

Sensorische Funktionen. Gehör und Audiometrie.

Balázs Kiss

kissb3@gmail.com



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

11. Mai 2020.

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)

2

1. Sensorische Funktionen

3

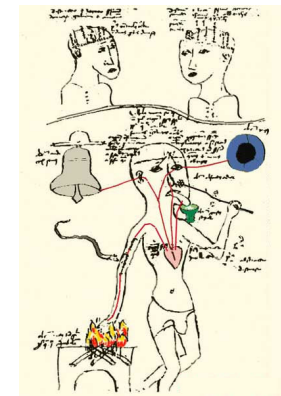
Historie der Wahrnehmung / Perzeption #1

• 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.

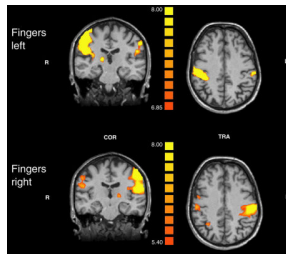
4

Historie der Wahrnehmung / Perzeption #2

• moderne These

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

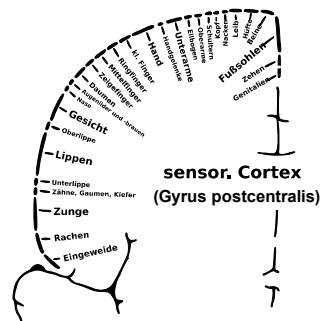
* s. Circulus arteriosus cerebri/Willisii



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

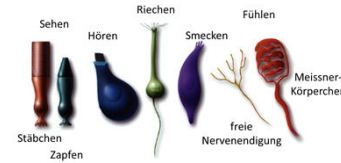
sensorischer Homunkulus

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



5

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
wahr- genommen	Sehen	Stäbchen und Zapfen	Auge
	Hören	Haarzelle	Ohr (Corti-Organ)
	Riechen	Olfaktorische 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 wahr- genommen	Muskellänge	Nervenendigung	Muskelspindel
	Muskelspannung	Nervenendigung	Golgi-Sehnenorgan
	Arterieller Blutdruck	Nervenendigung	Sinus Caroticus
	Zentraler Venendruck	Nervenendigung	Dehnungsrezeptor in Lungen
	USW...	USW...	USW...

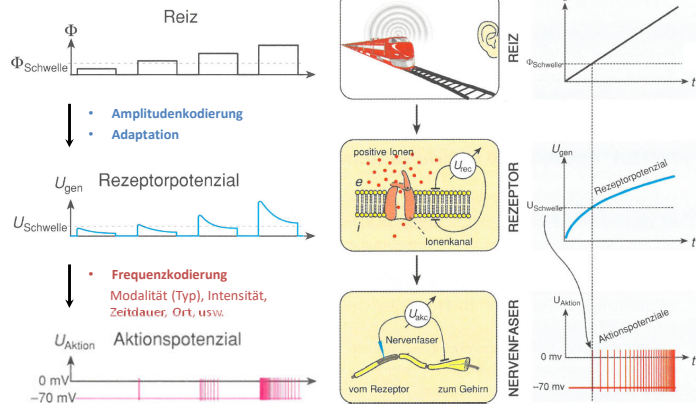
Empfindlichkeit: E_{\min} : eV

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

6

Die Rezeptoren und die Nervenfasern

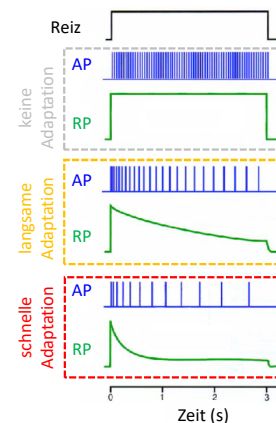
- **adäquater Reiz:** wofür ein Rezeptor die größte Empfindlichkeit besitzt



7

Spezifische Aspekte der Rezeptoren

Zeitdauer, Adaptation



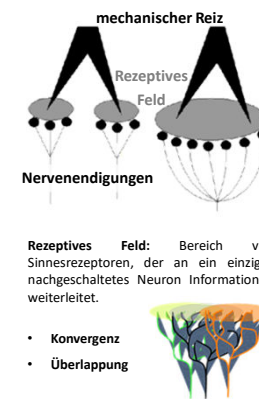
Tonische Rezeptoren:

