



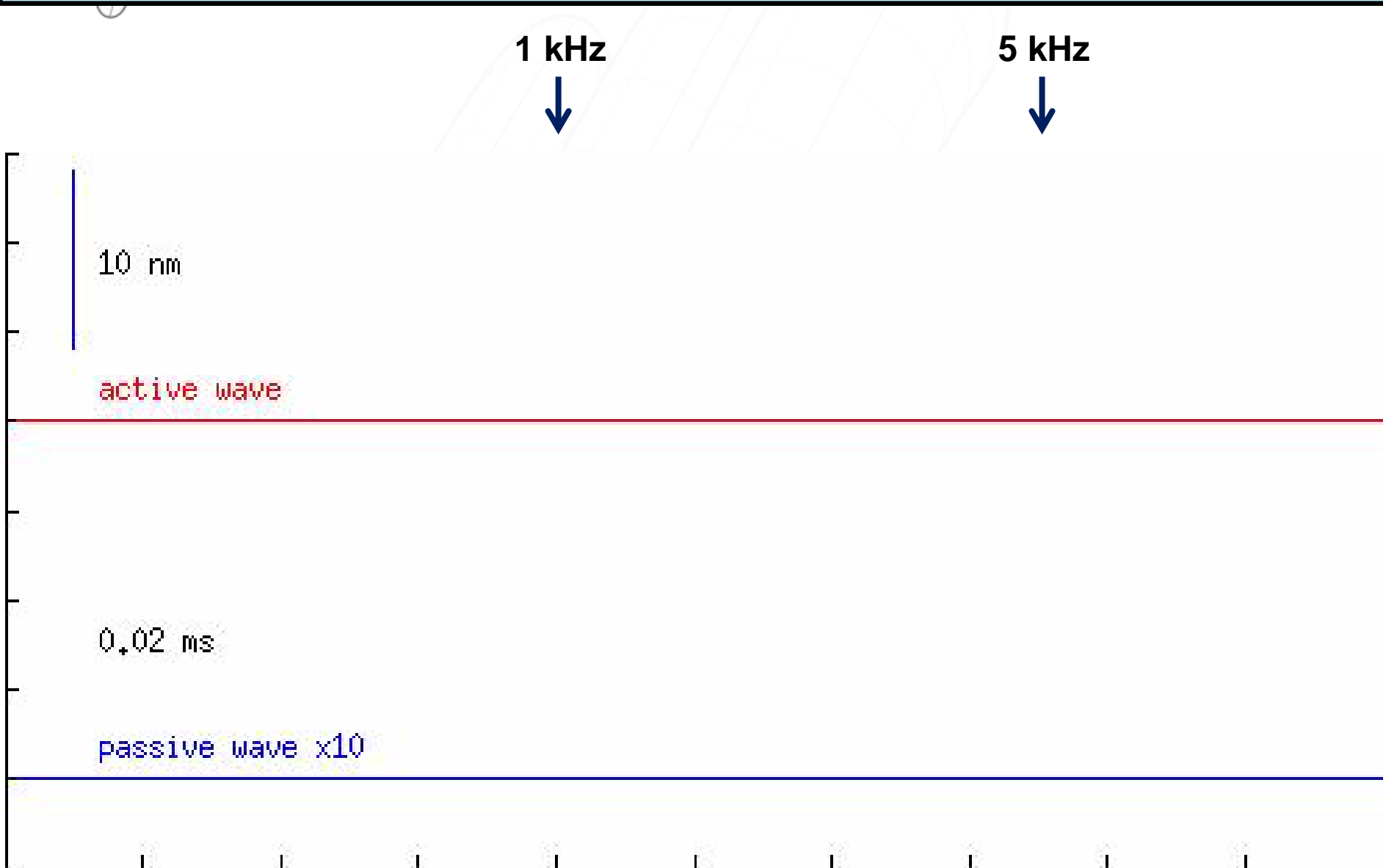
Neuroprothetik

- 1) Vorstellung Neuroprothesen
- 2) Einführung in die Biologie
- 3) Das Membranpotential
- 4) Spannungsgesteuerte Ionenkanäle
- 5) Die Hodgkin-Huxley-Gleichungen
- 6) Elektrische Stimulation von Neuronen
- 7) Elektrische Stimulation entlang des Axons
- 8) Das Hörorgan**

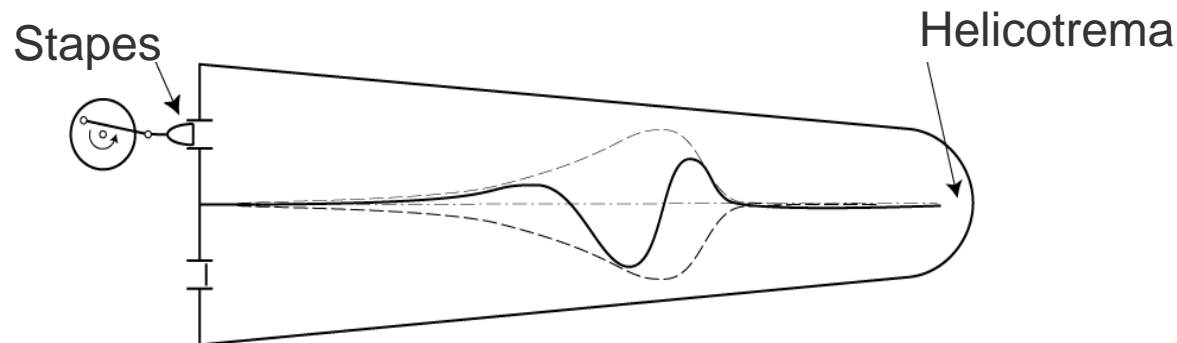
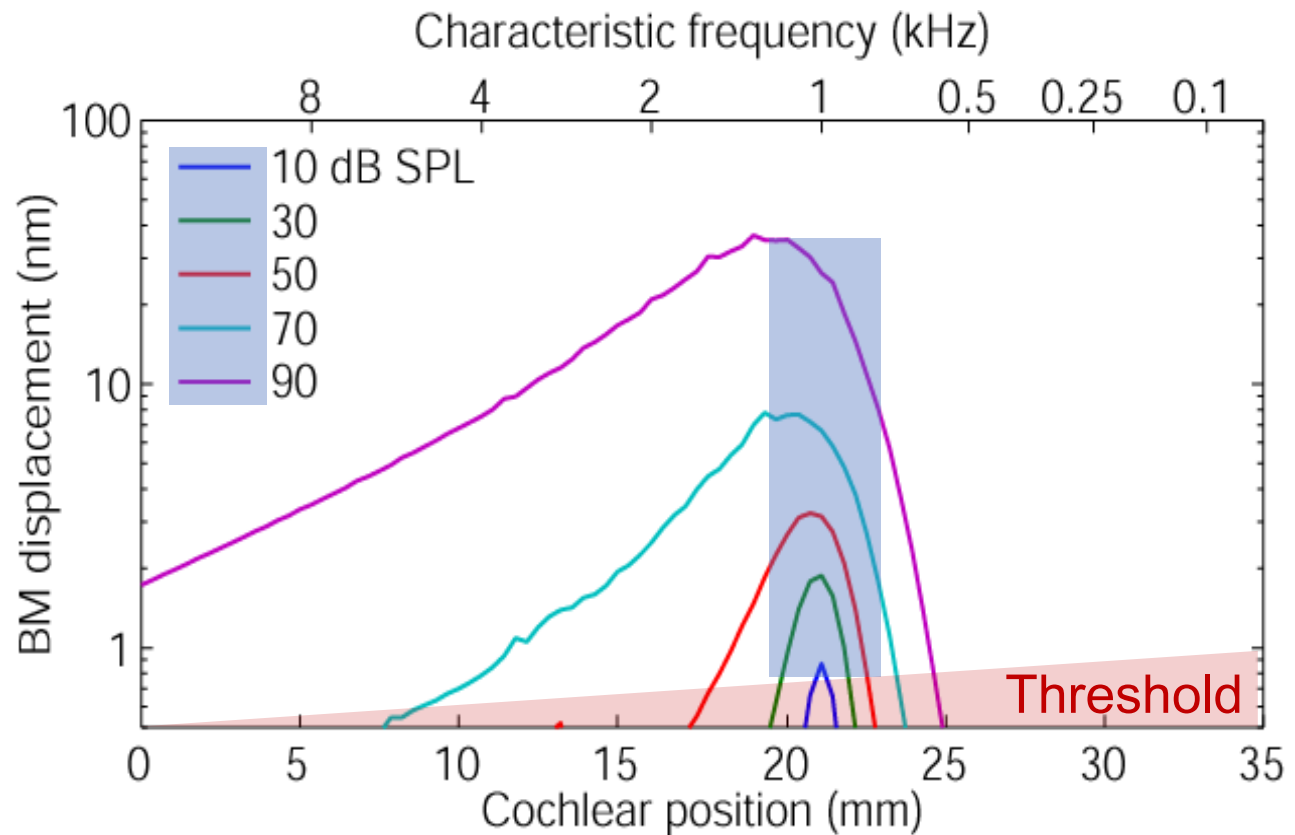
Lernziele:

- Kodierung von Schall im Innenohr
 - Ortsprinzip
 - Dynamikkompression, Ratenkodierung
 - Zeitliche Kodierung, Phasenkopplung
 - Adaption

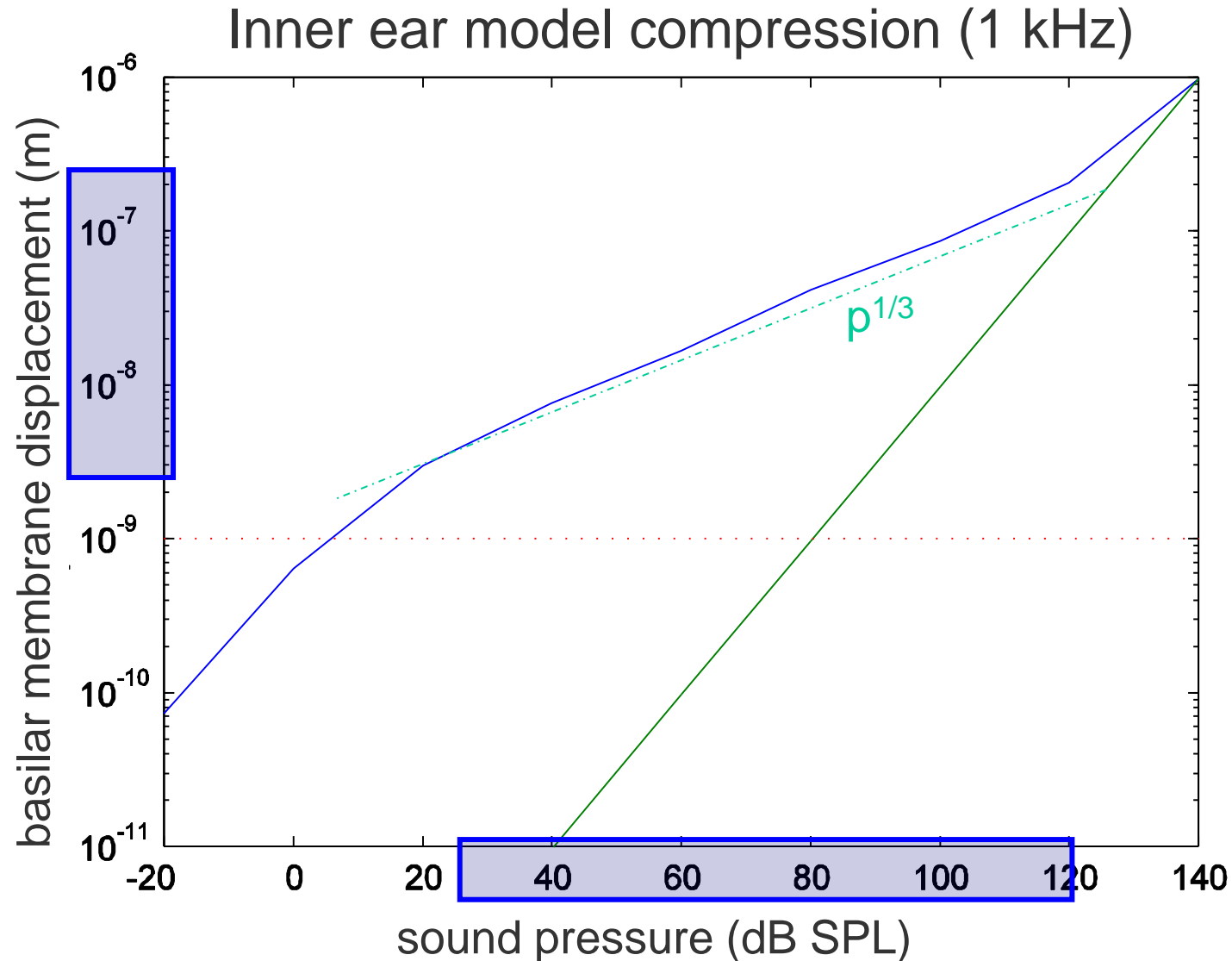
Outer Hair Cells Amplify Traveling Wave



Inner ear model: response to pure tones



Dynamic compression in the cochlea



Systemtheorie der Sinnesorgane

Werner Hemmert

Bioanaloge Informationsverarbeitung

IMETUM

✓ Grundlagen

- ✓ Schallpegel

- ✓ Anatomie

✓ Funktion des Gehörs

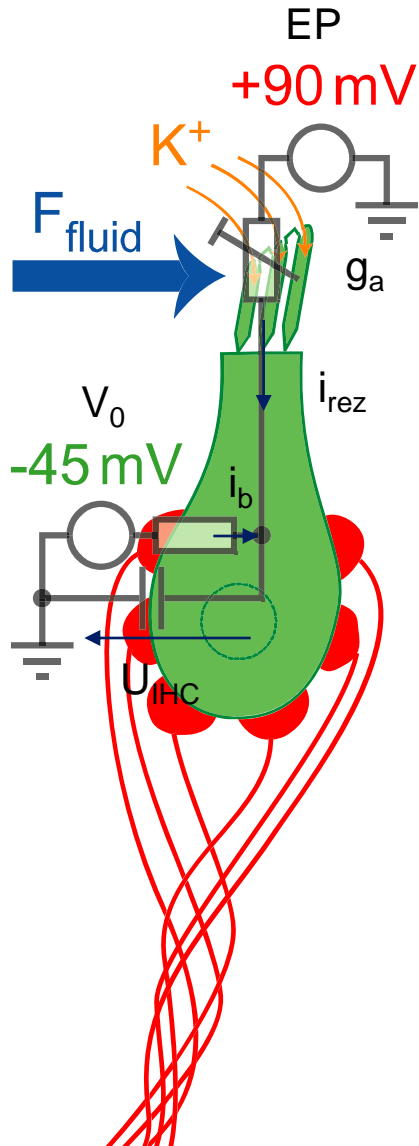
- ✓ Hydrodynamik und Ausbreitung der Wanderwelle

