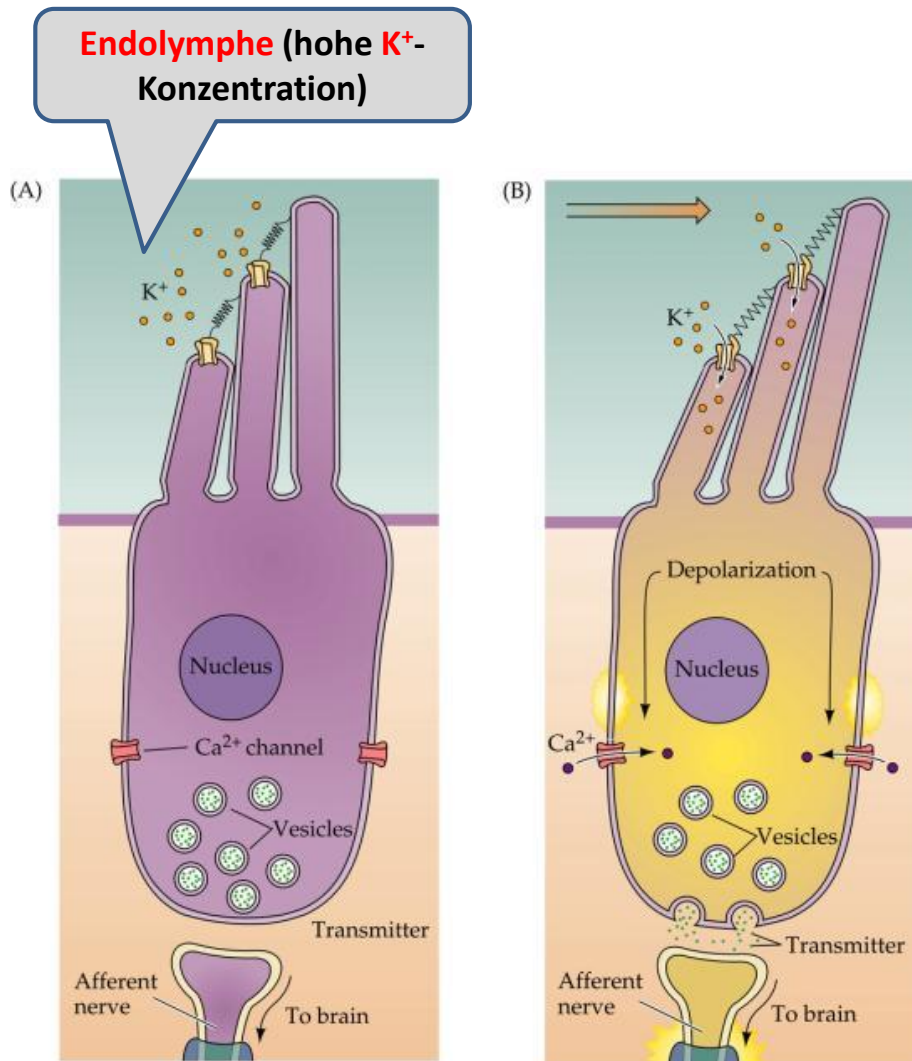
# Die Funktion der **innere** Haarzellen #1