- Schmerz,
- Kalt~

Phasische Rezeptoren:

- Druck,
- Riechen,
- Warm~

Ortsbestimmung

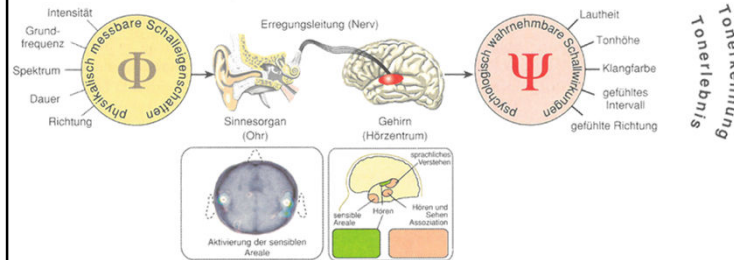


Rezeptives Feld: Bereich von Sinnesrezeptoren, der an ein einziges nachgeschaltetes Neuron Informationen weiterleitet.

- Konvergenz
- Überlappung

8

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

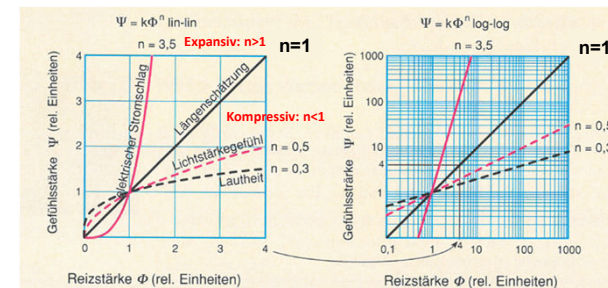
Die relative Änderung des Reizes ist proportional zur relativen Änderung des Gefühls.

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

9

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



10

2. Das Ohr und das Gehör

11

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**

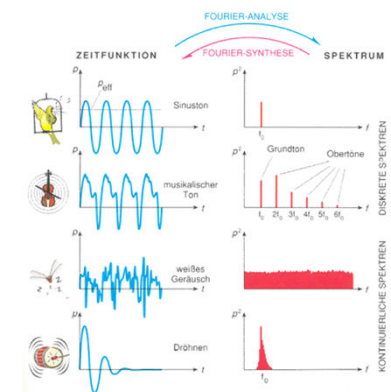
- „... wird von der **Frequenz und der relativen Stärke der sog. Obertöne...** d. h. vom **Schwingungsspektrum des Tones** bestimmt.“ (Helmholtz)

- Sinuston:**

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

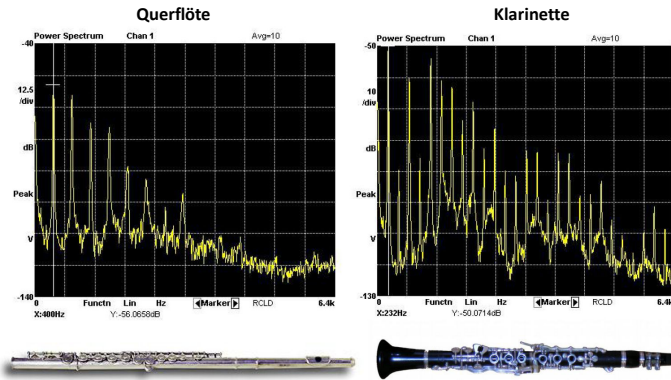
- musikalischer Ton:**

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



12

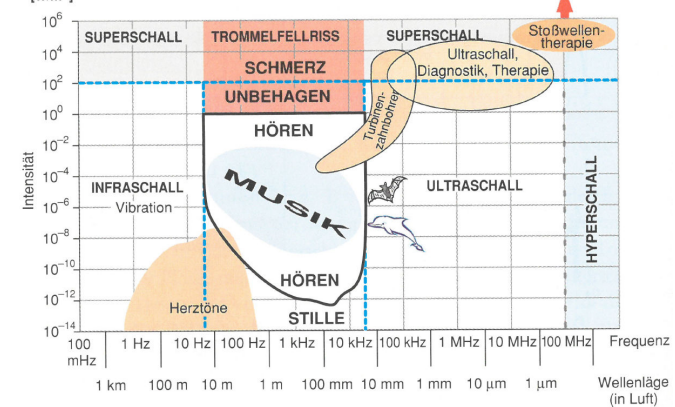
Frequenzspektren von unterschiedlichen Musikinstrumenten



