

Kommunikationssysteme

Wesentliche Kommunikationssysteme des Körpers:

- chemisches System: Informationsfluss ausschließlich durch Mediator-moleküle (Hormone) vermittelt
- System mit festen Bahnen: Nervensystem

Arbeitsteilung: Animales (somatisches) Nervensystem nimmt Umweltreize auf, verarbeitet sie, steuert bewusste Handlungen und erzeugt Vorstellungen.

Autonomes (vegetatives) Nervensystem ist für Körperfunktionen zuständig, kann nicht willentlich beeinflusst werden.

ZNS: Gehirn & Rückenmark (=> “cerebrospinales Nervensystem”)

PNS: alle animalischen & vegetativen Nerven (incl. Nervenansammlungen -> Ganglien)

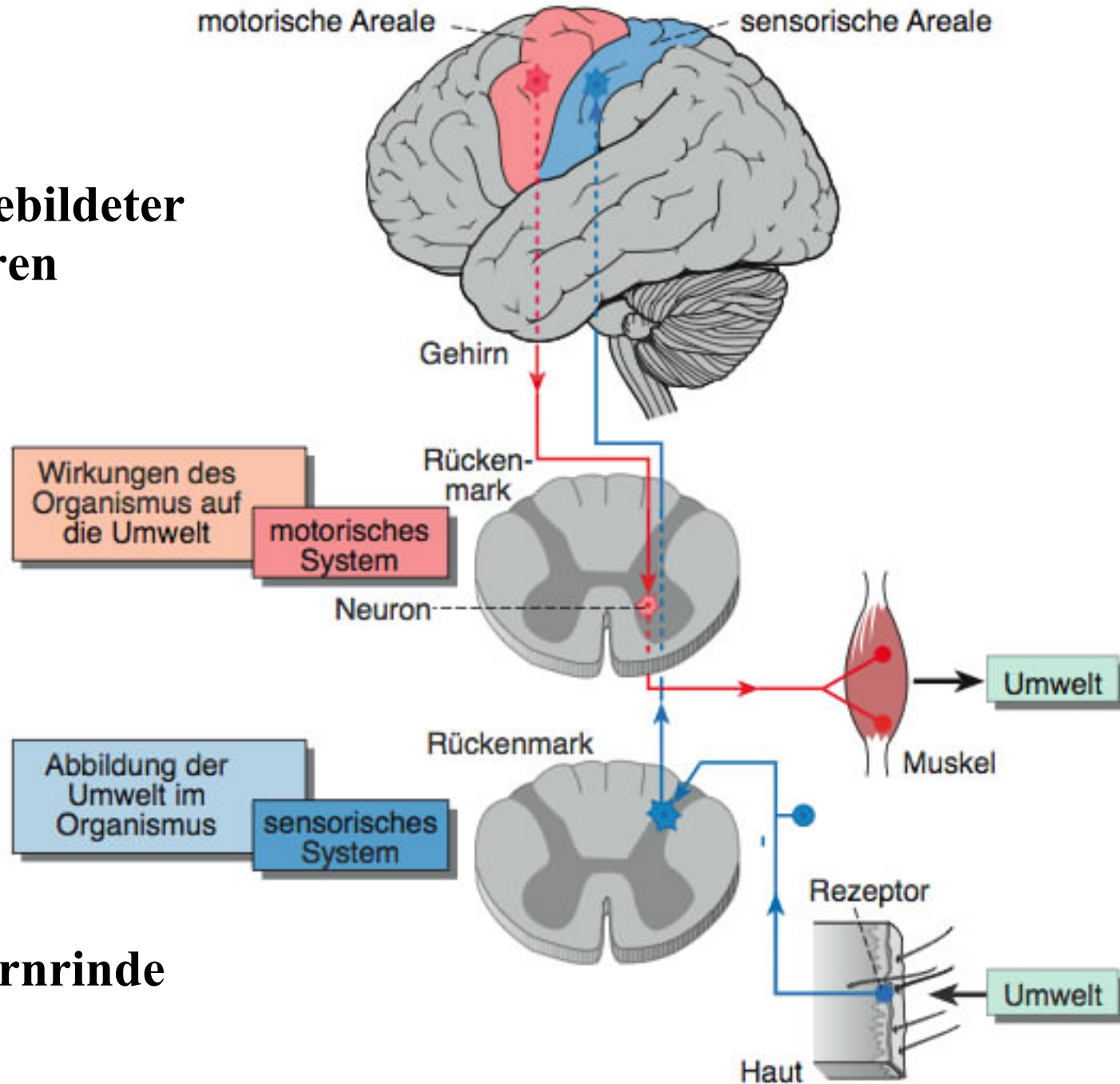
Sensorisches System

Sensorisches System:
Beginn an speziell ausgebildeter
Struktur einer peripheren
Nervenzelle

Rezeptoren:
Umweltsensoren

Weiterleitung:
elektrische Signale
über Nervenfasern
in das ZNS

⇒ Projektion in die Hirnrinde



Information

Information: $I_i := -\log_2[p(x_i)]$

$p(x_i)$ = **Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Nachricht**
(z.B. des Symbols x_i einer Nachrichtenquelle)

=> **Nachricht mit $p = 1/2$ besitzt Informationsgehalt $I = 1$ bit**

Jetzt: Nachrichtenquelle mit einem Symbolvorrat von N Zeichen

Mittlerer Informationsgehalt = Erwartungswert über die individuellen Informationsgehalte aller Symbole:

$$H(x) = E \{I_i\} = - \sum_{i=1}^N p(x_i) \log_2[p(x_i)] \quad \text{“Entropie”}$$