- ✓ Modell der inneren Haarsinneszellen

- ✓ Das aktive Innenohr

• **Kodierung von Schall im auditorischen Nerven**

Sensory Cell: Electrical Response



$$g_a(t) = \frac{G_{\max}}{\left[1 + \exp\left(\frac{x_0 - x_{ST}(t)}{S_{x0}}\right)\right] \cdot \left[1 + \exp\left(\frac{x_1 - x_{ST}(t)}{S_{x1}}\right)\right]}$$

$$i_{rez}(t) = (EP - u_{IHC}(t)) \cdot g_a(t)$$

$$i_b(t) = (V_0 - u_{IHC}(t)) \cdot G_b$$

$$\frac{d(u_{IHC}(t))}{dt} = \frac{i_{rez}(t) + i_b(t)}{C}$$

$$x_0 = 7 \text{ nm} \quad S_{x0} = 85 \text{ nm}$$

$$x_1 = 7 \text{ nm} \quad S_{x1} = 5 \text{ nm}$$

$$G_{\max} = 8 \text{ nS}$$

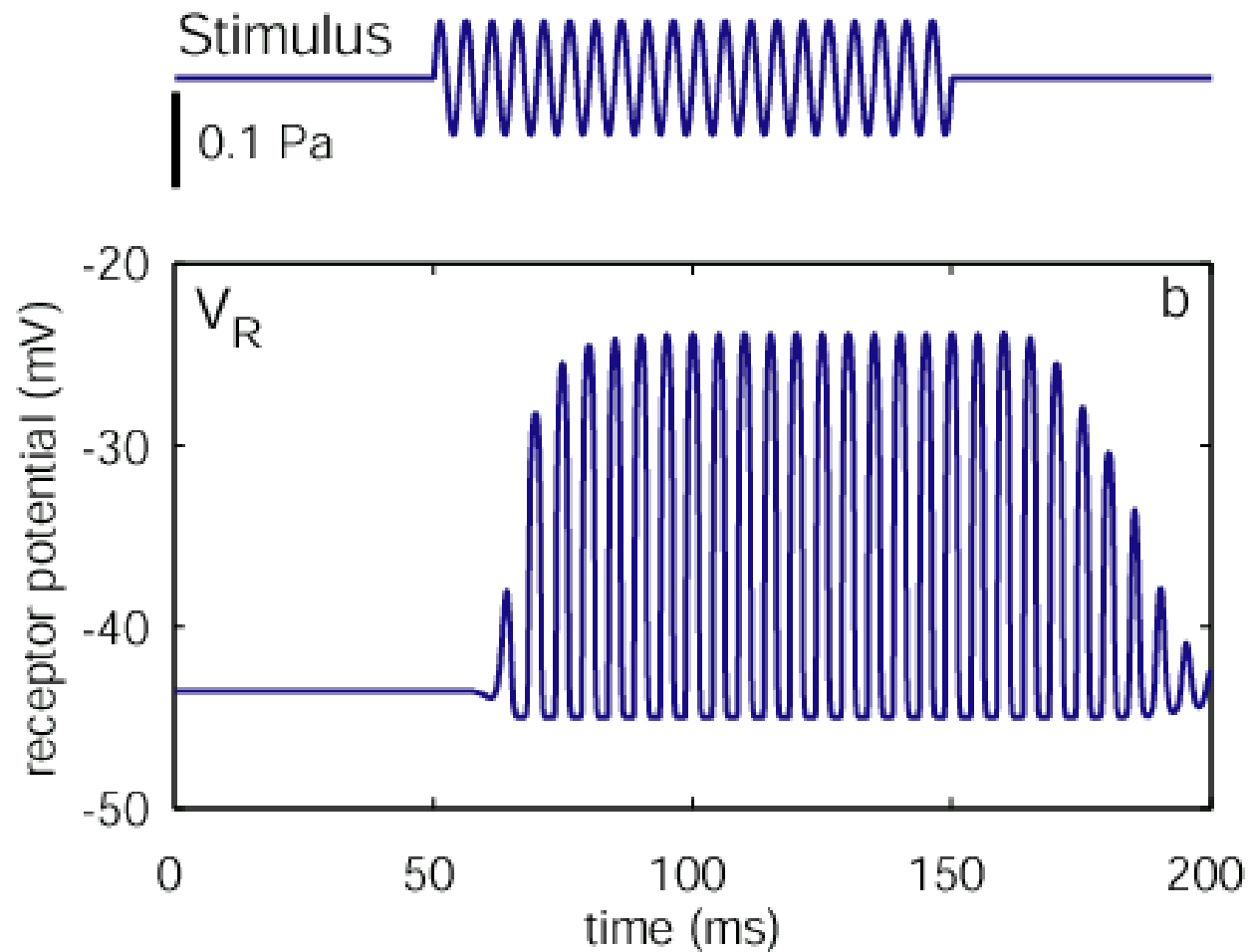
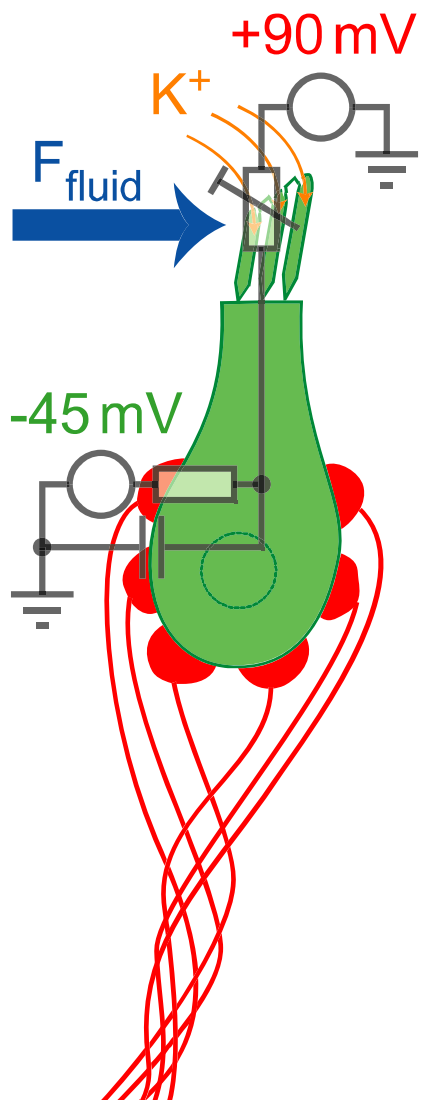
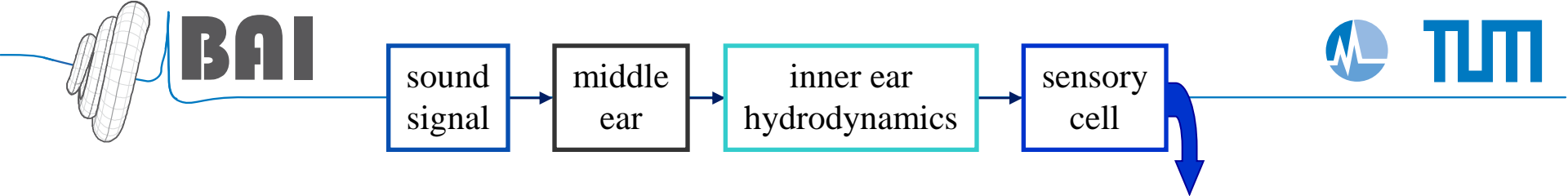
$$EP = +90 \text{ mV}$$

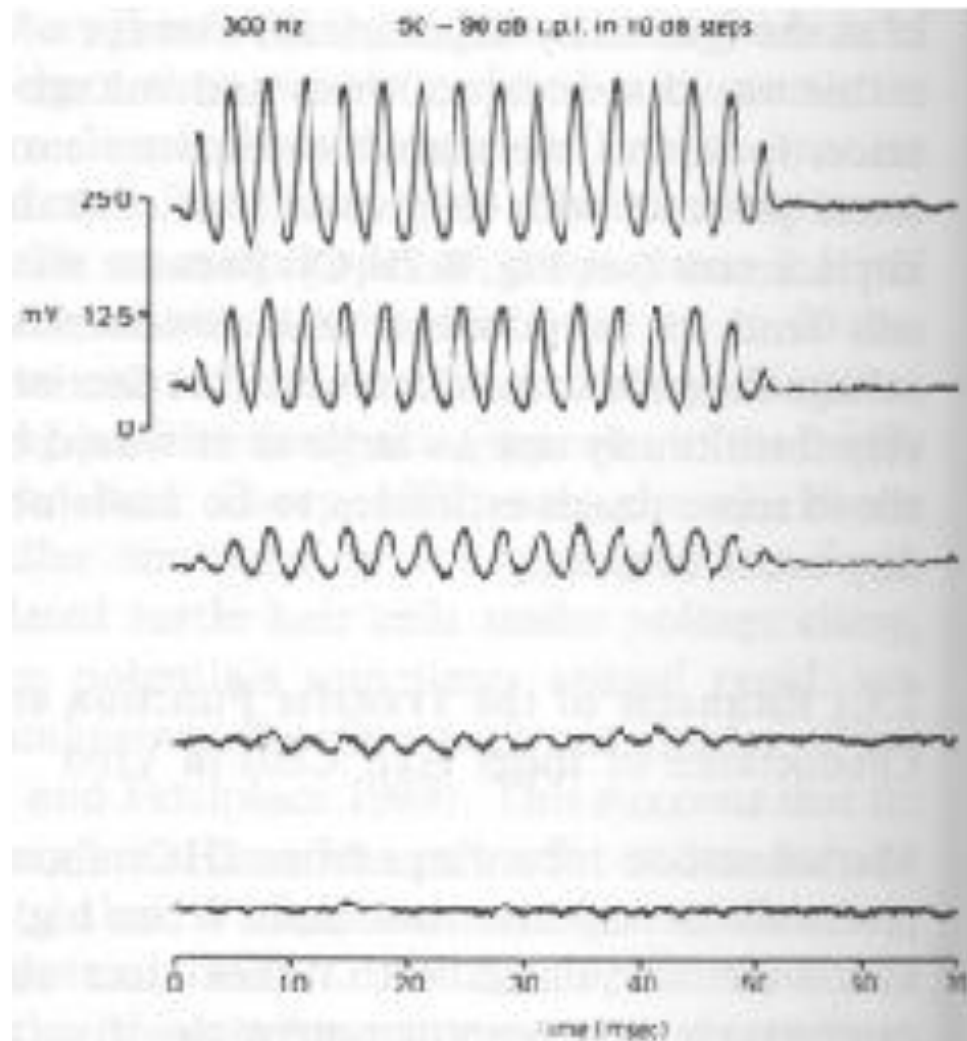
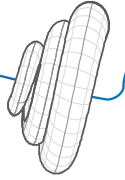
$$V_0 = -45 \text{ mV}$$

$$C = 12 \text{ pF}$$

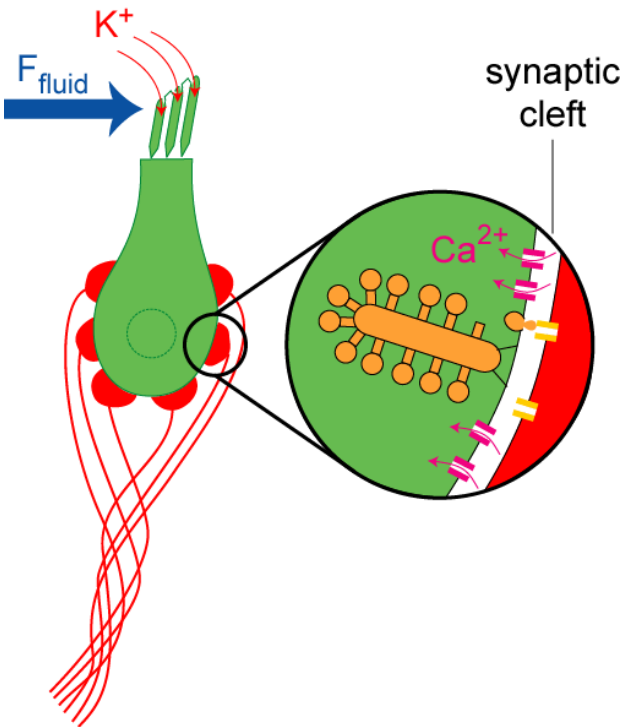
$$G_b = 60 \text{ nS}$$

$$\Rightarrow \tau_M = 0.2 \text{ ms}$$





Sensory Cell: Synaptic Mechanisms



Calcium channel:

$$I_{Ca}(t) = G_{Ca}^{\max} m_{I_{Ca}}^3(t) (u_{IHC}(t) - E_{Ca})$$

$$m_{I_{Ca}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\beta_{Ca}} \exp(\gamma_{Ca} \cdot u_{IHC})}$$