13

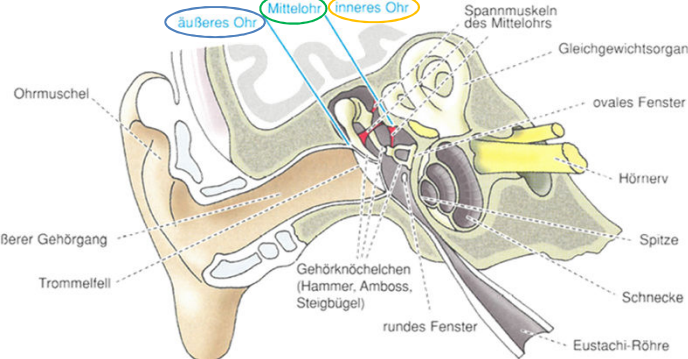
Frequenz- und Intensitätsbereiche der Töne

Schallintensität: $J = \frac{P}{A} = \frac{p_{eff, Schall}^2}{Z}$ Schallintensitätspegel: $n \text{ (dB)} = 10 \cdot \lg \left(\frac{I_1}{I_2} \right)$



Das Ohr – Überblick

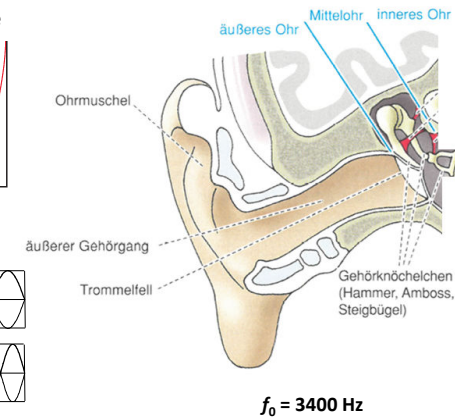
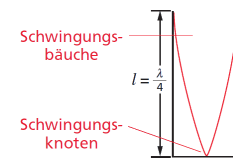
- Resonatorfunktion
- Impedanzanpassung
- Verstärkung
- Schallempfindung
- Beschleunigungsempfindung



15

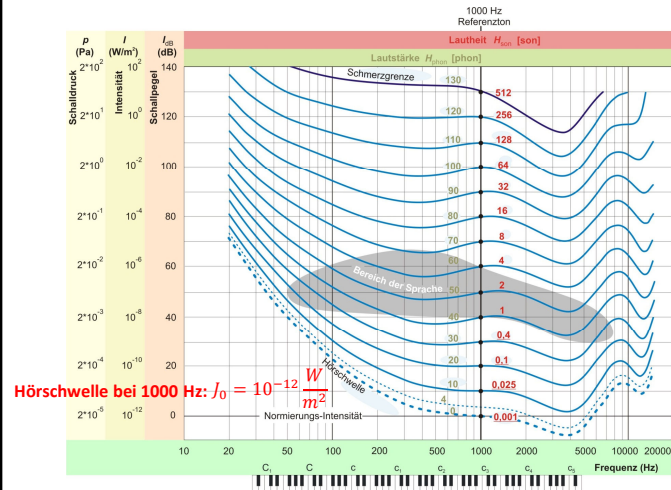
Resonatorfunktion des Außenohres

Resonanz bei einer geschlossenen Pfeife



16

Kurven gleicher Lautstärke



17

Das Mittelohr als Impedanzanpasser

Problem: Reflexion der Schallwellen durch die Grenzfläche Luft/Gewebe

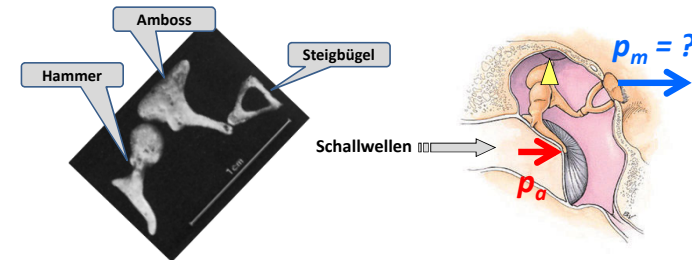
$$R = \frac{J_{\text{refl}}}{J_{\text{ein}}} \approx \left(\frac{Z_{\text{Wasser}} - Z_{\text{Luft}}}{Z_{\text{Wasser}} + Z_{\text{Luft}}} \right)^2 = 0,9989 \quad !$$