- **mechano-elelektrische Signalumwandlung**



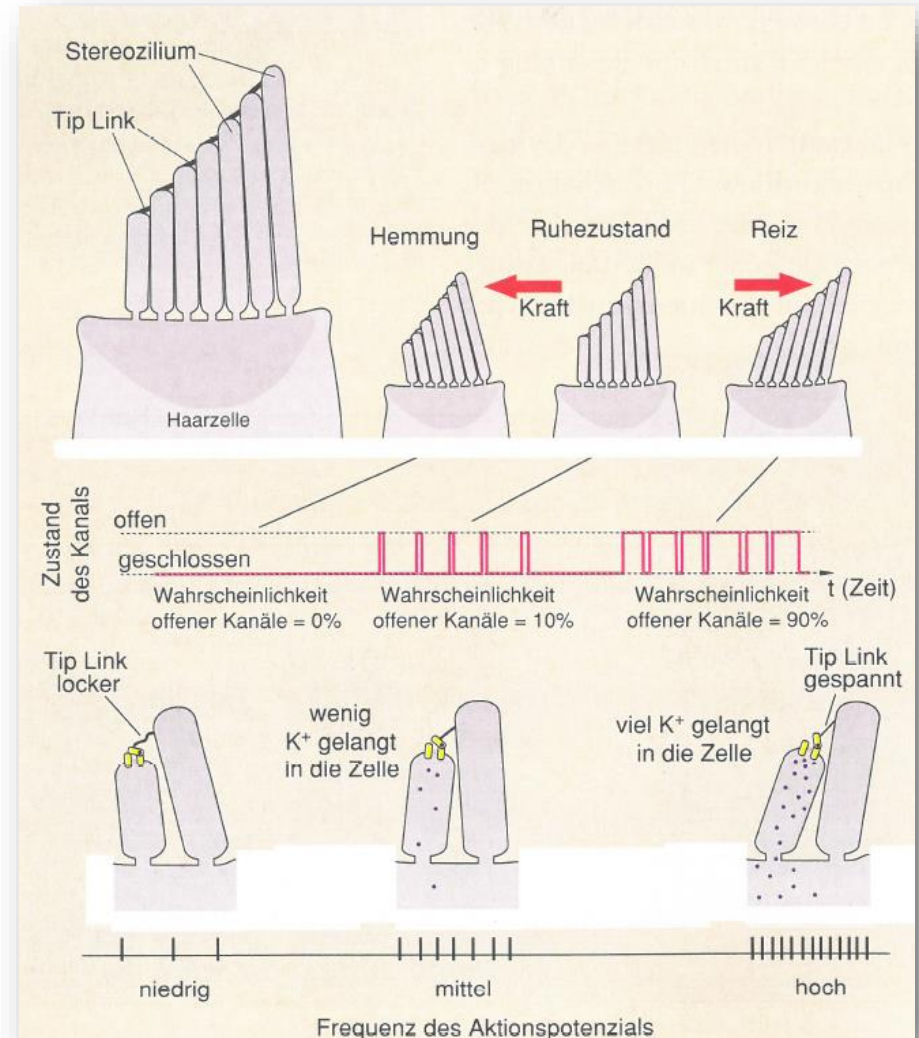
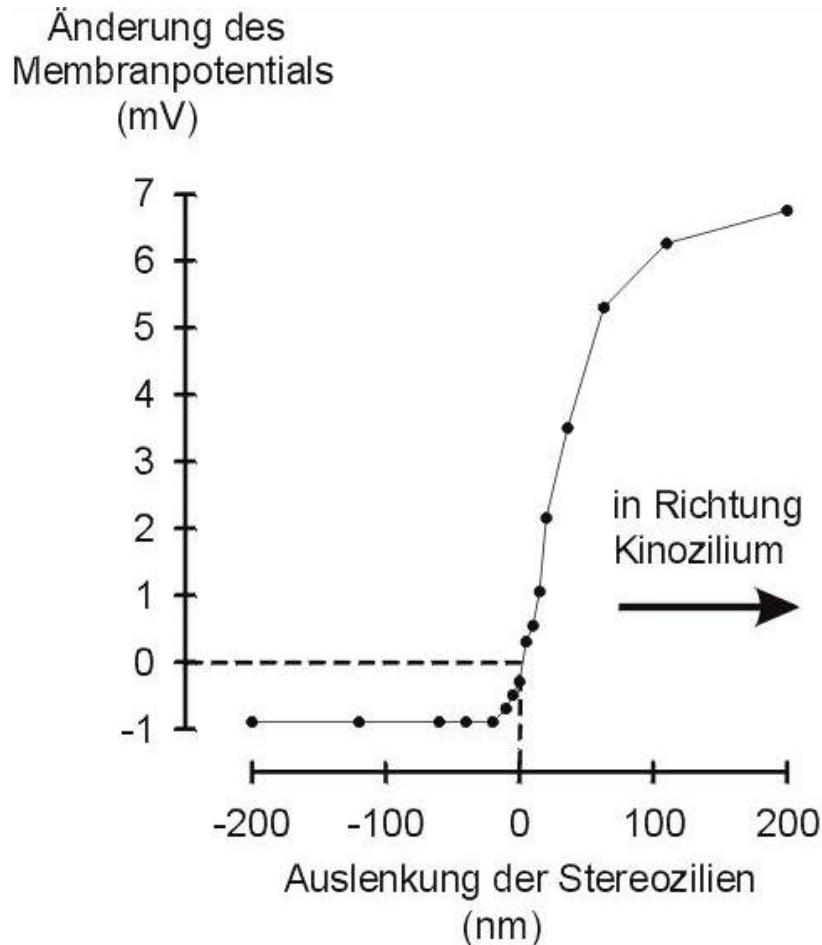
# Die Funktion der **innere** Haarzellen #2