Accumulated calcium:

$$\tau_{[Ca]} \frac{d[Ca^{2+}](t)}{dt} + [Ca^{2+}](t) = I_{Ca}(t)$$

$$G_{Ca}^{\max} = 8 \text{ nS} \quad (\text{HSR})$$

$$E_{Ca} = +66 \text{ mV}$$

$$\beta_{Ca} = 400$$

$$\gamma_{Ca} = -130 \text{ /V}$$

$$\tau_{[Ca]} = 0.1 \text{ ms}$$

$$[Ca^{2+}]_{thres}^3 = 0$$

$$z = 2 \cdot 10^{32} \text{ s}^{-1}$$

Release rate (unit: 1/s)

$$r_{release}(t) = \max \left[z \cdot ([Ca^{2+}]^3(t) - [Ca^{2+}]_{thres}^3), 0 \right]$$

Synaptic Mechanisms: Vesicle Dynamics

Vesicle pool equations

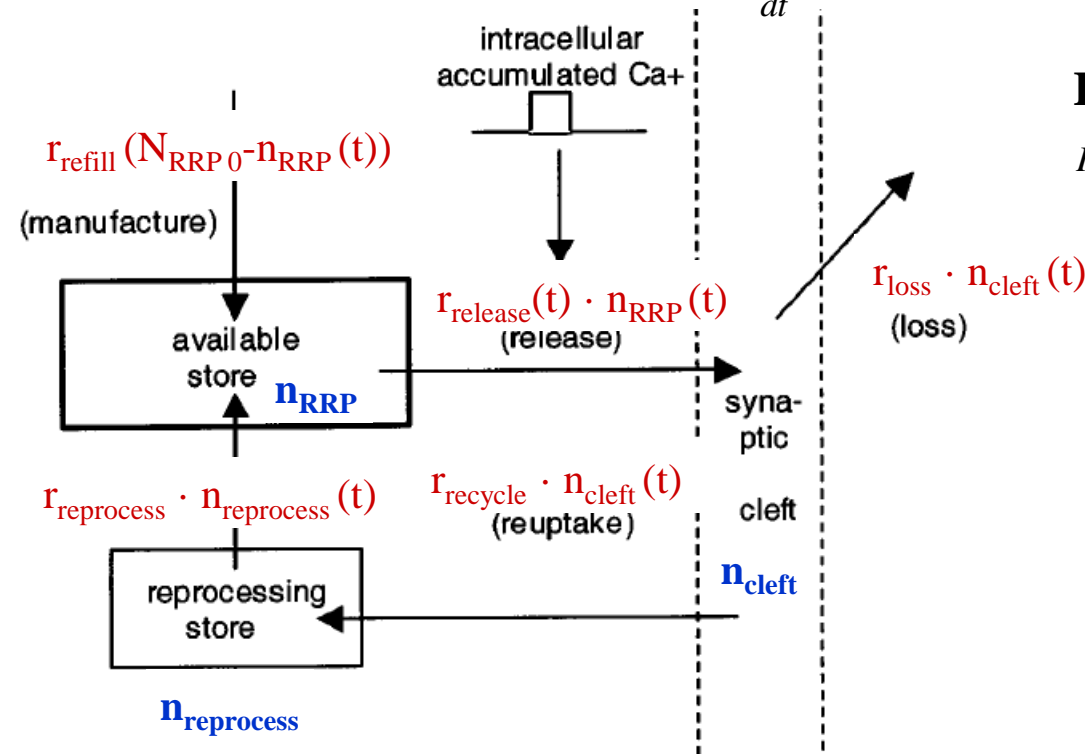
$$\frac{d}{dt} n_{RRP}(t) = r_{reprocess} \cdot n_{reprocess}(t) + r_{refill} (N_{RRP0} - n_{RRP}(t)) - R(t)$$

$$\frac{d}{dt} n_{cleft}(t) = R(t) - (r_{loss} + r_{recycle}) \cdot n_{cleft}(t)$$

$$\frac{d}{dt} n_{reprocess}(t) = r_{recycle} \cdot n_{cleft}(t) - r_{reprocess} \cdot n_{reprocess}(t)$$

Released vesicles (continuous release):

$$R(t) = r_{release}(t) \cdot n_{RRP}(t)$$



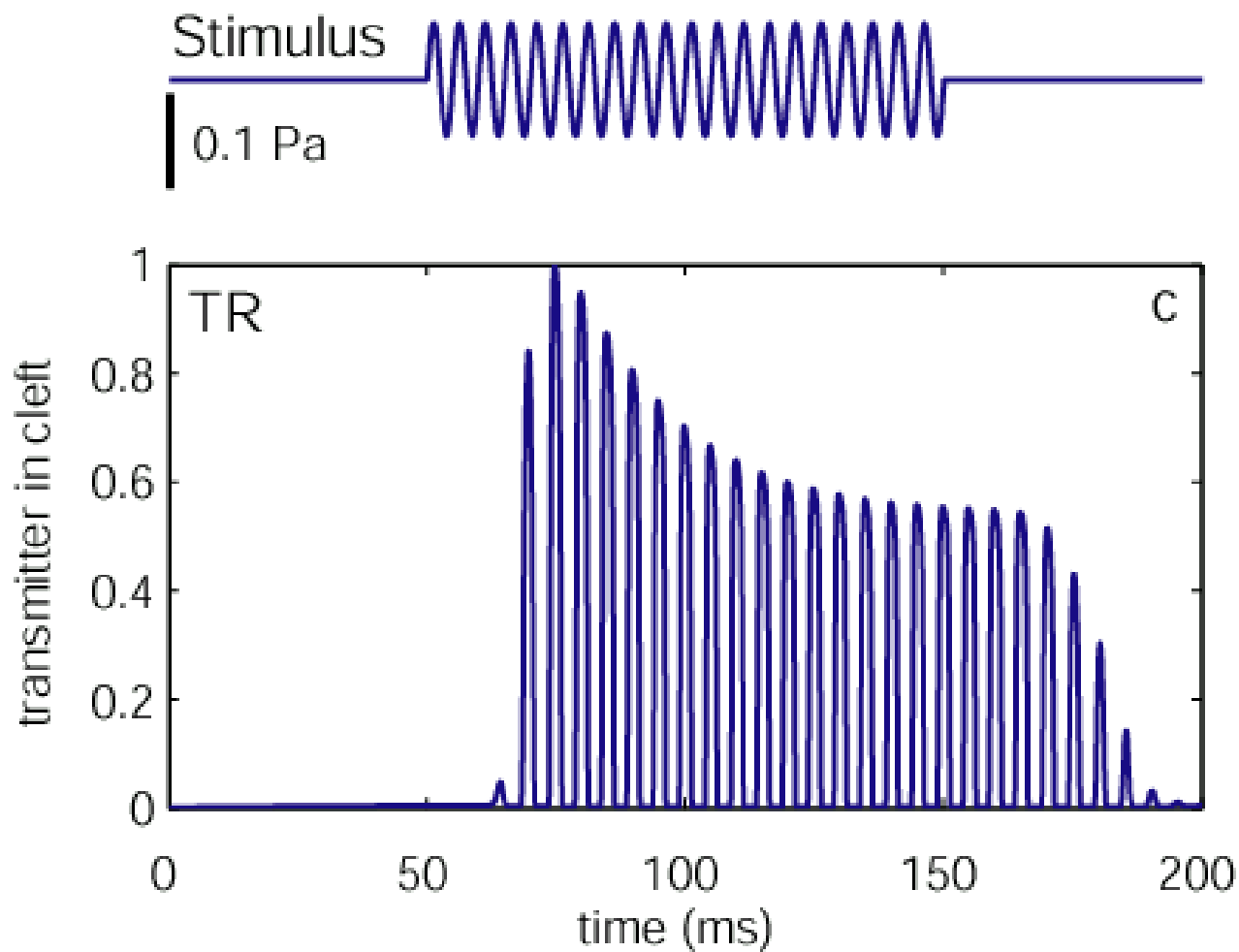
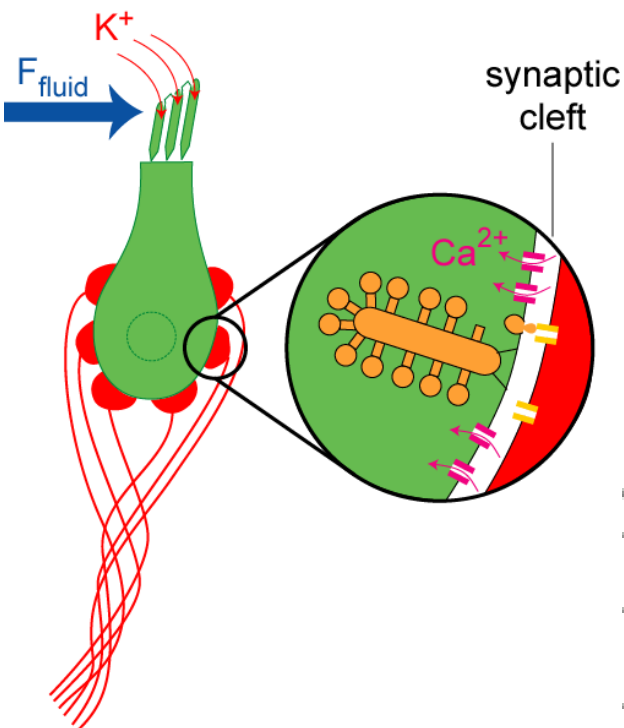
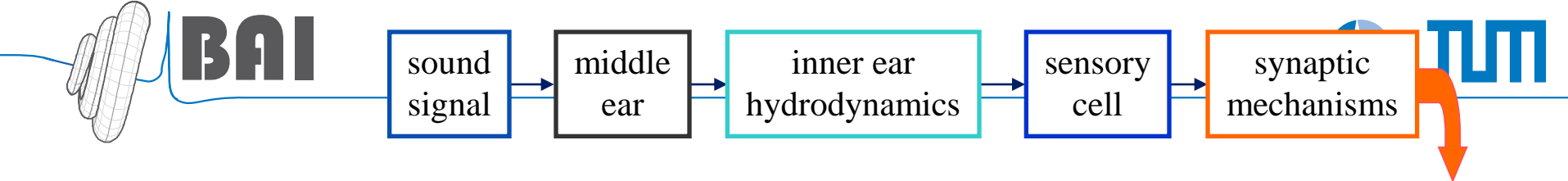
$$N_{RRP0} = 10 \text{ vesicles (HSR)}$$