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**



18

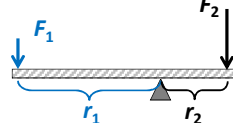
Wiederholung: Hebelgesetz

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



Gleichgewicht: $\sum M_i = 0$

Hebel:



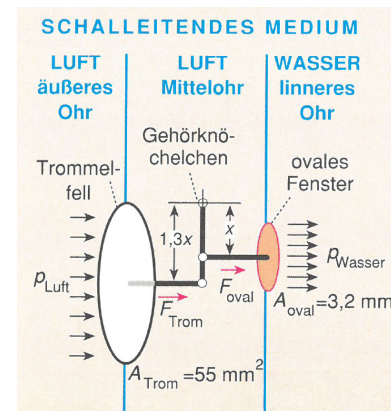
Hebelgesetz:

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

Kraftvervielfachung

19

Die Druckerhöhung im Mittelohr



Druckverstärkung:

- Hebel
- Flächenverkleinerung

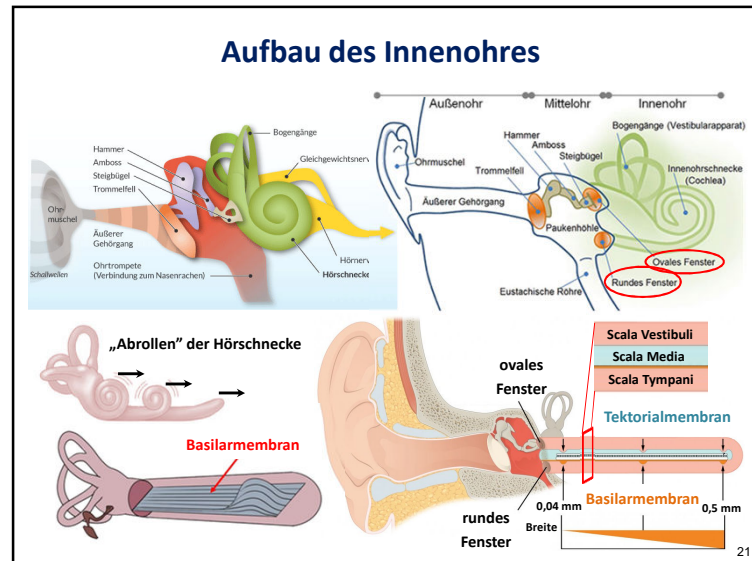
$$P_{\text{Wasser}}/P_{\text{Luft}} = 22,3$$

Intensitätsverstärkung:

- etwa 125-fach

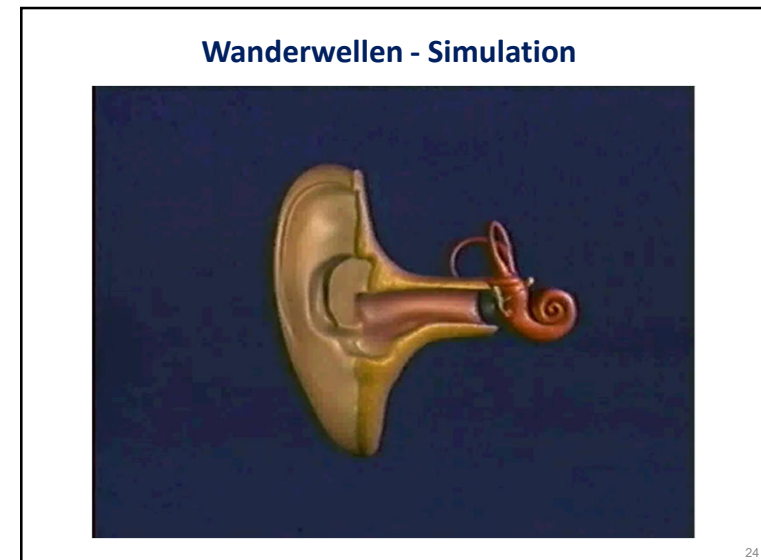
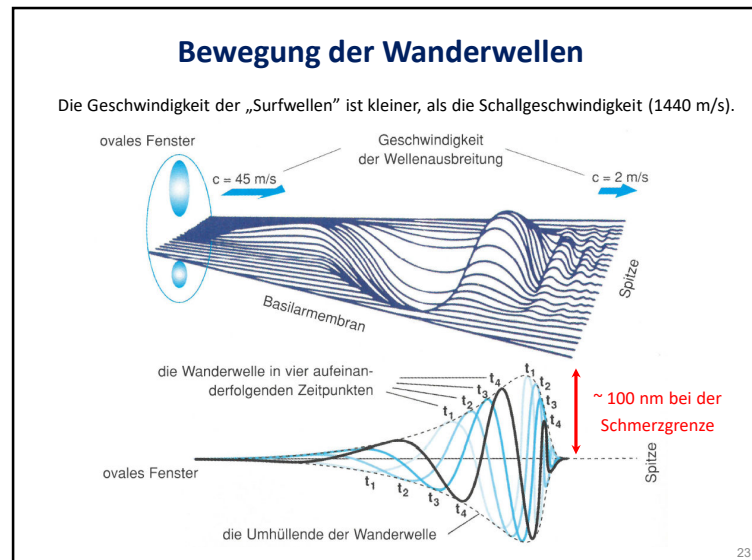
$$\frac{J_{\text{Wasser}}}{J_{\text{Luft}}} = \frac{\frac{P_{\text{Wasser}}^2}{Z_{\text{Wasser}}}}{\frac{P_{\text{Luft}}^2}{Z_{\text{Luft}}}} = \left(\frac{P_{\text{Wasser}}}{P_{\text{Luft}}} \right)^2 \frac{Z_{\text{Luft}}}{Z_{\text{Wasser}}}$$

20

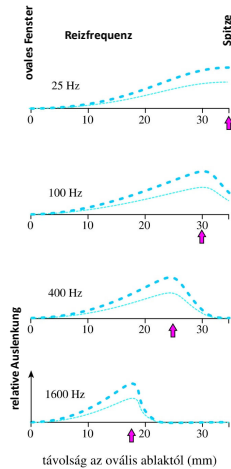


Schallempfindung im Innenohr

- „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.



Frequenz- und Intensitätsanalyse

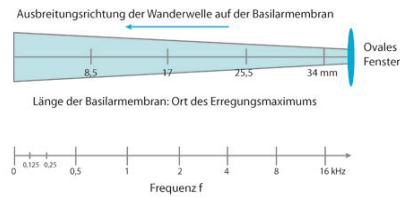


Frequenz:

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

Intensität:

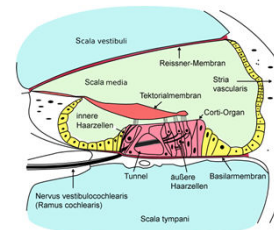
- ~Maximale Auslenkung (Amplitude) der Wanderwelle.



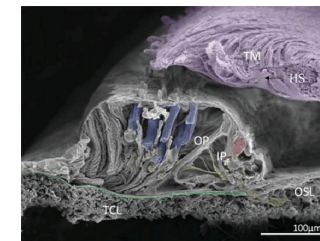
25

Der Aufbau des Corti-Organ

Schnitt durch die Hörschnecke



Aufnahme mit Rasterelektronenmikroskop



Innere Haarzellen:

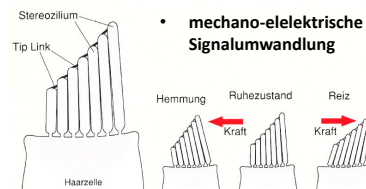
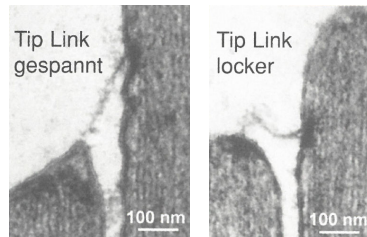
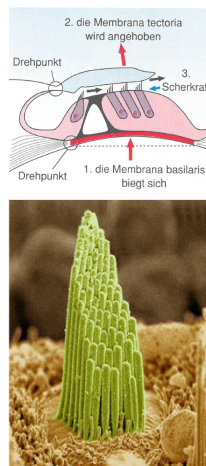
- Anzahl: 3500
- mechano-elektrische Signalumwandlung