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 spannungs-empfindlichen  $Ca^{2+}$ -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

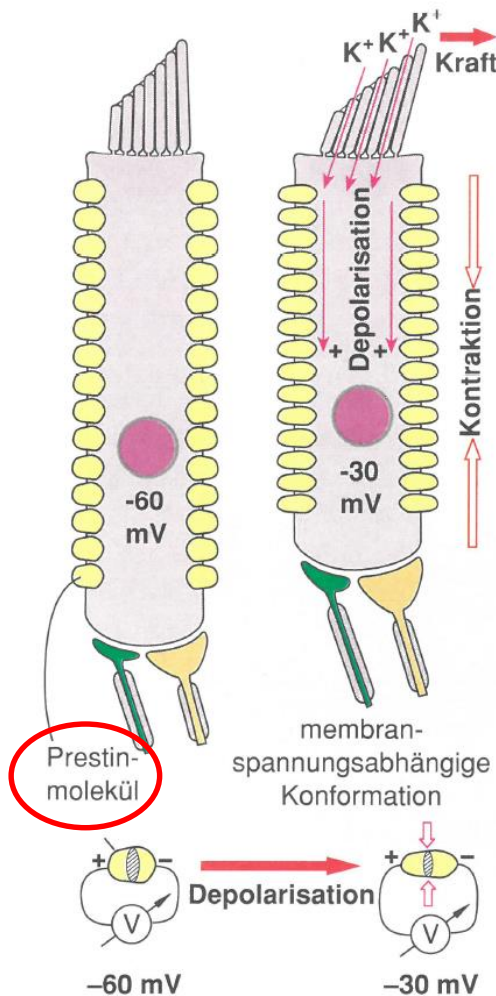
## Rezeptorpotenzial (Mikrophonpotenzial)