$$r_{refill} = 10 \text{ s}^{-1}$$

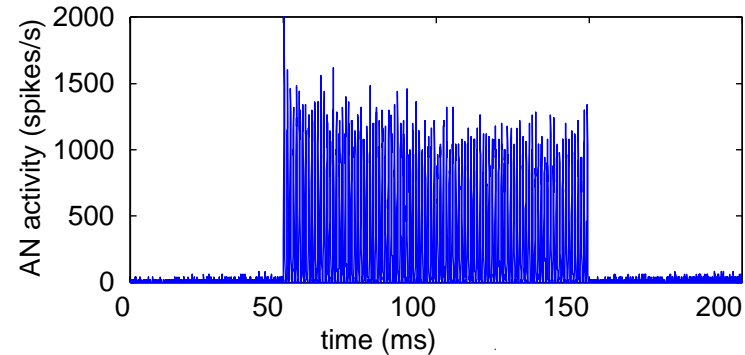
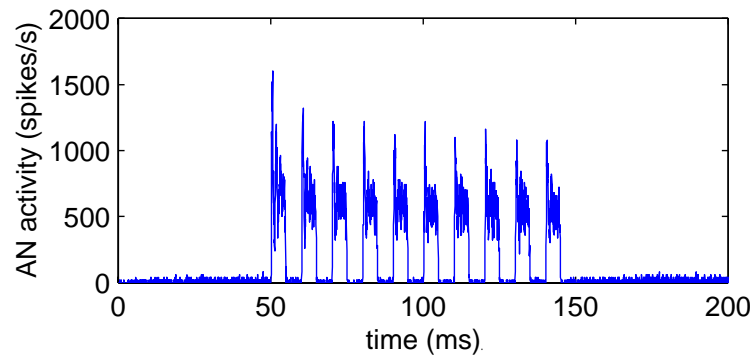
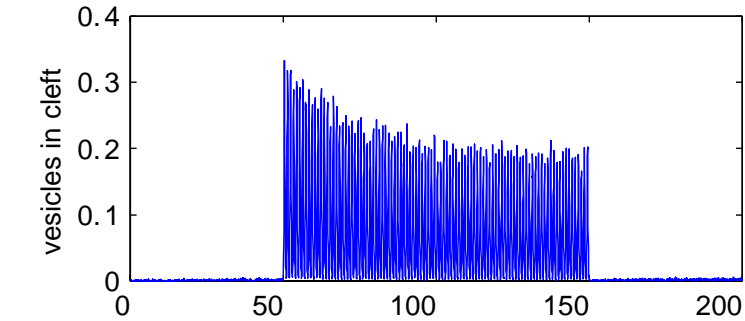
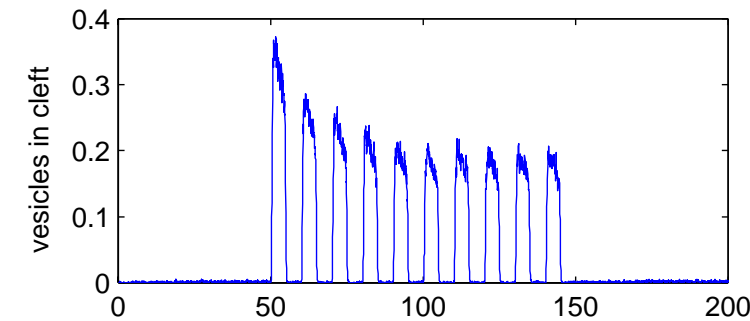
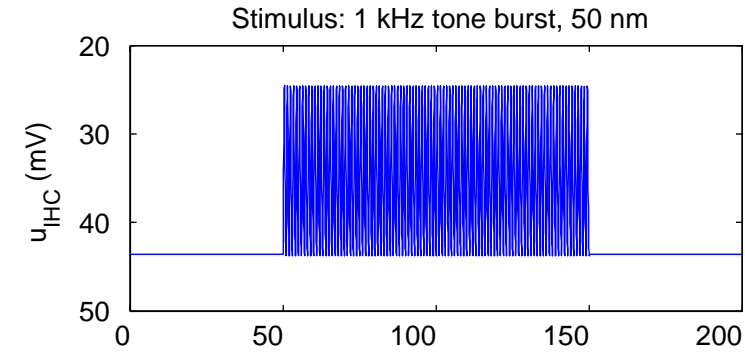
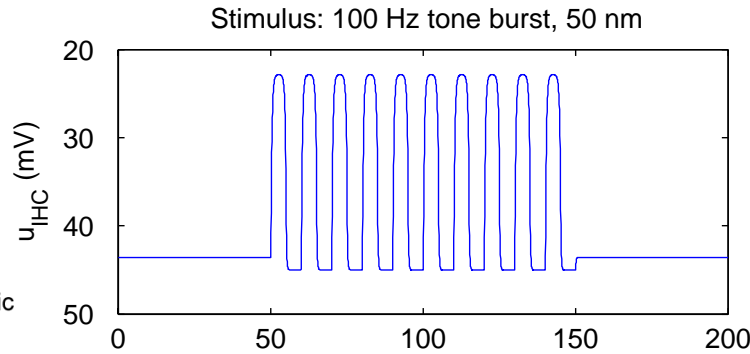
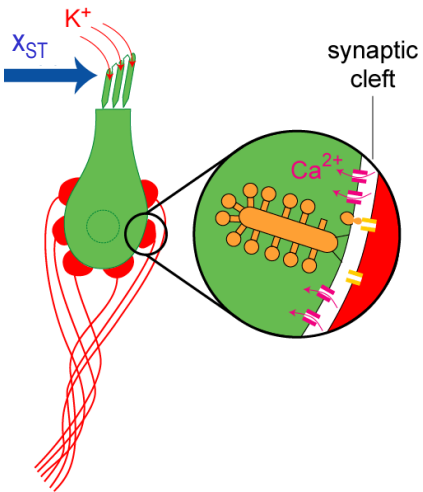
$$r_{reprocess} = 66.3 \text{ s}^{-1}$$