Gleichwahrscheinliche Zeichen => Entropie am Größten

$$H_{\max} = \log_2[N] \quad \text{“Entscheidungsgehalt”}$$

Entropie

Symbole i.A. nicht unabhängig => lange Symbolfolgen betrachten:

$$H(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} E \{ I_n \}$$

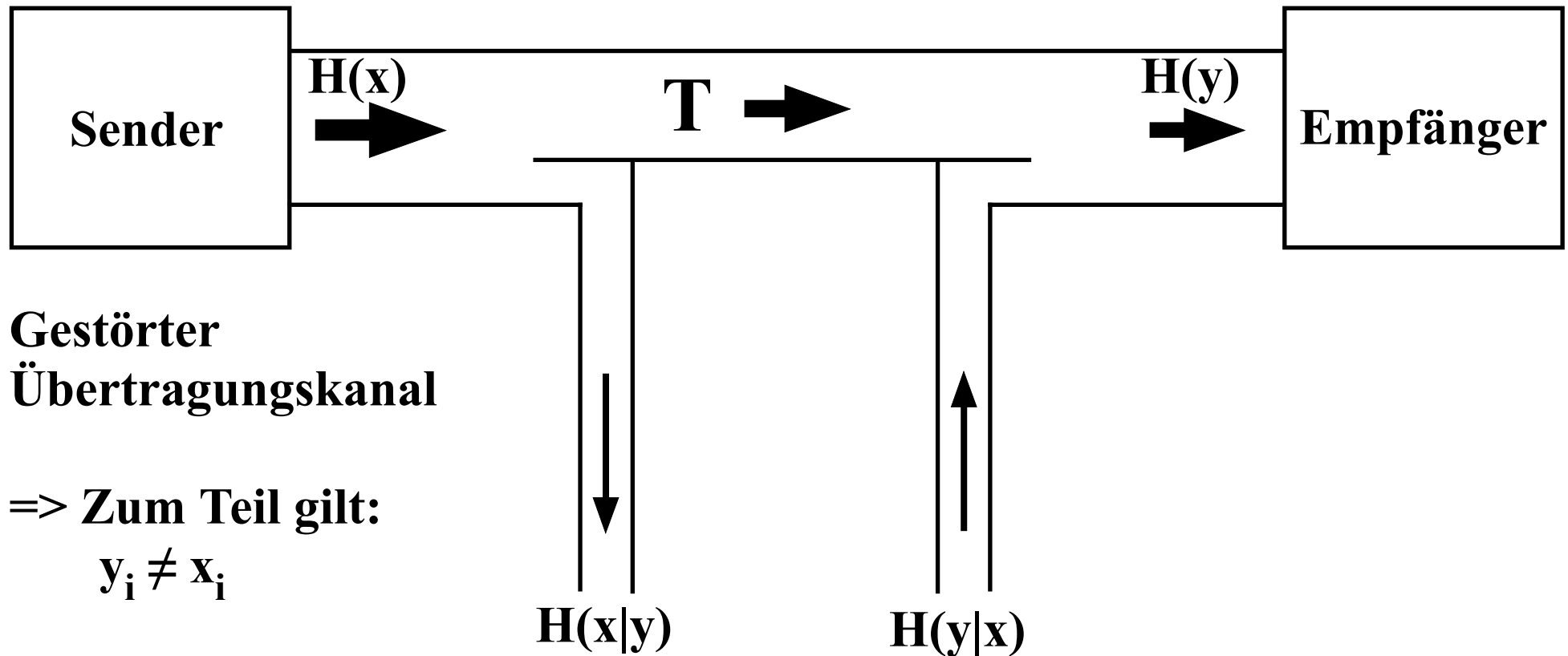
=> Deutscher Text: 1,3 bit pro Buchstabe
Englischer Text: 1,0 bit pro Buchstabe

Maximalwert für 30 gleichverteilte, statistisch unabhängige Buchstaben:
4,9 bit pro Buchstabe

Redundanz := Entscheidungsgehalt - Entropie

Deutscher Text: Redundanz 3,6 bit pro Buchstabe
Englischer Text: Redundanz 3,9 bit pro Buchstabe

Einseitig gerichteter Kanal



Gestörter
Übertragungskanal

=> Zum Teil gilt:
 $y_i \neq x_i$

Äquivokation
(Rückschlussentropie)
verschiedene x_i ergeben
das gleiche Zeichen y_i

Irrelevanz
(Streuentropie)
aus einem Zeichen x_i werden
verschiedene y_i

T = Synentropie (mittlerer Transinformationsgehalt)

Kanalkapazität

$$C = \left(\frac{T}{\tau} \right)_{max}$$

τ = mittlere Übertragungszeit je Nachricht (Symbol)

- **Symmetrischer Binärkanal mit Fehlerwahrscheinlichkeit q und Schrittdauer τ :**

$$C = \frac{1}{\tau} \left[1 - q \log_2 \left(\frac{1}{q} \right) - (1 - q) \log_2 \left(\frac{1}{1 - q} \right) \right]$$

- **Analoger Kanal, Bandbreite Δf , Signalleistung P_s , Störleistung P_n (Gauß'sche Verteilungen von Sende- und Störsignal):**

$$C = \Delta f \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_n} \right)$$

Typische Werte

Typische Werte für die Kanalkapazität technischer Nachrichtenkanäle:

- Telefonkanal $C = 50'000 \text{ bit / s}$
- Fernsehkanal $C = 70'000'000 \text{ bit / s}$

Diese sind angepasst an Informationskapazität menschlicher Sinnesorgane:

- Ohr $C = 40'000 \text{ bit / s}$
- Auge $C = 3'000'000 \text{ bit / s}$

Vom Menschen bewusst verarbeitete Kapazitätswerte: $< 50 \text{ bit / s}$

- leise / laut lesen $C = 45 \text{ bit / s} \quad / \quad 30 \text{ bit / s}$
- Schreibmaschineschr. $C = 16 \text{ bit / s}$
- Klavierspielen $C = 23 \text{ bit / s}$
- Addieren / Multipliz. $C = 12 \text{ bit / s}$
- Abzählen $C = 3 \text{ bit / s}$

Sinnesphysiologie

**Sinnesorgane: Reizaufnahme & -verarbeitung zu Impulsen;
Weiterleitung von Impulsen an zentrales Nervensystem**

**Zentrales Nervensystem: Gesamtheit aller Impulse (versch. Rezeptoren)
=> Abbild der Umwelt**

**Subjektive Verarbeitung eines einzelnen Sinnesreizes
=> Sinneseindruck**

**Zusammenfassung von mehreren Sinneseindrücken zu Gesamtbild
=> Sinnesempfindung**

**Bewertung dieser Empfindung; Deutung mit Erfahrung
=> Wahrnehmung**

Bsp.:

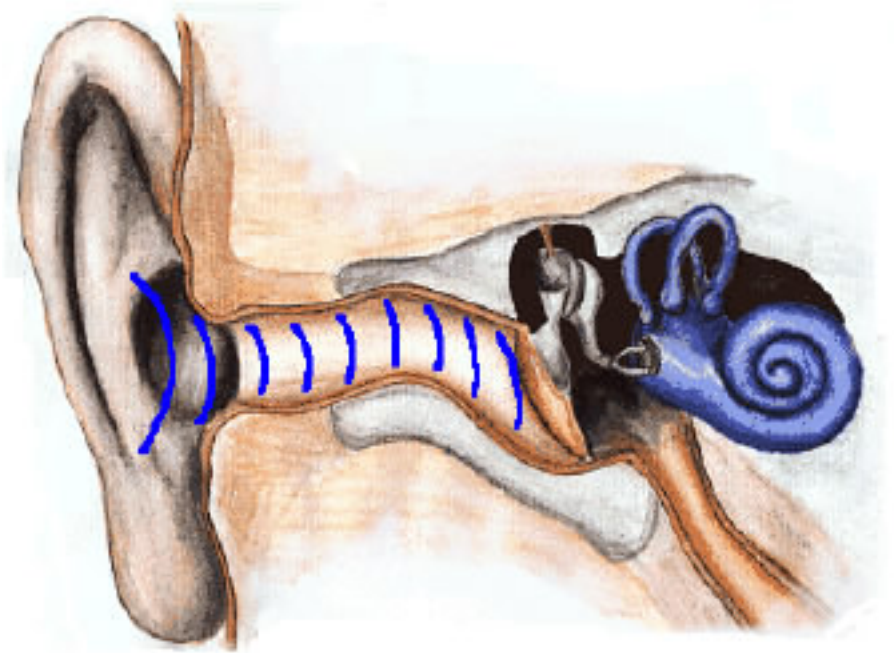
Rezeptortyp (Empfindungsmodalität)	Submodalitäten (Qualitäten)
---	------------------------------------

- | | |
|--|---|
| - Photorezeptoren (Gesichtssinn) | Helligkeit, Dunkelheit, Farben, Form, Bewegung |
| - Thermorezeptoren (Temperatursinn) | Kälte, Wärme |
| - Chemorezeptoren (Geruchssinn, Geschmackssinn) | versch. Gerüche
Säure, Salze, Süße, Bitterkeit |
| - Mechanorezeptoren (u.a. Gehörsinn) | Tonhöhen |

“Dimensionen” der Empfindungen:

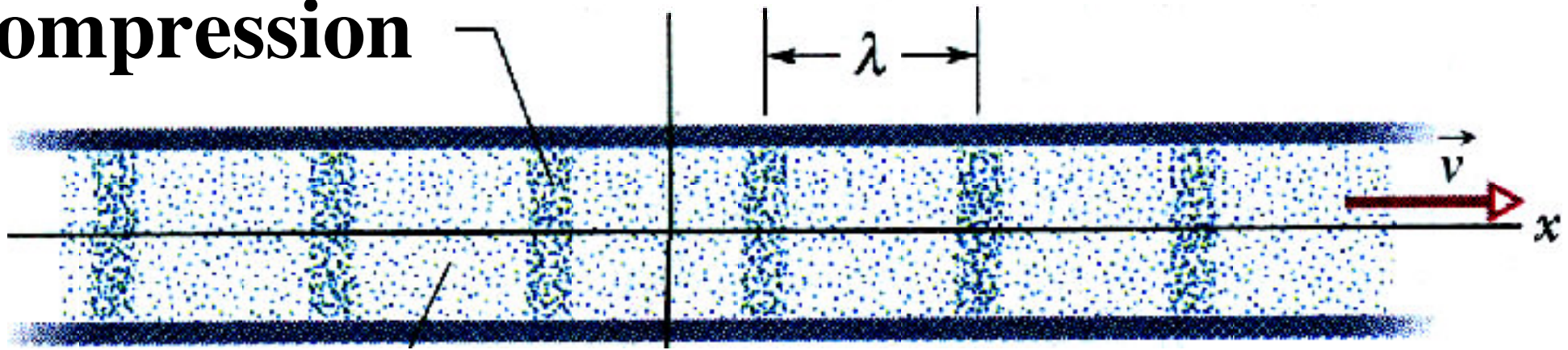
- **Modalität**
- **Intensität**
- **Räumlichkeit**
- **Zeitlichkeit**

4.2 Akustik



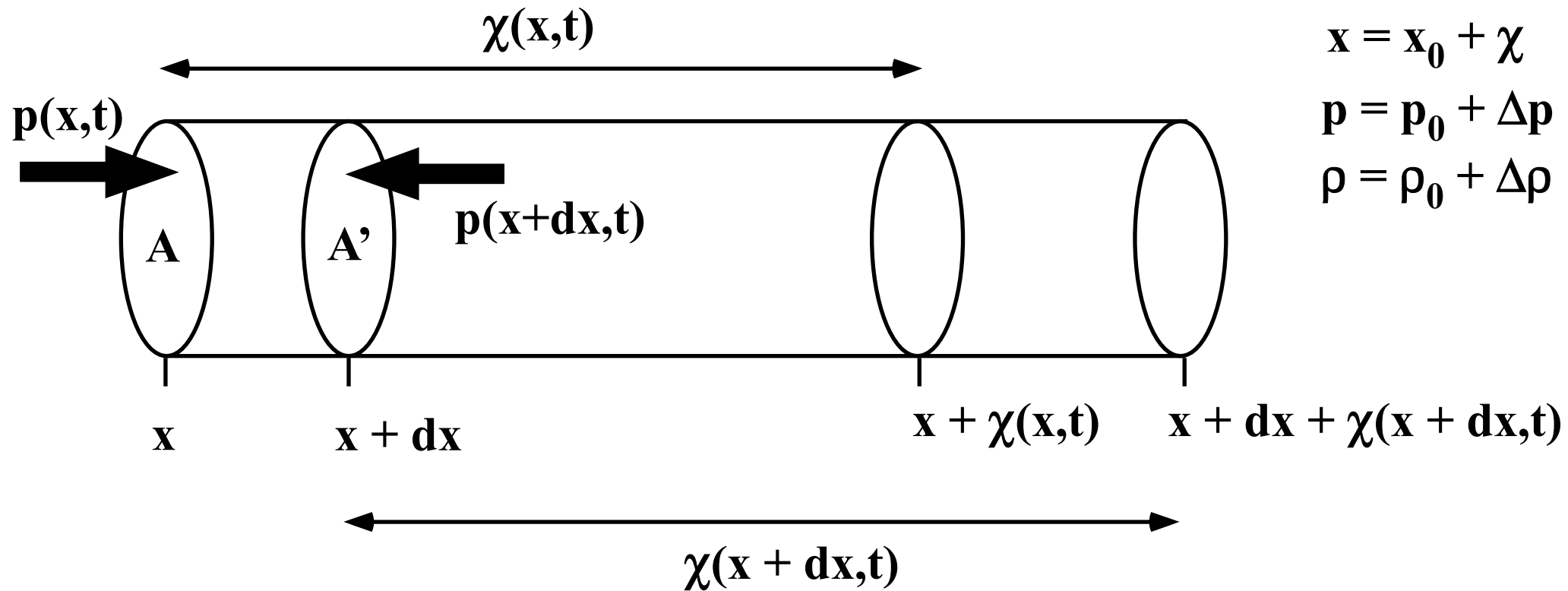
Longitudinale Dichtewellen / Schallwellen