# Die Funktion der äußeren Haarzellen

## Aktive mechanische Verstärkung



## Die Länge der Haarzellen ändert im Takt der Töne



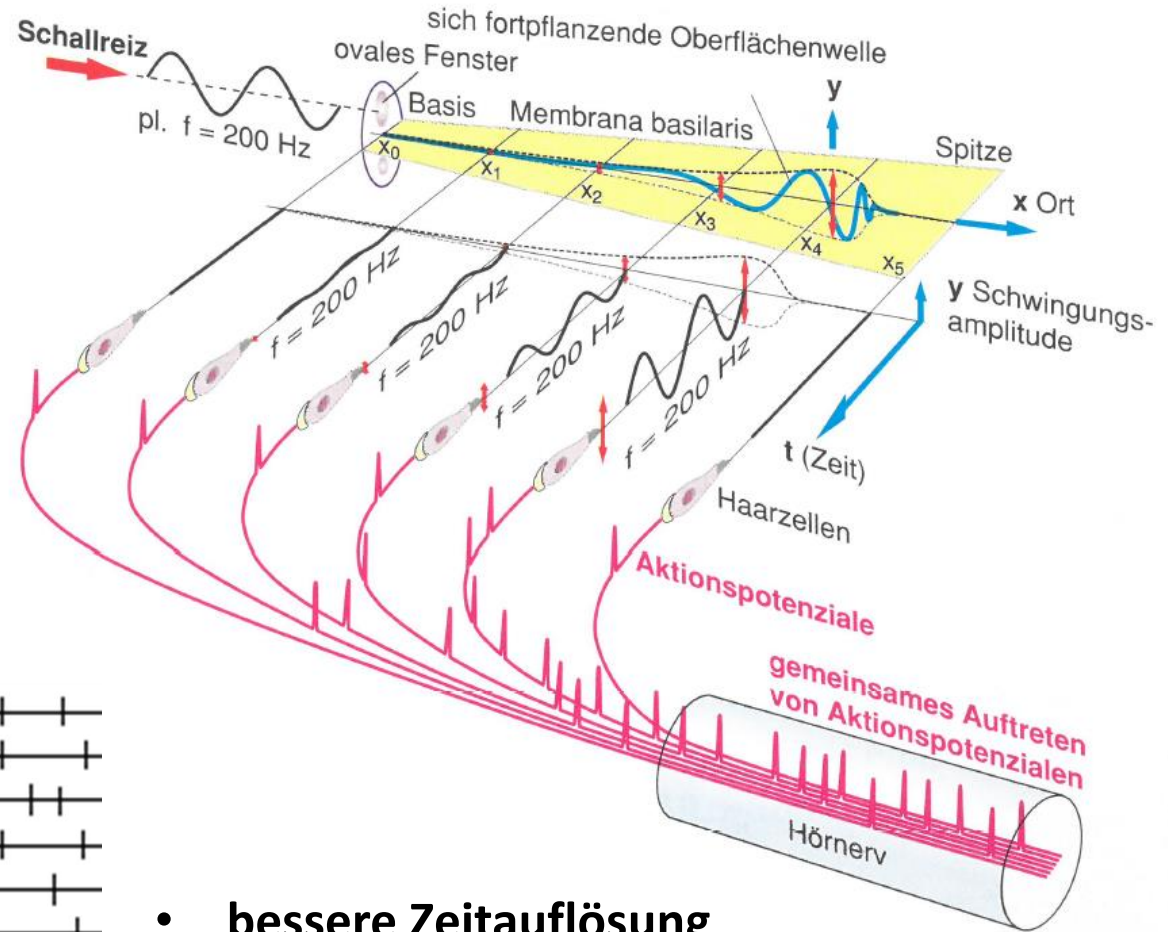
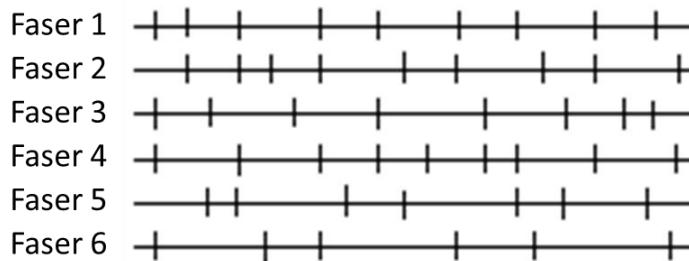
Vibration der Haarzellen → Schwingung der Basilarmembran mit höherer Amplitude → **positiv rückgekoppelter Verstärker (+50 dB)**

# Die Kodierung der akustischen Information

## „Volleyballtheorie“



Größere Zahl der gemeinsamen Berührungen erleichtert das Abschlagen des Balls.