$$r_{recycle} = 6580 \text{ s}^{-1}$$

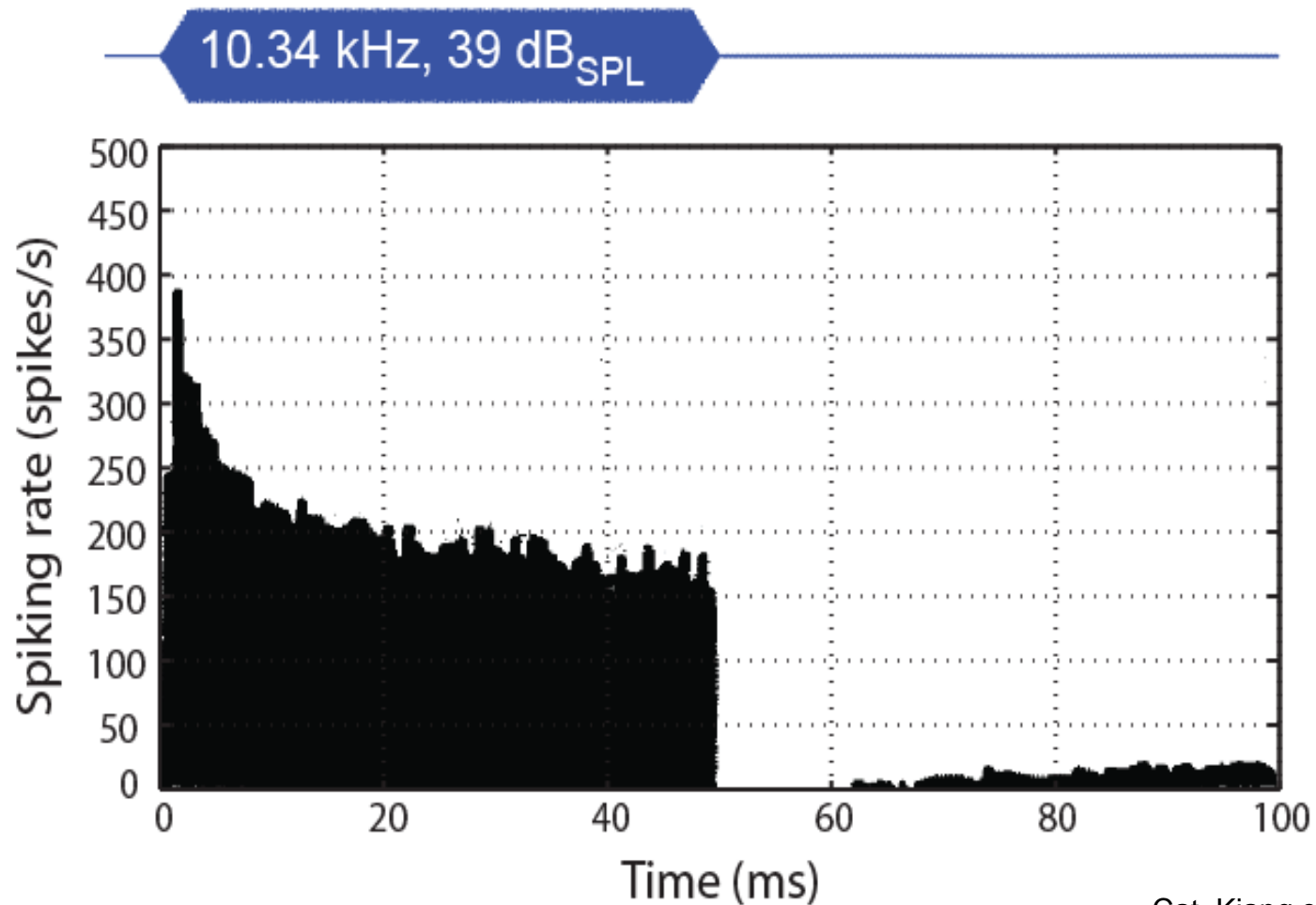
$$r_{loss} = 2580 \text{ s}^{-1}$$



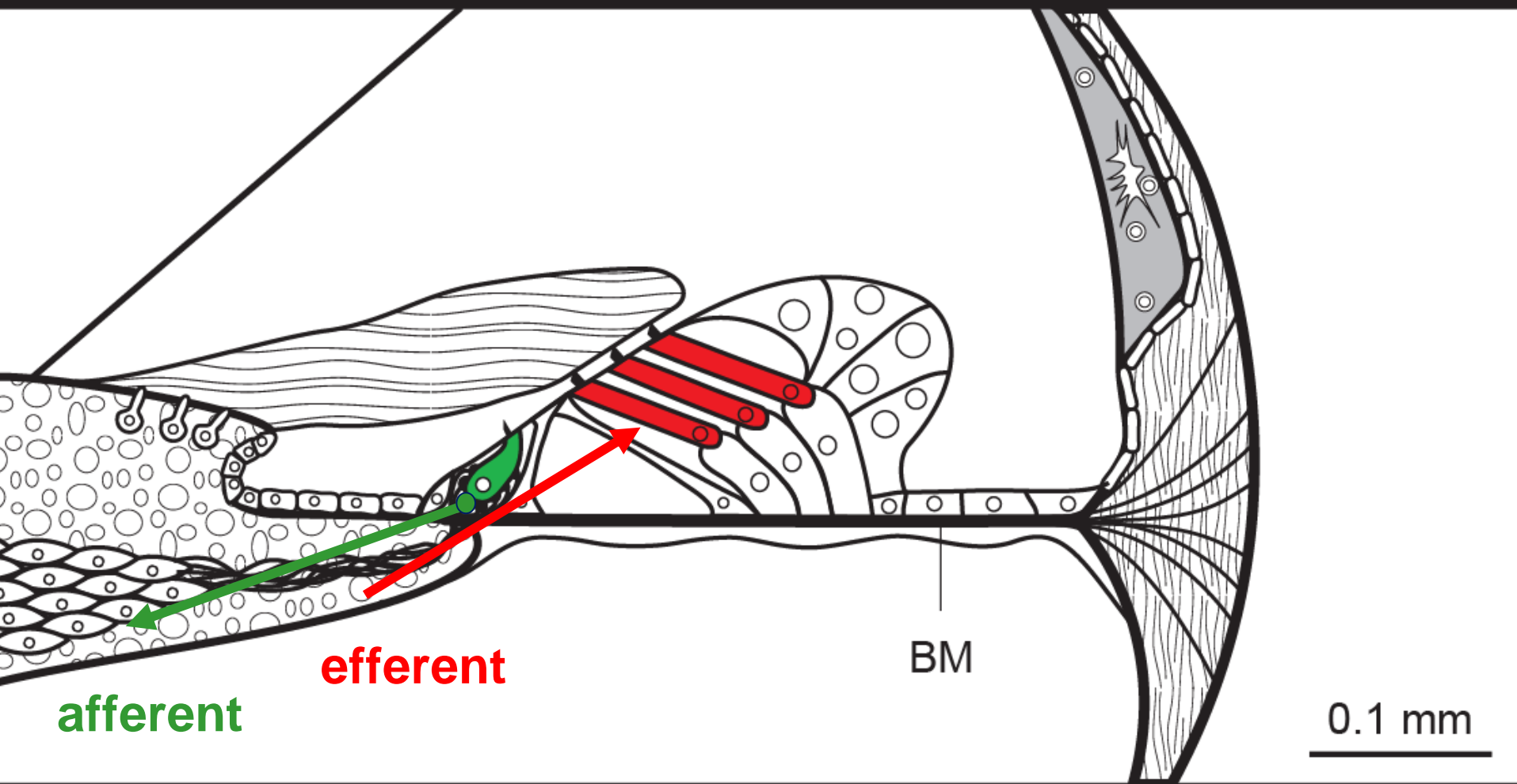
Sensory Cell: Input-Output properties

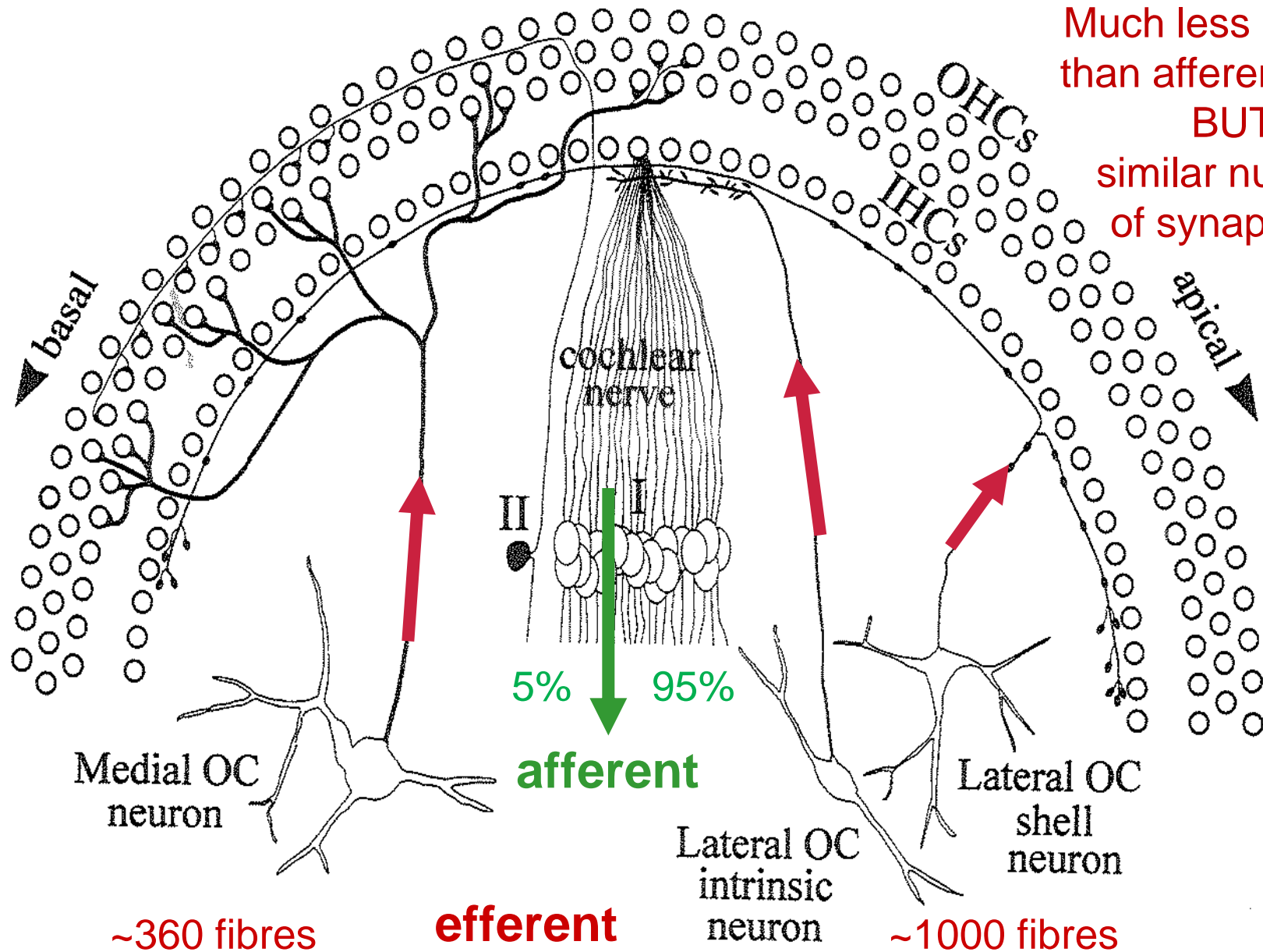
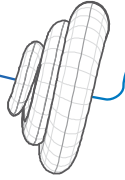


Synaptic adaptation

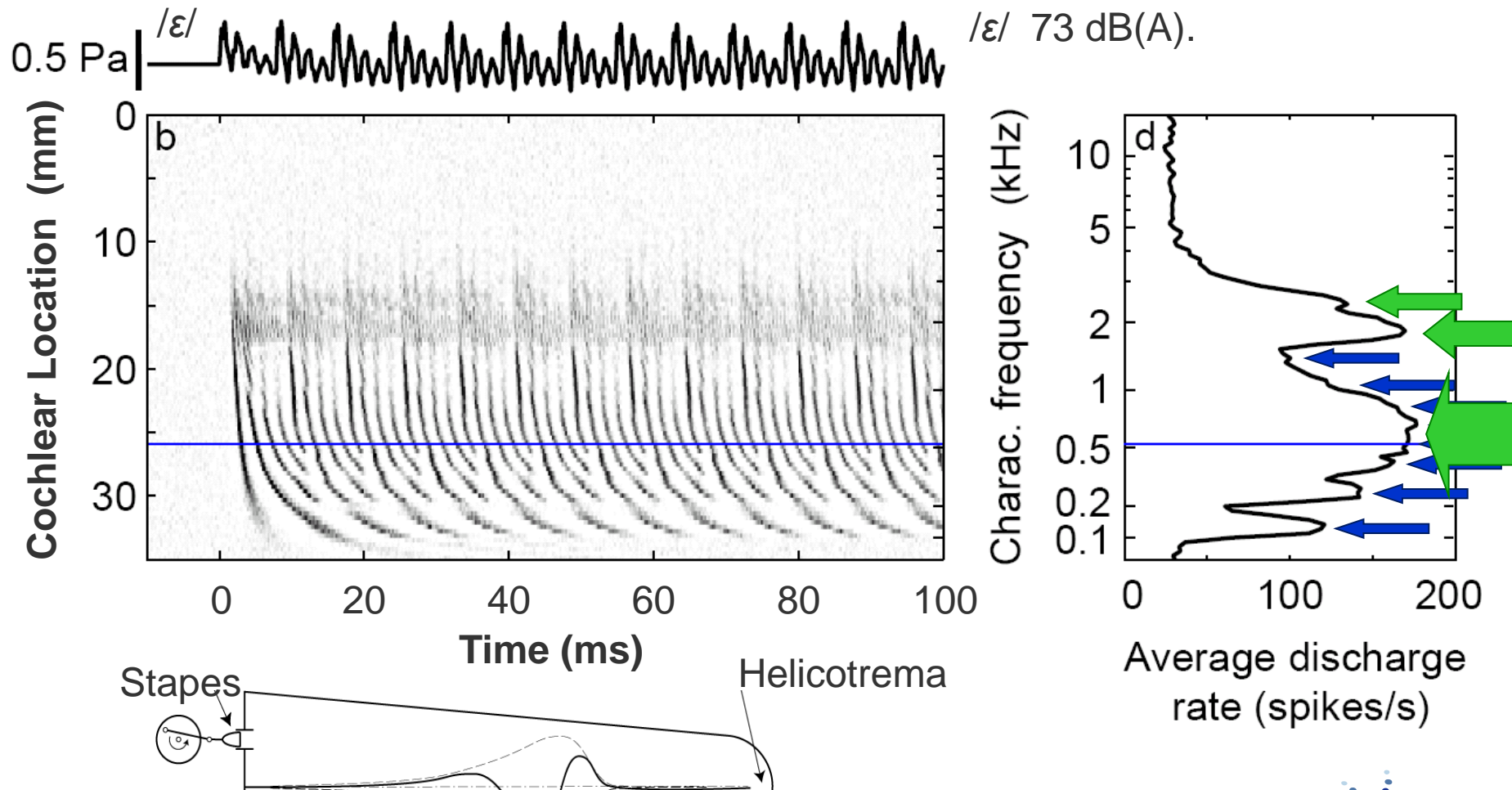


Innervation of Receptor Cells





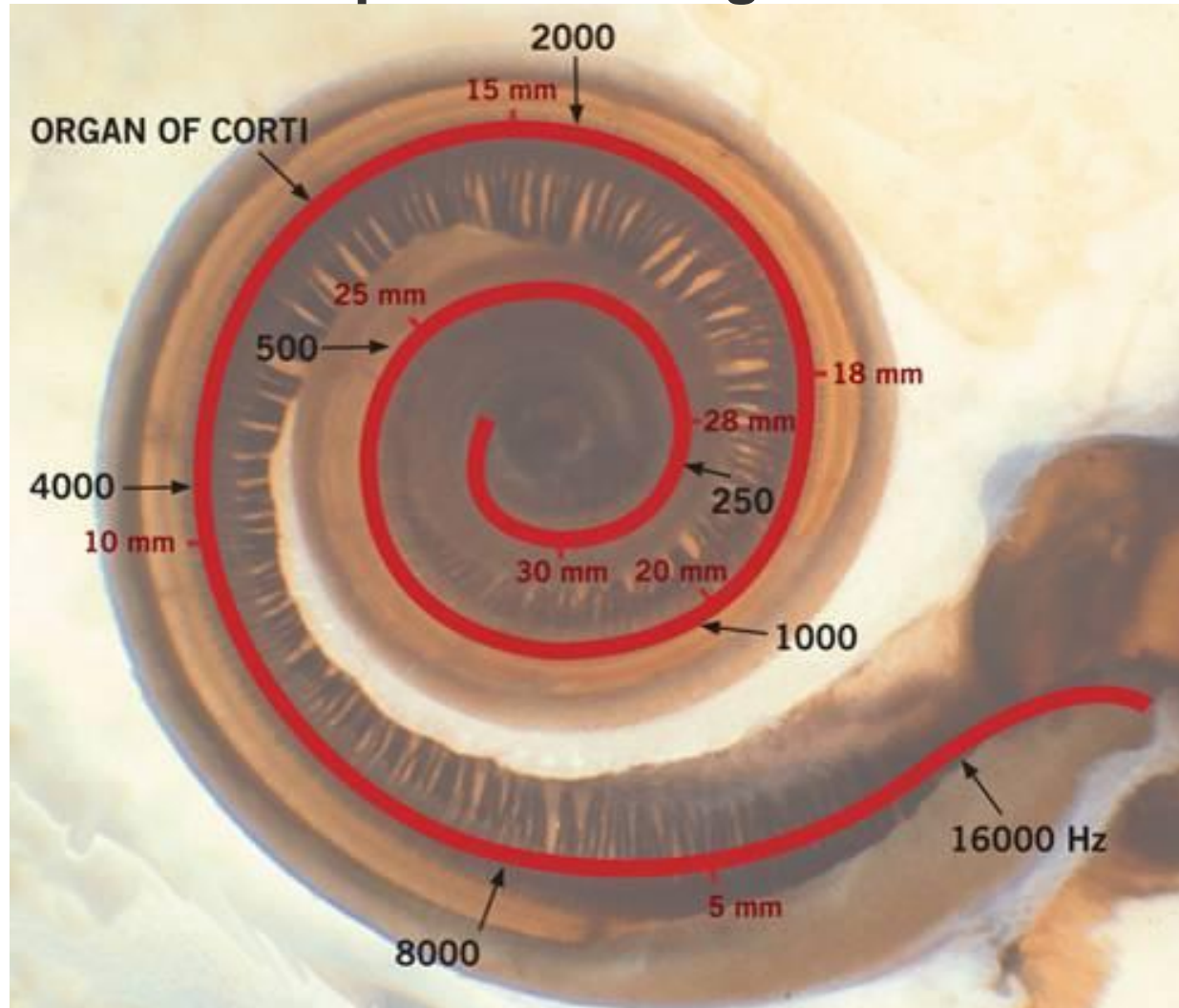
Coding of information in the auditory nerve