Äußere Haarzellen:

- Anzahl: 12-20 000
- mechanische Verstärkung

26

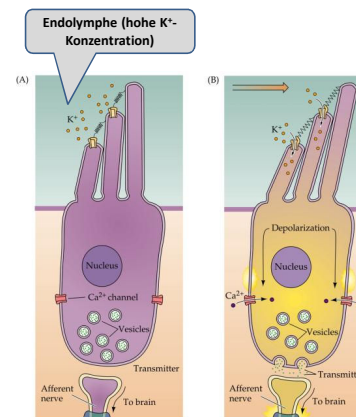
Die Funktion der innere Haarzellen #1



- mechano-elektrische Signalumwandlung

27

Die Funktion der innere Haarzellen #2

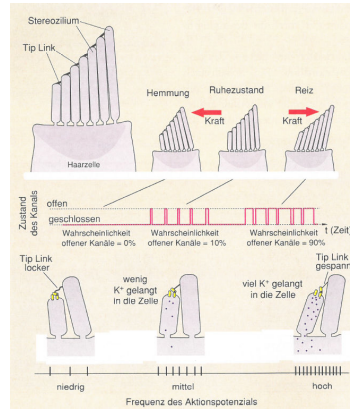
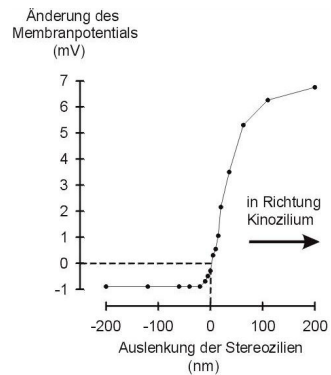


1. **Kraftwirkung:** Auslenkung der Zilien.
2. **K⁺-Einstrom:** Öffnung der mechano-sensitiven K⁺-Kanäle (Tip Link).
3. **Depolarisation:** Änderung des Ruhepotentials.
4. **Ca²⁺-Einstrom:** Öffnung der spannungsempfindlichen Ca²⁺-Kanäle.
5. **Neurotransmitter-Freisetzung:** in den synaptischen Spalt.
6. **Depolarisation des afferenten Neurons:** Aktionspotenzial Impulse in die Richtung des Gehirns.

28

Die Funktion der inneren Haarzellen #3

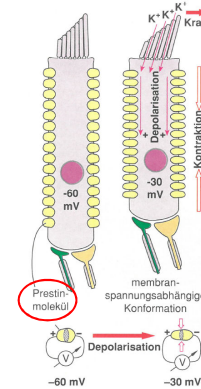
Rezeptorpotenzial (Mikrophonpotenzial)



29

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)

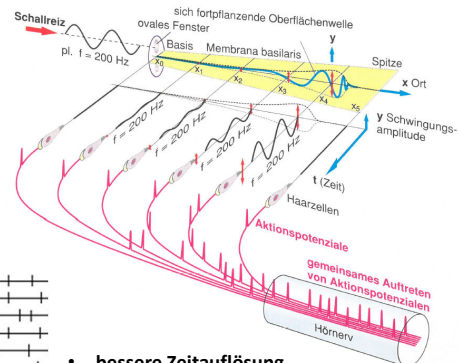
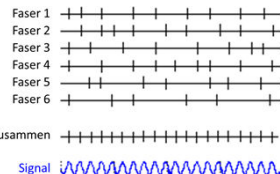
30

Die Kodierung der akustischen Information

„Volleyballtheorie“



Größere Zahl der gemeinsamen Berührungen erleichtert das Abschlagen des Balls.