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

# Richtungshören

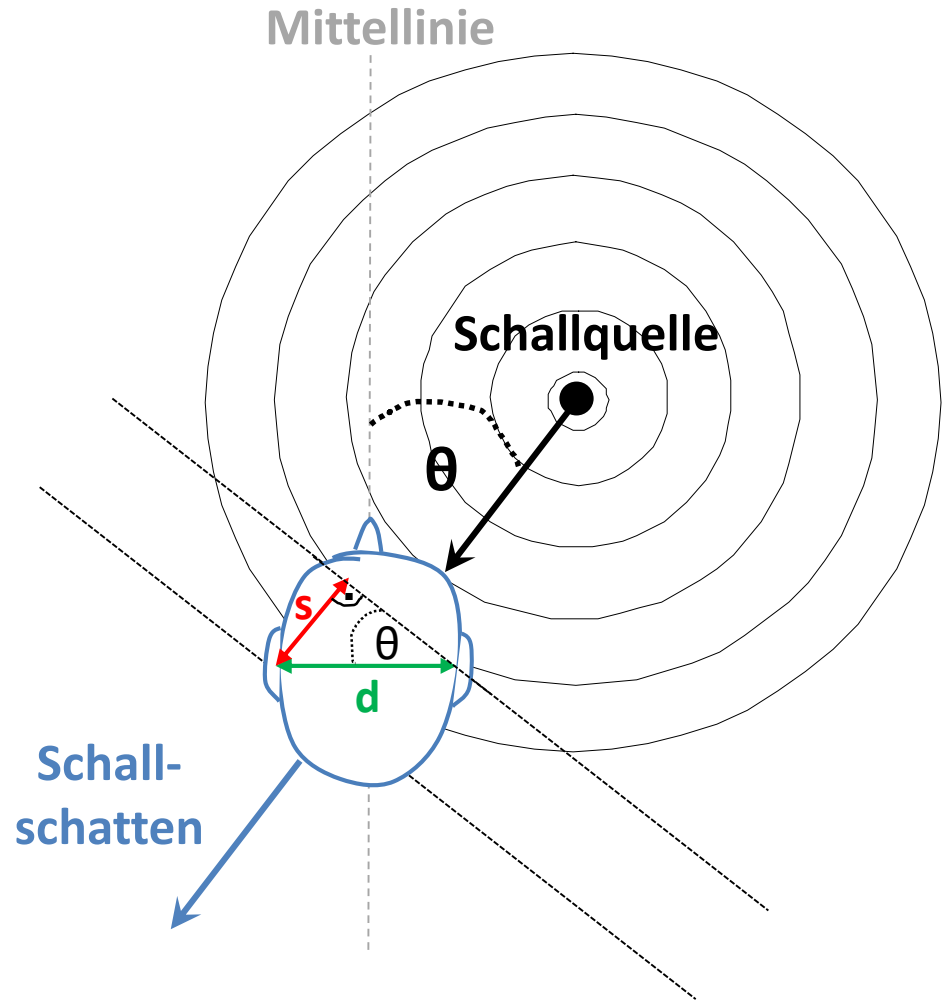
## zweiohriges Richtungshören

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

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

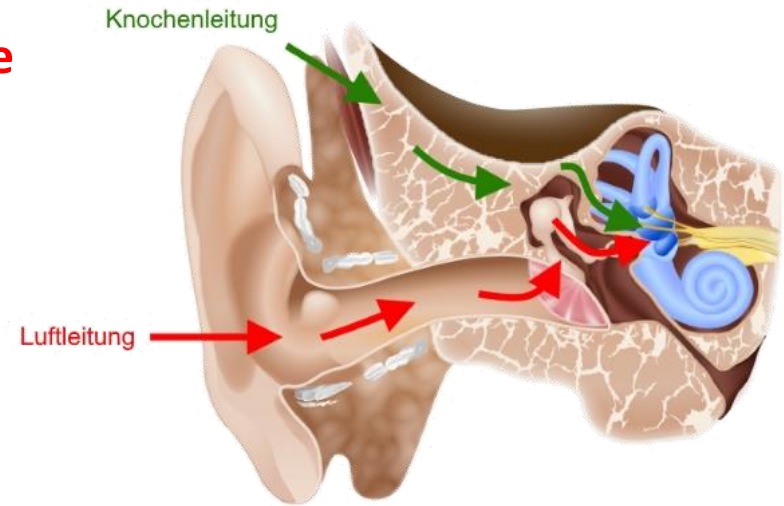
$$t = \frac{s}{c} = \frac{s}{340}$$

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