Rate-Place Theory of Hearing

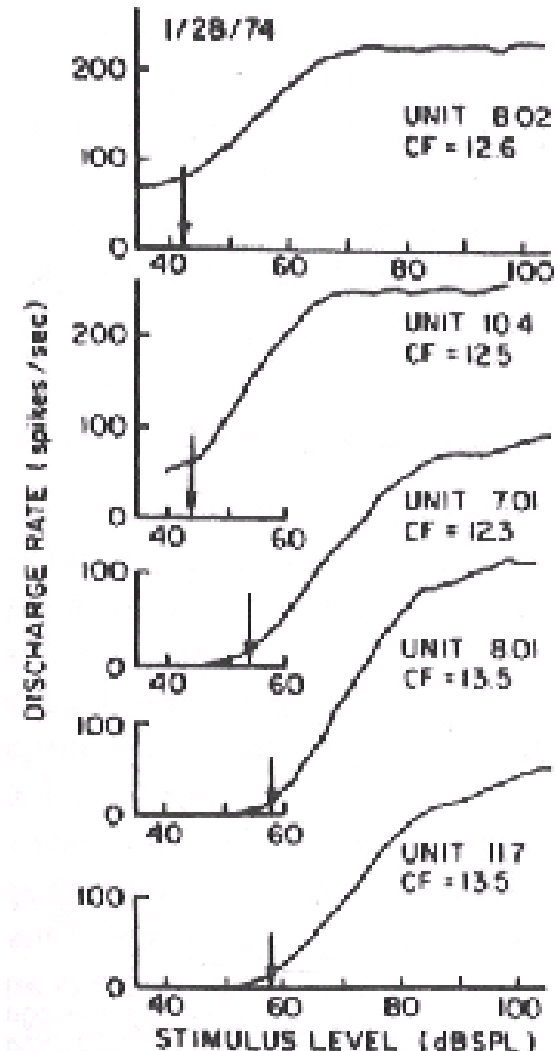
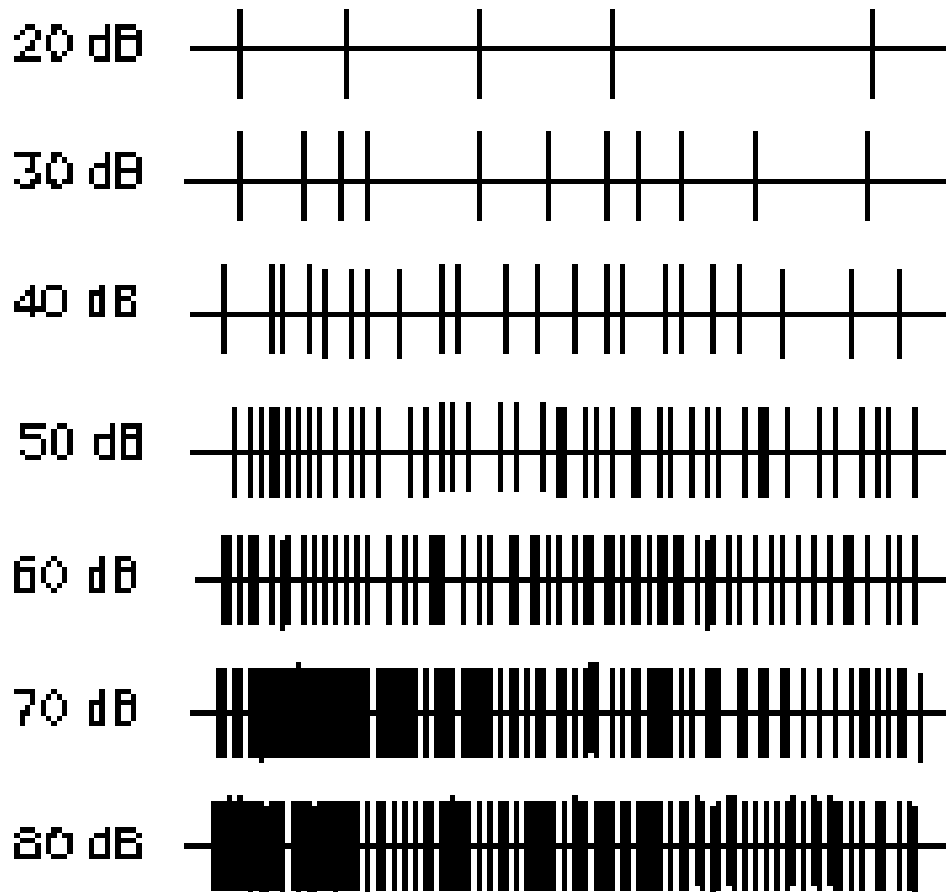
Coding of information in the auditory nerve

1. The Place Principle of Hearing - a labeled-line code



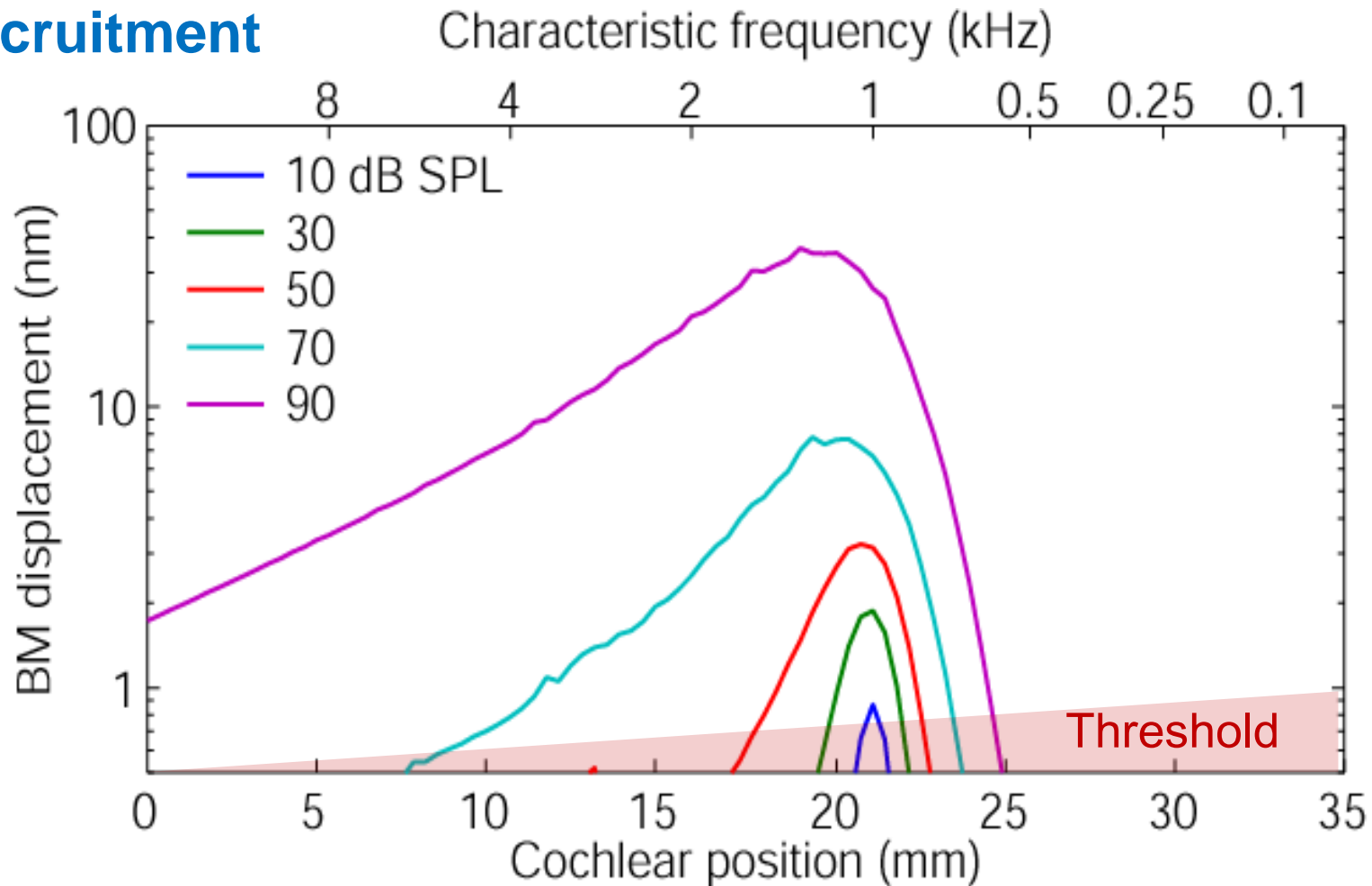
Coding of information in the auditory nerve

1. The Place Principle of Hearing - a labeled-line code
2. Rate Code



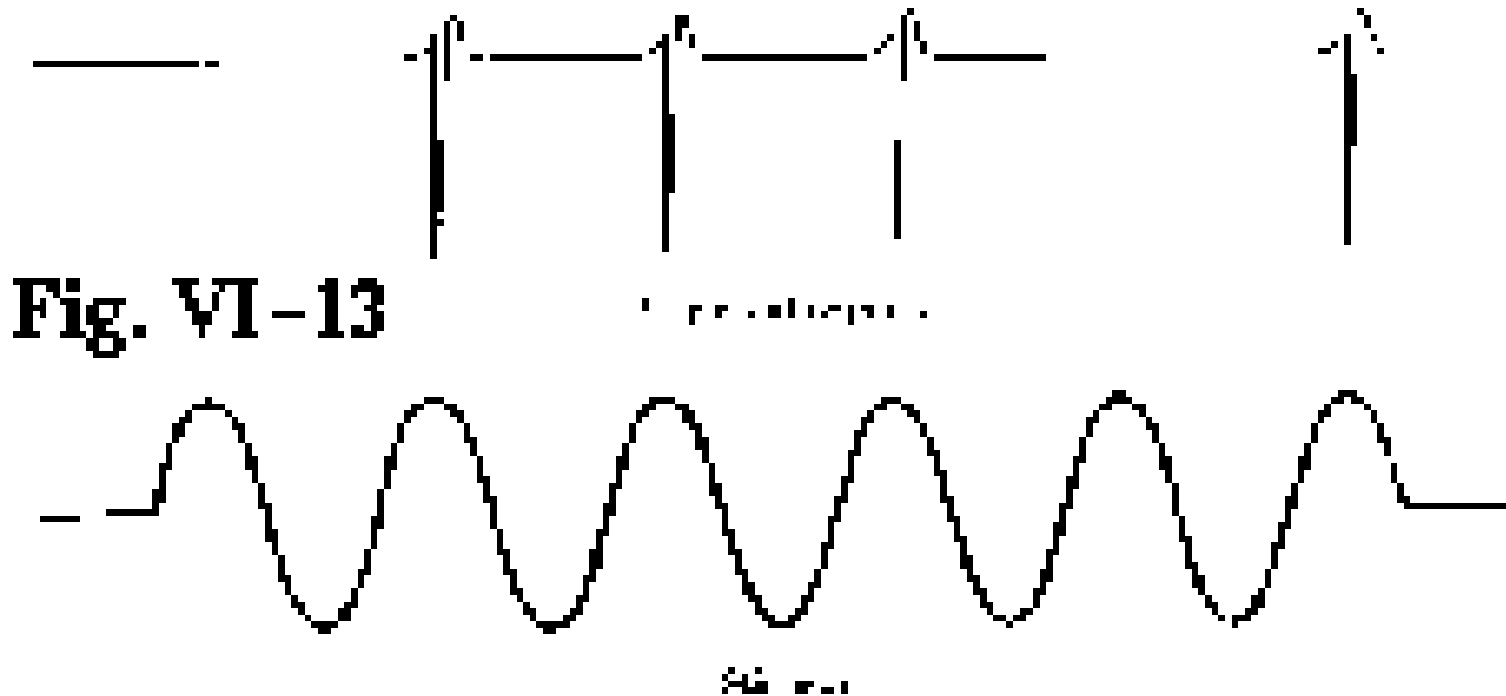
Coding of information in the auditory nerve

1. The Place Principle of Hearing - a labeled-line code
 2. Rate Code
- + Recruitment



Coding of information in the auditory nerve

1. The Place Principle of Hearing - a labeled-line code
2. Rate Code + Recruitment
3. Temporal Coding: **Phase Locking**

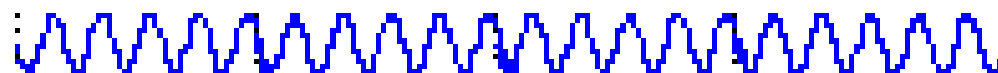
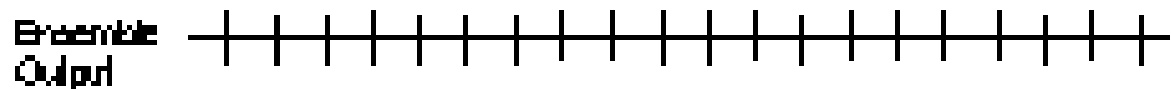
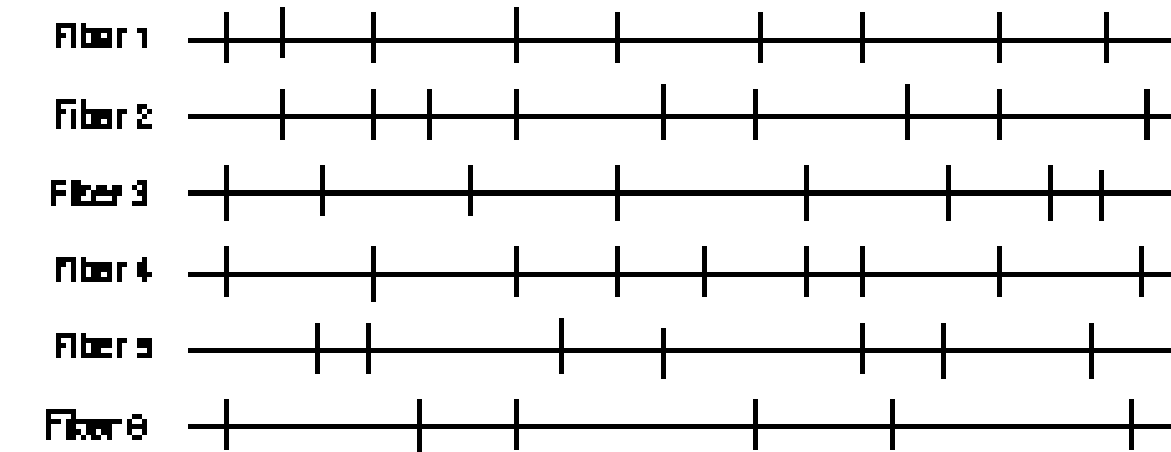


Phase-locking to a low-frequency pure tone.