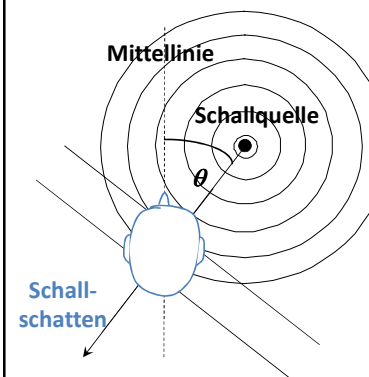
- bessere Zeitauflösung
- die Refraktärphase (1 ms) bedeutet keine Limitation

31

Richtungshören

zweiohriges Richtungshören

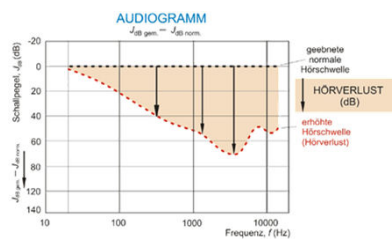
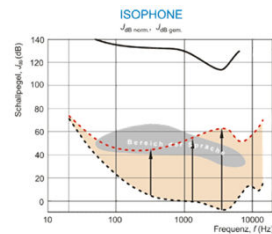
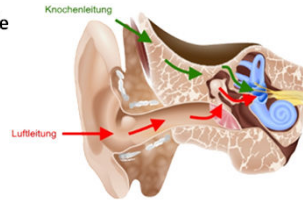
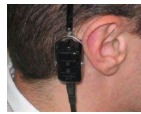
- aufgrund der Zeitverzögerung (Das Gehör kann Laufzeitdifferenzen ab 10 μ s erkennen),
- aufgrund des Intensitätsunterschiedes (Dämpfung durch die Gehirngewebe).



32

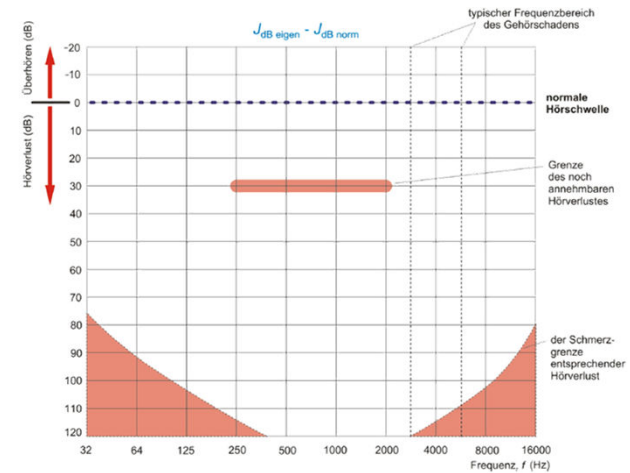
Audiometrie #1: Prinzip

- Sprachaudiometrie ↔ Tonaudiometrie
- Luftleitung ↔ Knochenleitung



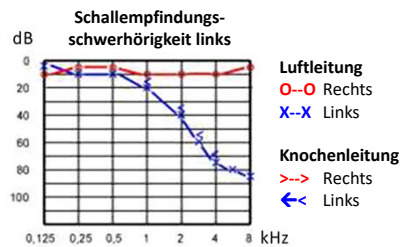
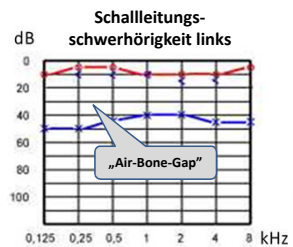
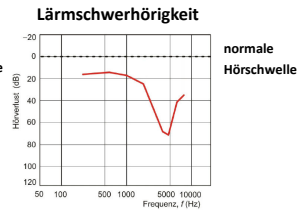
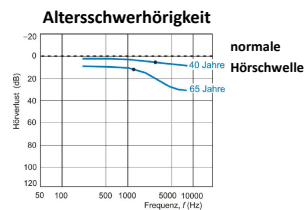
33

Audiometrie #2: Audiogramm



34

Audiometrie #3: Schwerhörigkeiten

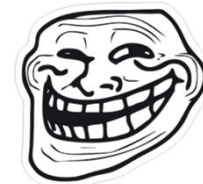


35

Student's Law Of Tension

Pressure \propto The Number Of Days Left
For The Exams

Where,
„Will study from Tomorrow”
Remains Constant!



36