Kompression



Ausdehnung

Schallwellen



1. Gasbewegung verursacht Dichteänderung
2. Zusammenhang zwischen Dichteänderung und Druckänderung
3. Druckgradient verursacht Gasbewegung

Wellengleichungen

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

Schallpegel

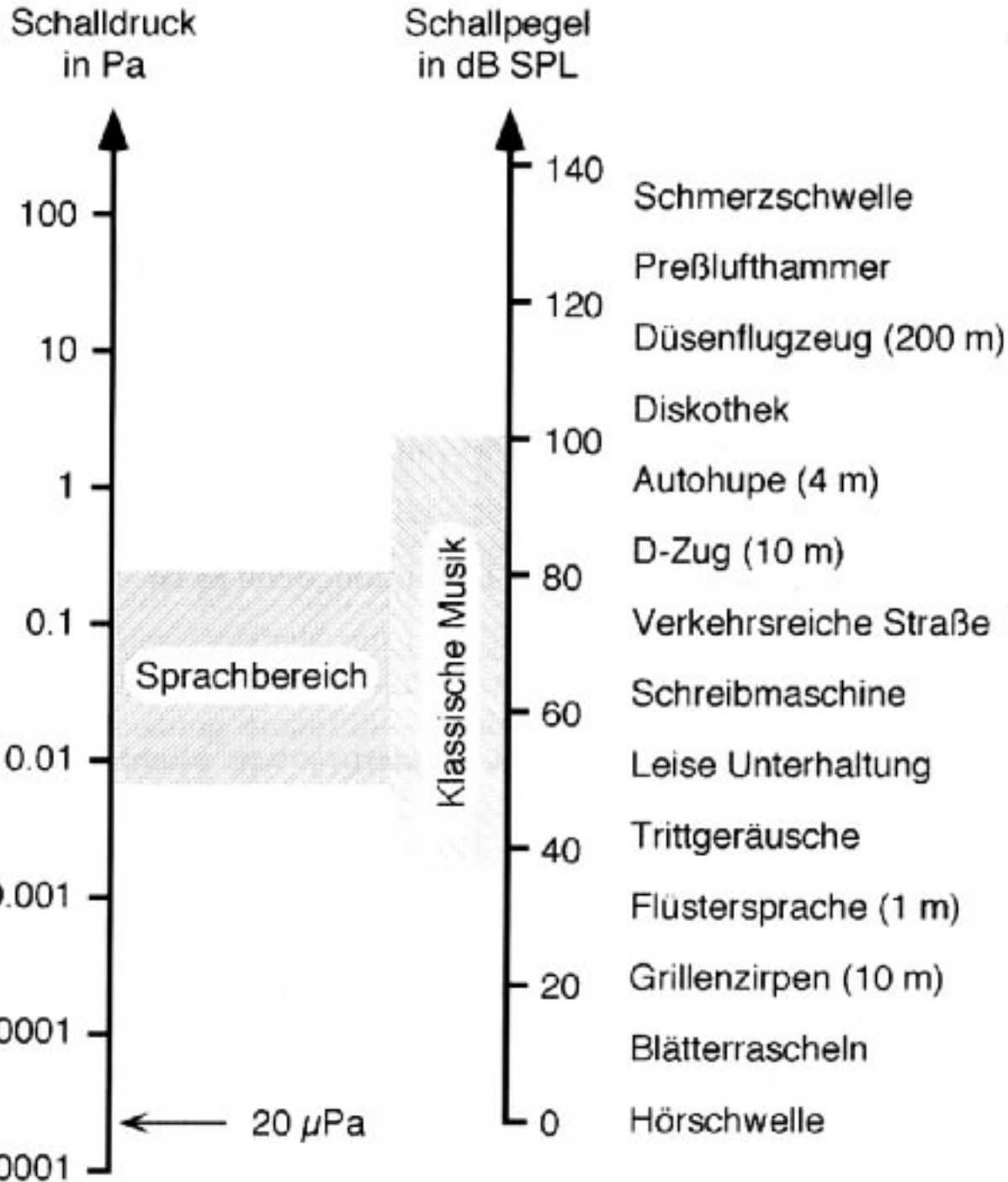
Schallschnelle

Phasengeschwindigkeit

$$\Delta p = \rho_0 v_0 c = \rho_0 \omega \chi_0 c$$

Schallimpedanz: $Z = \frac{\Delta p}{v_0} = \rho_0 c = \sqrt{\frac{\rho_0}{\kappa}}$

Schallpegel



$$L = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

$$= 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

Hörschwelle:

$$p_0 = 20 \mu\text{Pa}$$

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

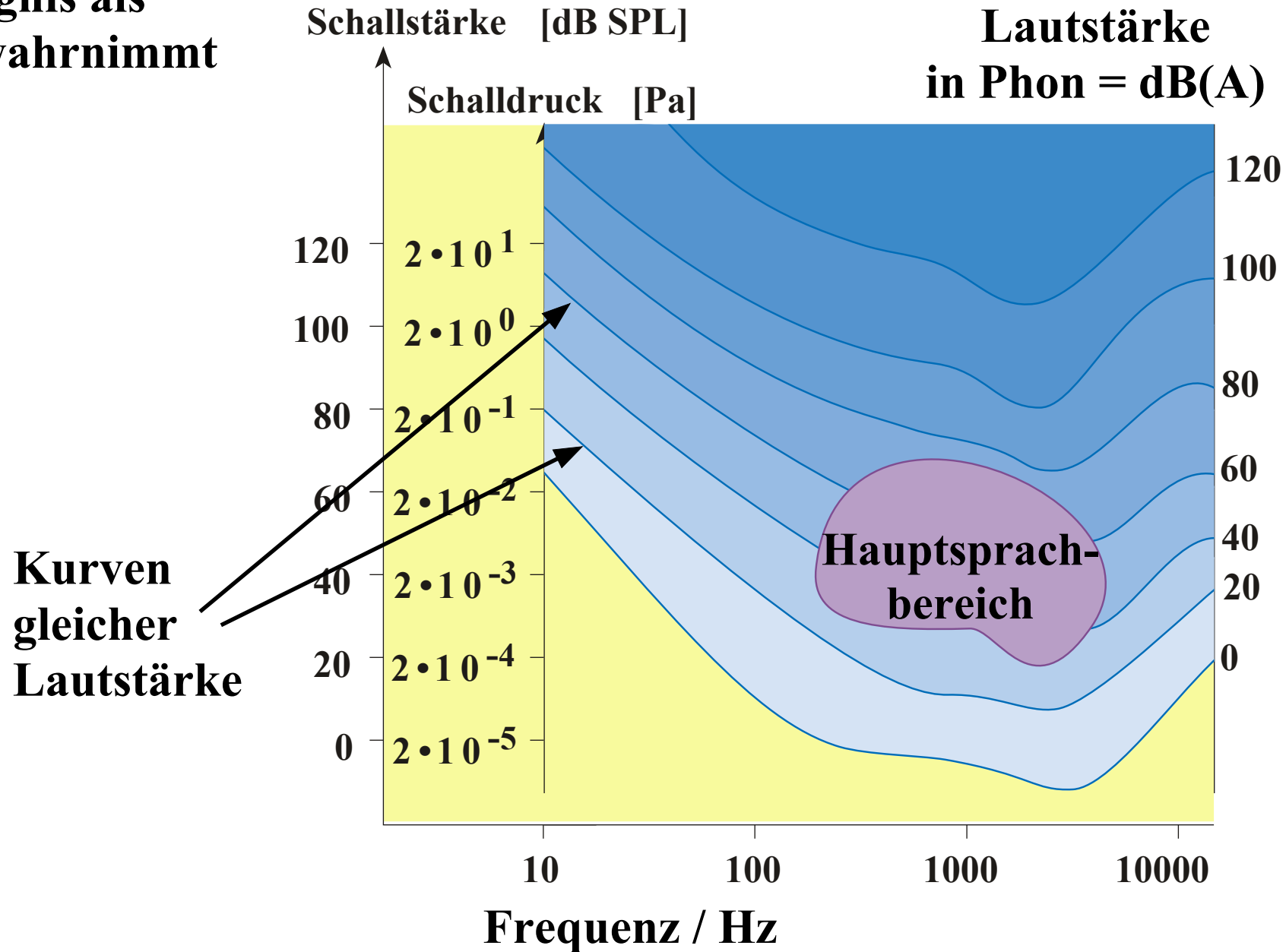
Schmerzgrenze:

$$p_{\text{max}} = 20 \text{ Pa}$$

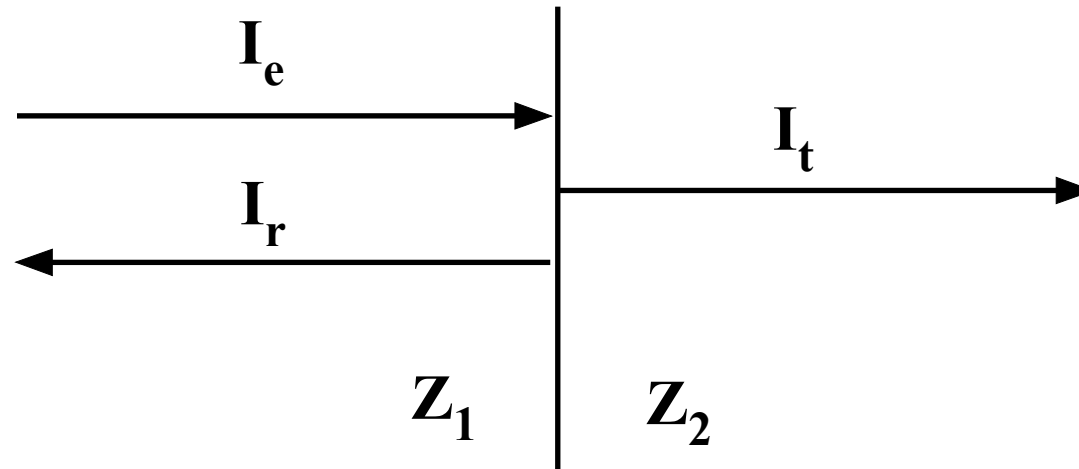
$$I_{\text{max}} = 1 \text{ W/m}^2$$

Phon ist die Einheit der empfundenen Lautstärke mit der ein Mensch ein Schallereignis als Hörereignis wahrnimmt