Coding of information in the auditory nerve

1. The Place Principle of Hearing - a labeled-line code
2. Rate Code + Recruitment
3. Temporal Code
 - a) Phase Locking
 - b) **Volley Principle**

VOLLEY PRINCIPLE
(Low frequency below about 4 kHz)

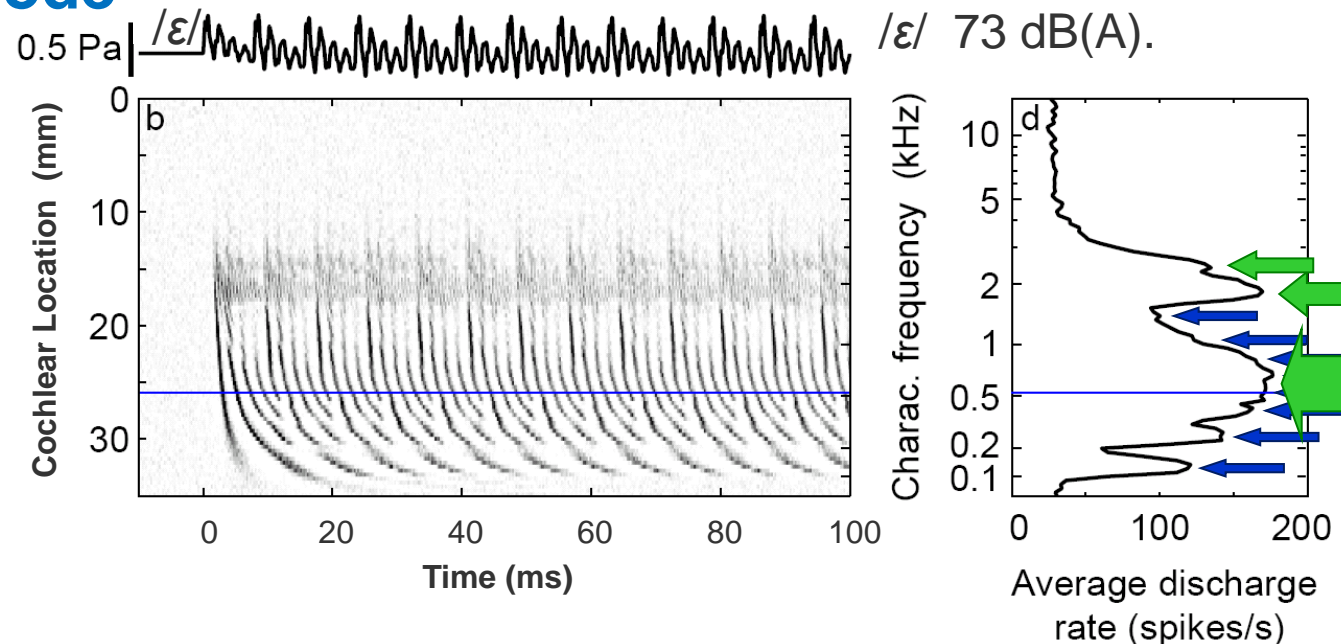


Low frequency stimulus

Coding of information in the auditory nerve

1. The Place Principle of Hearing - a labeled-line code
2. Rate Code + Recruitment
3. Temporal Code
 - a) Phase Locking
 - b) Volley Principle

→ Ensemble Code



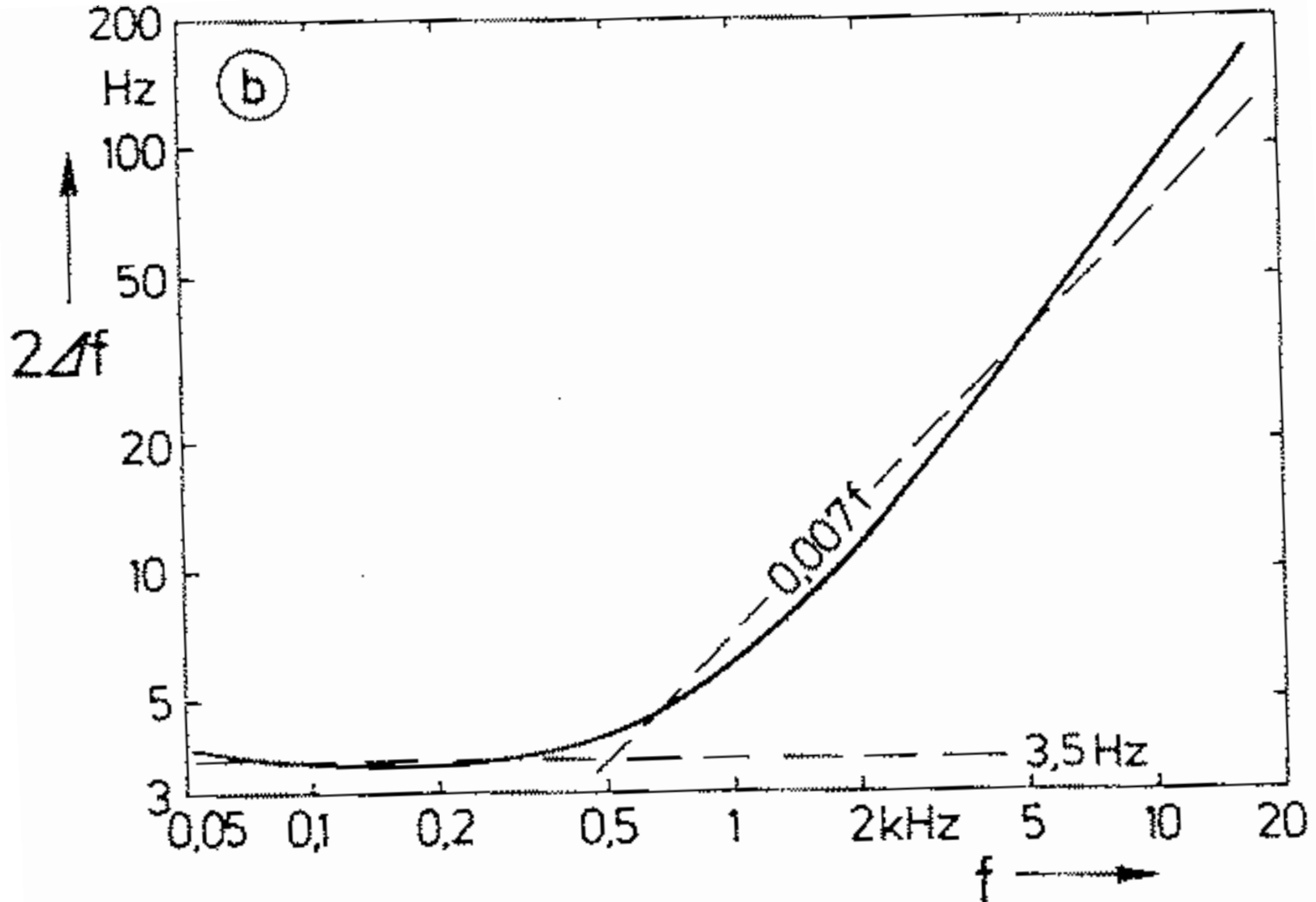
- Empfindlichkeit am physikalischen Limit, riesiger Dynamikbereich >1:1Mio
- Amplitudenauflösung $\Delta L \approx 1 \text{ dB}$ AM-Schwelle Mod_*.wav
- Doppelte Lautheit $\Delta L = 10 \text{ dB}$
- Frequenzauflösung 3,5 Hz oder 0.007 f FM-Demo JNFN.wav

Demonstration zur Lautstärkewahrnehmung bei Recruitment hoerbeispiel5_*.wav

Verzerrungsprodukte



dp hoerbeispiel*.wav



Frequenzstufe $2\Delta f$ als Funktion der Frequenz mit $f_{\text{mod}} = 4 \text{ Hz}$. Näherungen sind gestrichelt eingetragen.

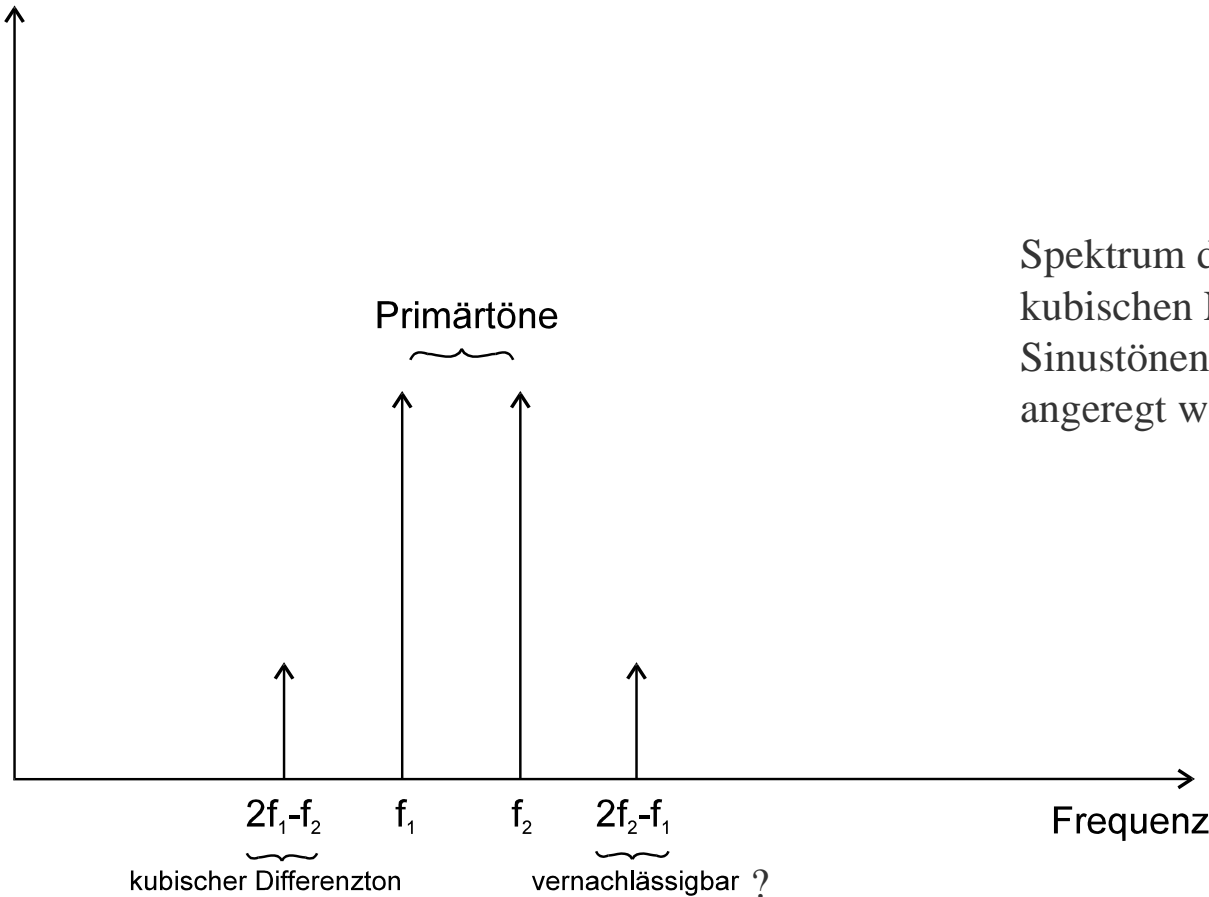


Die Grenzdauern des Gehörs

- 200 ms: Ruhe- und Mithörschwellen, Lautheit
Verkürzung um Faktor 10
muss mit Pegelerhöhung um 10 dB kompensiert werden
(Intensität x Dauer = konstant)
- 20 ms: Abnahme der Auflösung von Schwankungen ($\tau=1/(2\pi f)$)
Modulationsschwellen steigen ab einer Grenzfrequenz von 8 Hz
etwa mit der Wurzel aus der Modulationsfrequenz an
- 2 ms: Zeitliche Verdeckung: Grenze bis zu der das Gehör die
zeitliche Struktur eines Schalls überhaupt auszuwerten vermag.
Da unser Gehör bei tiefen Frequenzen mit Filterbandbreiten
unter 500 Hz arbeitet (d.h. Einschwingzeit > 2 ms), kann diese
Grenzdauer nur im höheren Frequenzbereich ausgenutzt werden.
- ~20 μ s: zeitliche Auflösungsgrenze bei binauraler Verarbeitung

DEMO: Distortion products

$$\left(\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t \right)^3 = \dots \underbrace{2 \sin^2 \omega_1 t \cdot \sin \omega_2 t}_{2 f_1 - f_2} + \underbrace{2 \sin \omega_1 t \cdot \sin^2 \omega_2 t}_{2 f_2 - f_1} +$$