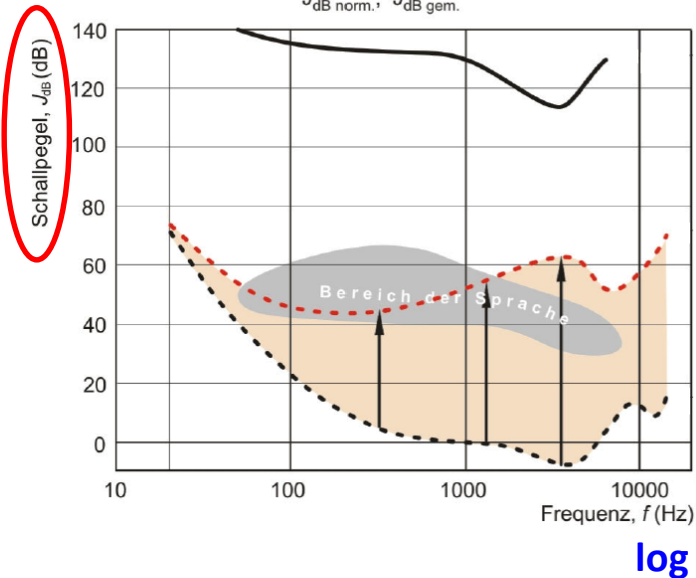
# Audiometrie #1: Prinzip

- Sprachaudiometrie ↔ Tonaudiometrie
- Luftleitung ↔ Knochenleitung



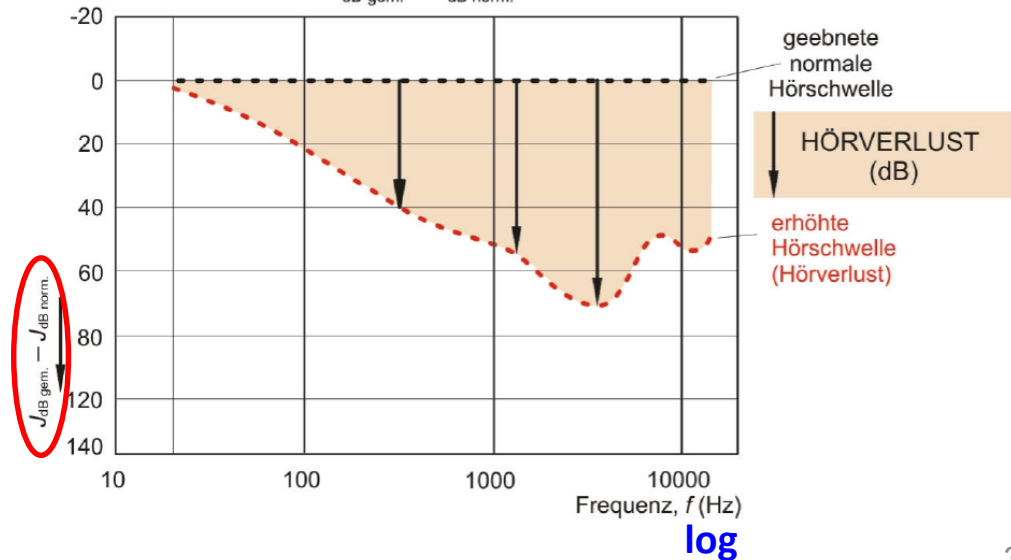
ISOPHONE

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

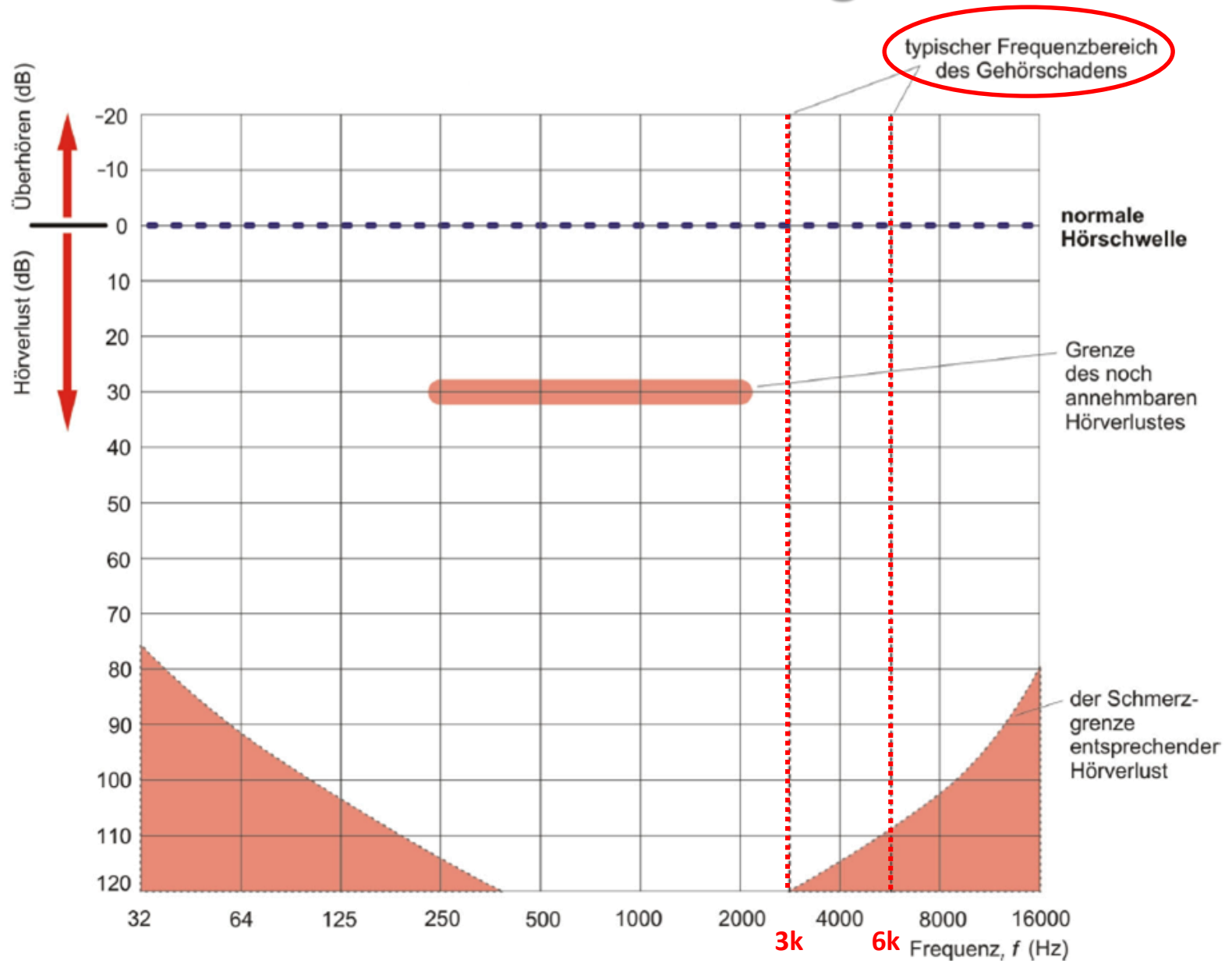


AUDIOGRAMM

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