Lautstärke



Reflexion & Transmission

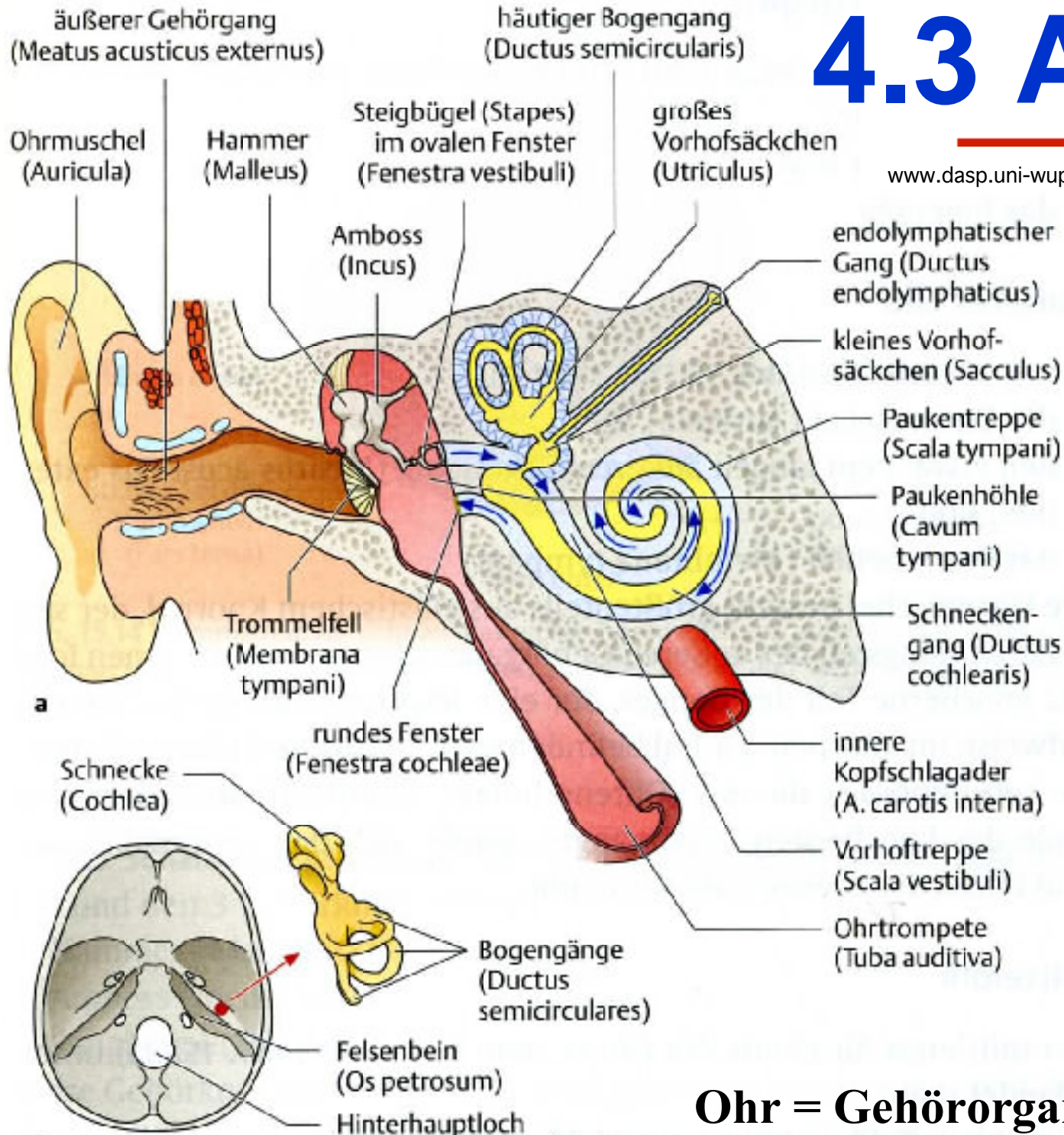


$$\frac{I_t}{I_e} = 4 \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

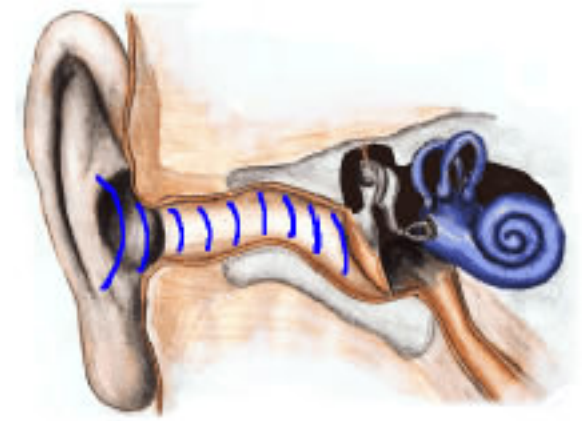
$$\frac{I_r}{I_e} = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

4.3 Anatomie

www.dasp.uni-wuppertal.de/ars_auditus/physiologie/inhaltphysio.htm



perilymphatischer Raum
 endolymphatischer Raum



b Der Körper des Menschen
 A. Faller, M. Schünke

Ohr = Gehörorgan & Gleichgewichtsorgan

Menschliches Ohr

Aufgabenteilung:

- Akustische Vorgänge

äußeres Ohr

- Schallverstärkung
- richtungsabhängige Filterung

Mittelohr

- Impedanzanpassung

Innenohr

- Frequenzanalyse
- Amplitudenanalyse

- Auditorische Vorgänge

Hörner

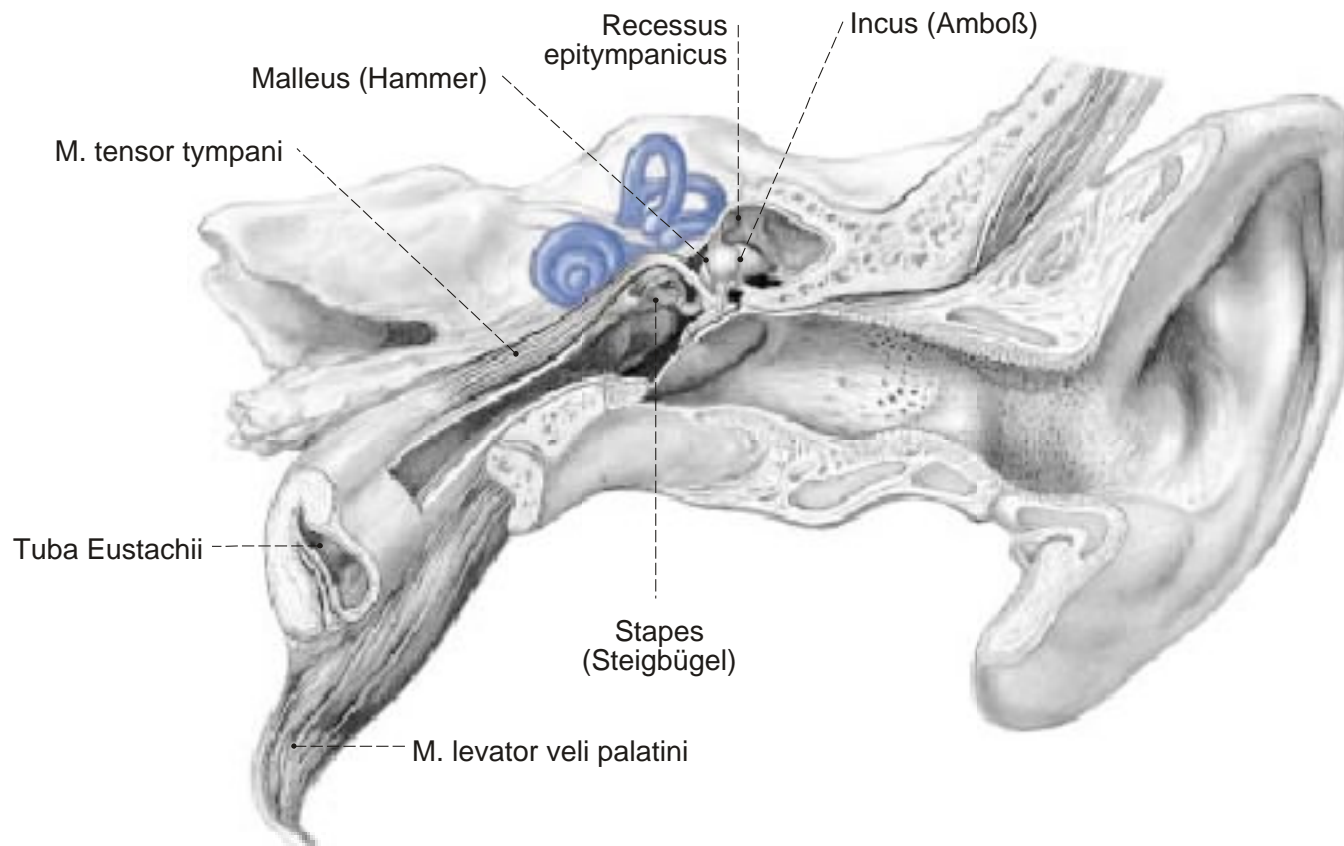
- Kodierung akustischer Information

Cortex

- Spracherkennung

Schallaufnahme

- **Knochenleitung:** Umgehung von äußerem Ohr und Mittelohr
Schwingungen des Schädelknochens
-50dB unter Luftschall
Wichtig beim Hören der eigenen Stimme
- **Luftleitung:** Schalltransport vom Außenohr über das Mittelohr bis in das Innenohr



Hammer, Amboss, Steigbügel

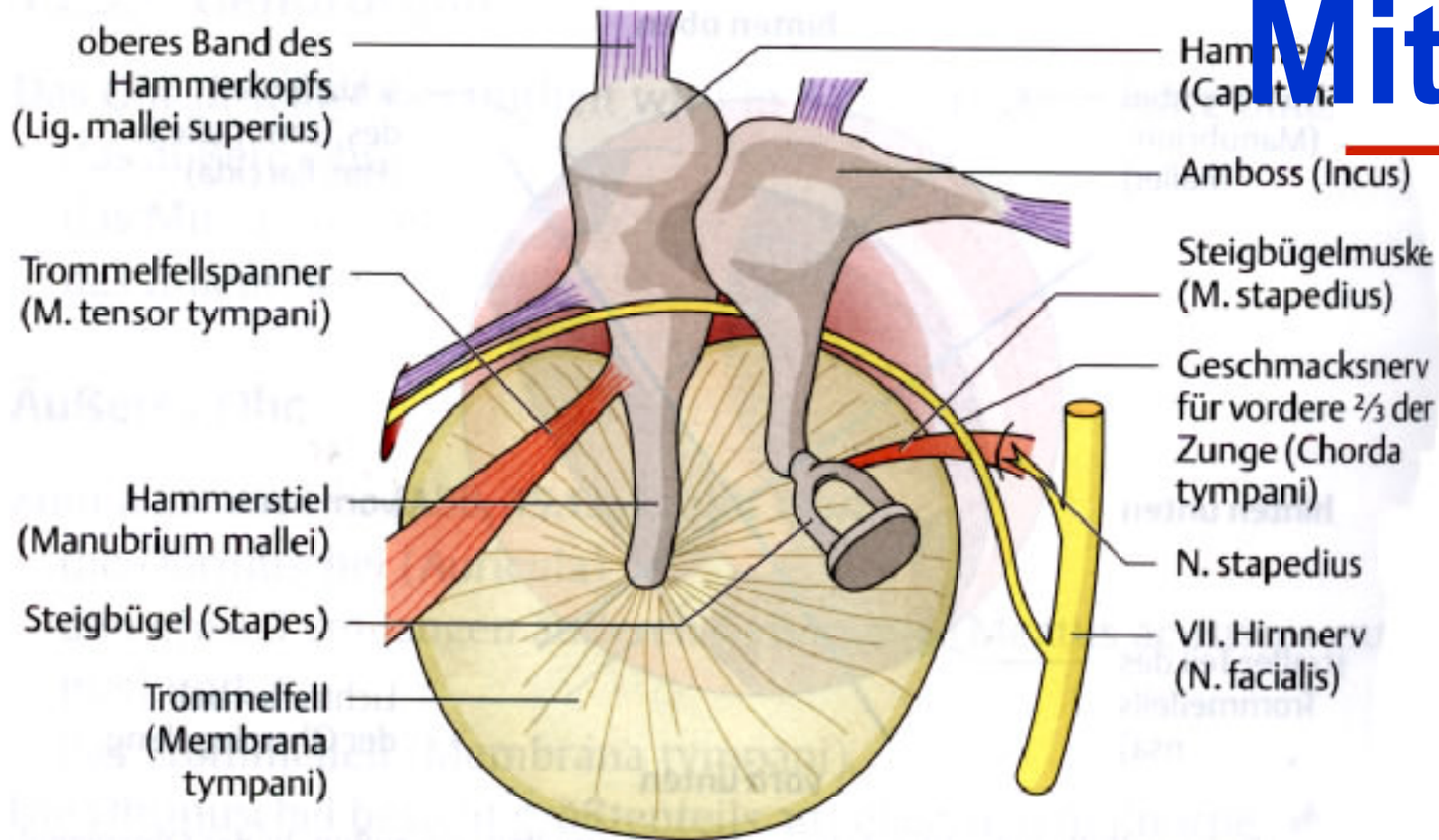
Mittelohr



**Anpassung des
Wellenwiderstands**

- **Trennung vom äußeren Ohr durch Trommelfell**
- **Druckausgleich durch eustachische Röhre (Verbindung zu Rachenraum)
i.A. durch Gaumensegel verschlossen
Nur einseitiger Schalldruck auf Trommelfell
Eigene Stimme gedämpft hörbar**

Mittelohr



Mittelohrmuskeln

Schutz des Gehörs bei lautem Knall

Latenzzeit: hohe Schallpegel 35 ms

niedrige Schallpegel 150 ms

**Dämpfung des Ausschwingens des
Sprachschalls**

**Vergrößerung des Arbeitsbereiches des Mittel-
ohrs (sonst nur Schallereignisse < 40 dB SPL
außerhalb Sättigungsbereich)**

Impedanzanpassung

Außenohr und Paukenhöhle:	Luft	$Z_L = 414 \text{ kg/m}^2\text{s}$
Innenohr (Sinneszellen):	Lymphflüssigkeit	$Z_c = 10^5 \text{ kg/m}^2\text{s}$
	(Wasser	$Z_w = 1,5 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s})$

=> Reflexionen bei Übergang!