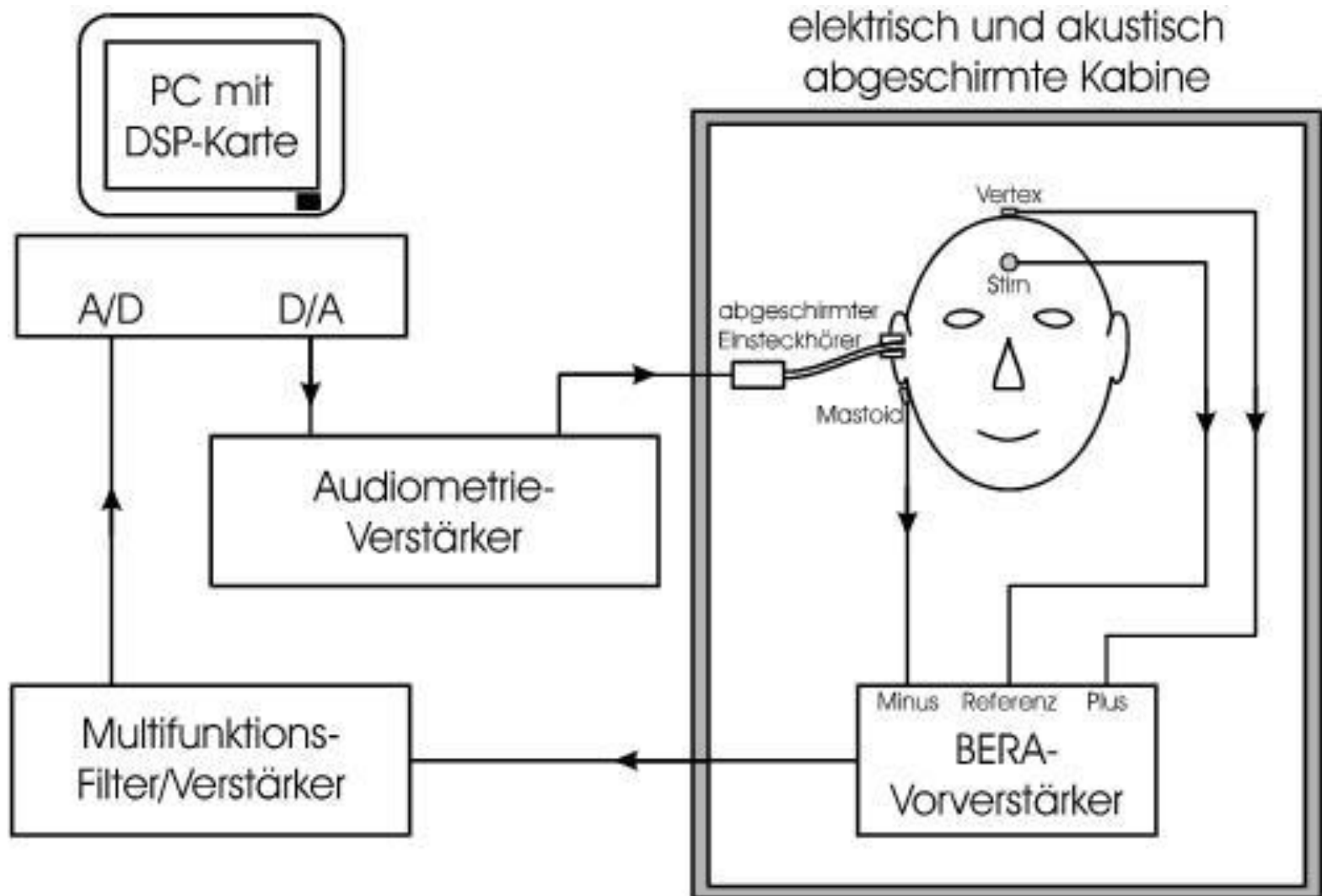


Spektrum des Ausgangssignals bei einer kubischen Nichtlinearität, die mit zwei Sinustönen bei den Frequenzen f_1 und f_2 angeregt wird.

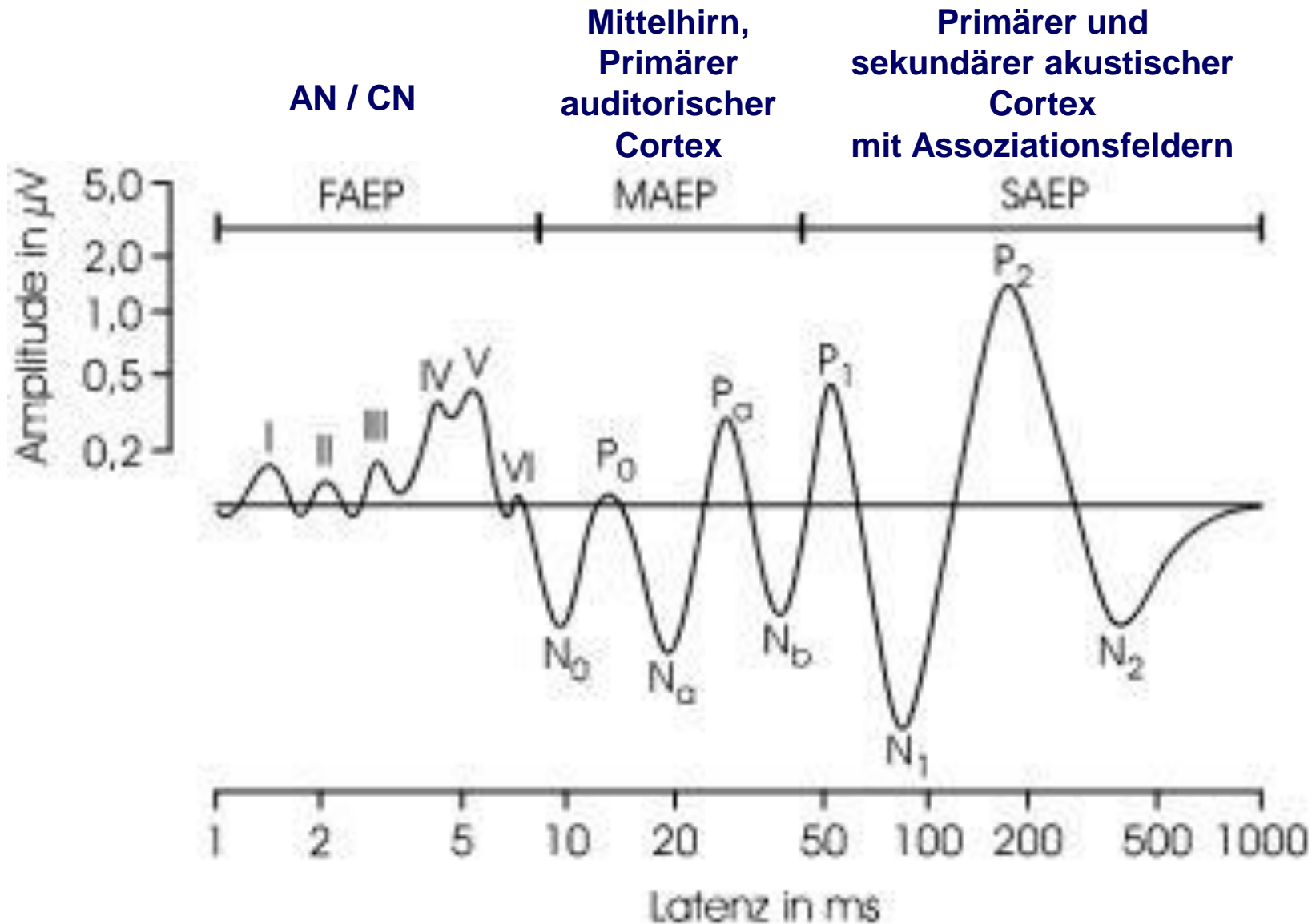
Neugeborenen Hörscreening mit OAE



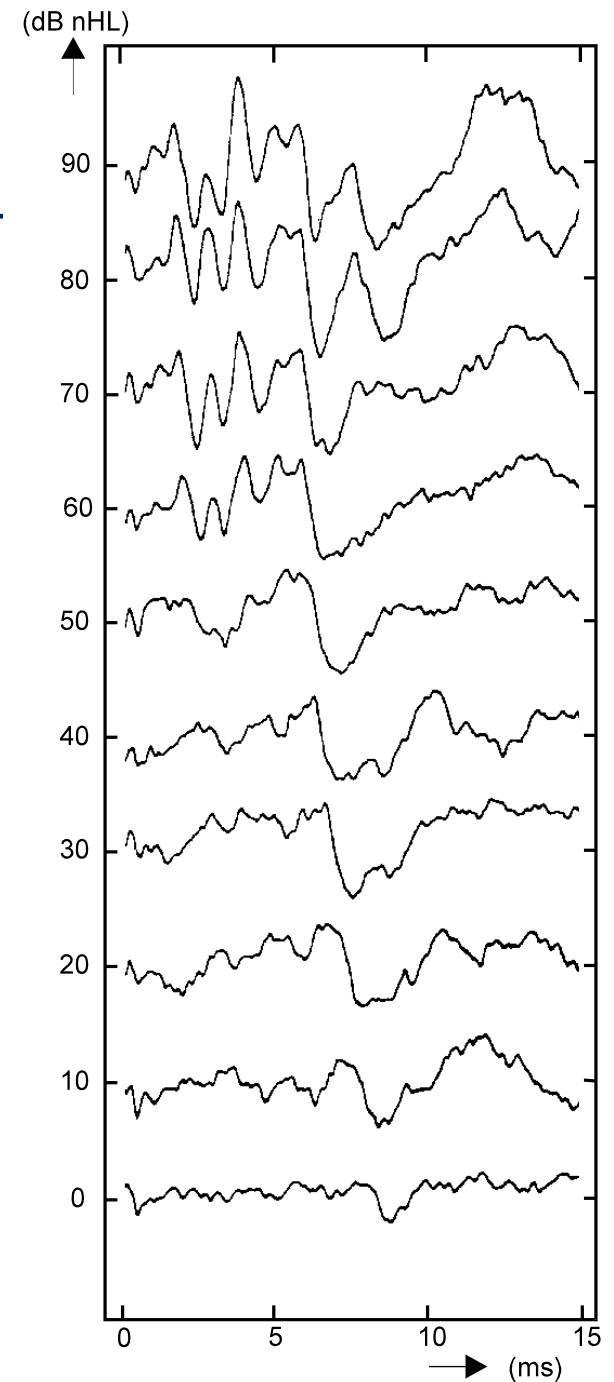
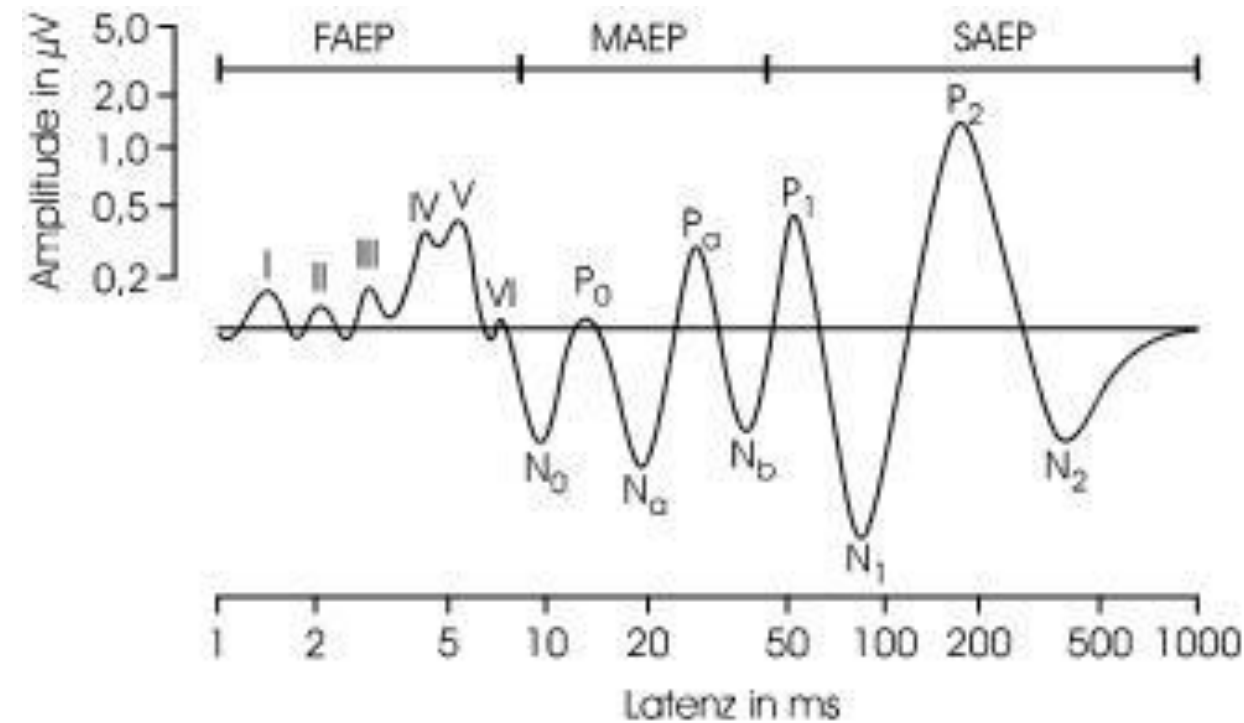
Elektrische Reaktionsaudiometrie (ERA)



Elektrische Reaktionsaudiometrie (ERA)



Elektrische Reaktionsaudiometrie (ERA)



Elektrische Reaktionsaudiometrie (ERA)