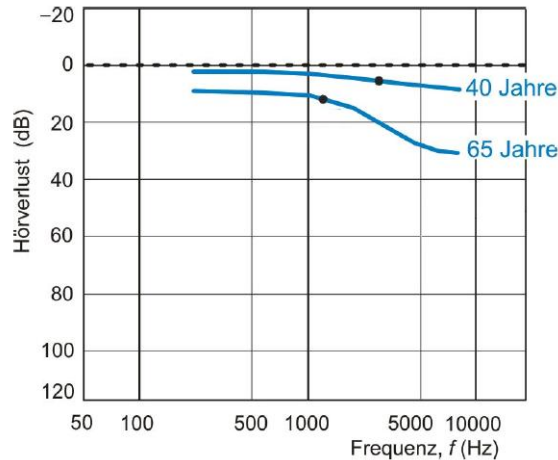
# Audiometrie #2: Audiogramm





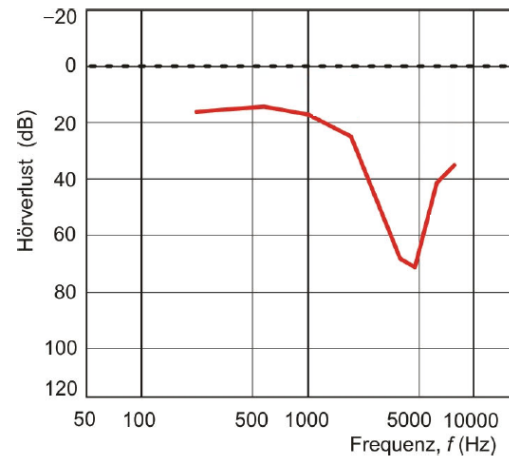
# Audiometrie #3: Schwerhörigkeiten

## Altersschwerhörigkeit



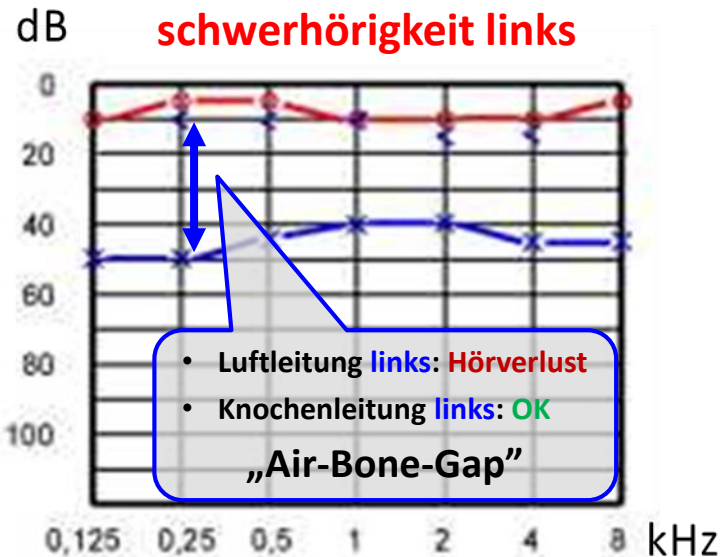
normale  
Hörschwelle

## Lärmschwerhörigkeit



normale  
Hörschwelle

## Schallleitungs- schwerhörigkeit links



## Schallempfindungs- schwerhörigkeit links