Fläche Trommelfell: $F_1 = 55 \text{ mm}^2$

Fläche Steigbügelfußplatte: $F_2 = 3,2 \text{ mm}^2$

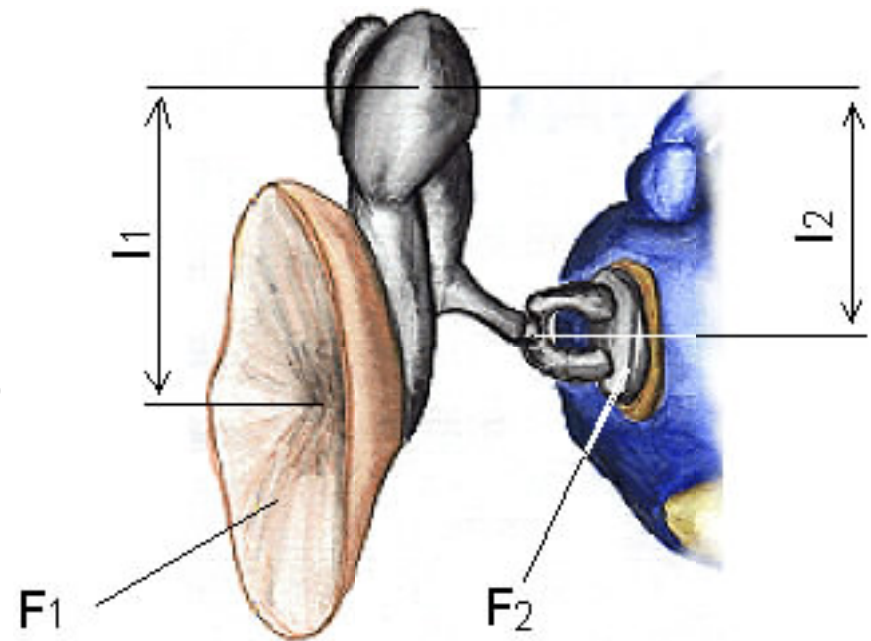
Wirksame Länge Gehörknöchelchen: l_1, l_2

Verhältnis Hebelarme: $l_1 / l_2 \approx 1,3$

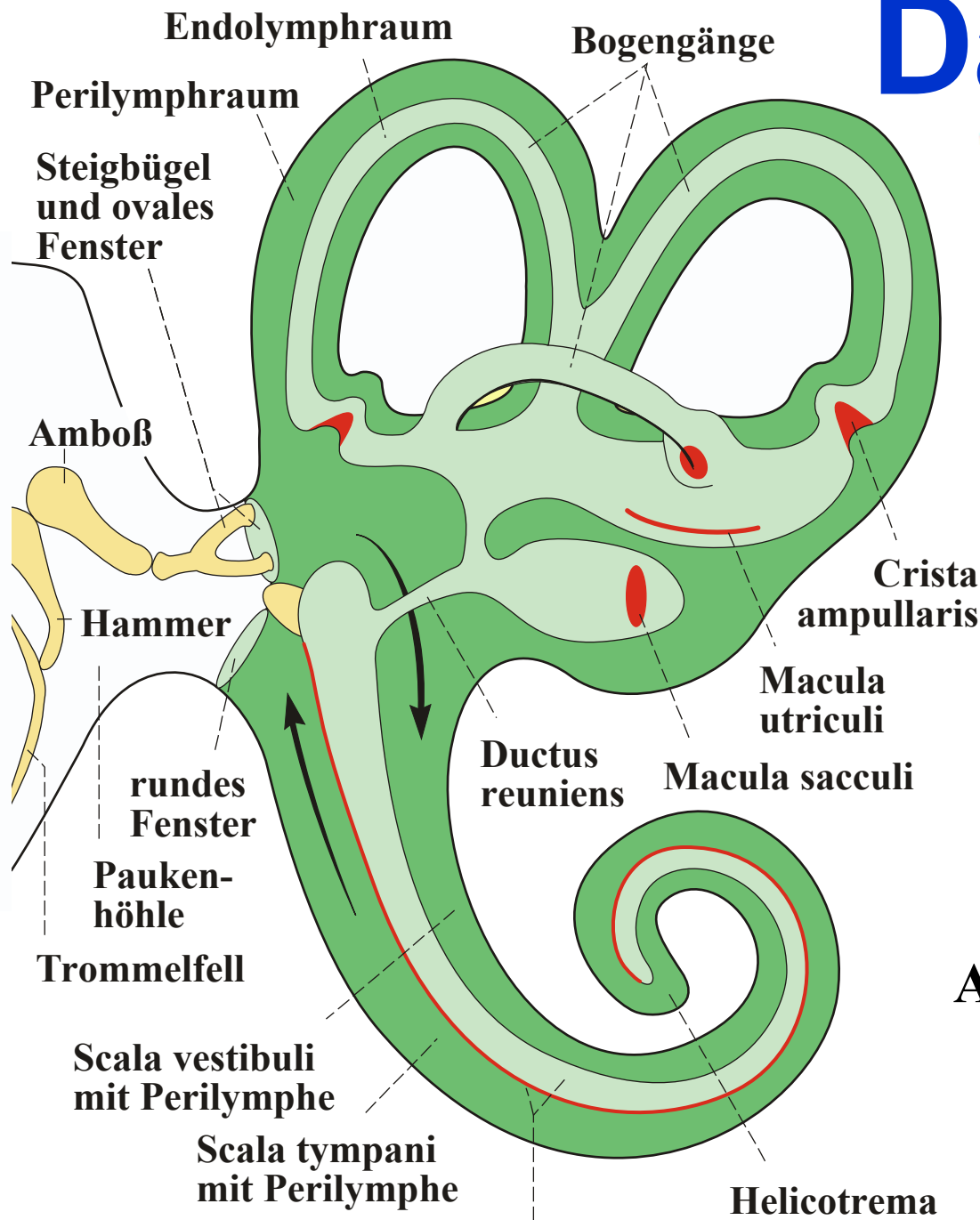
$$\Delta p_{\text{ovales Fenster}} = \Delta p_{\text{Trommelfell}} \cdot (F_1/F_2) \cdot (l_1/l_2)$$

=> Transmittierte Intensität:

- **Ohne Impedanzanpassung $\approx 1\text{-}2\%$**
- **Mit Impedanzanpassung $\approx 60\%$**



Das Innenohr



Gleichgewichtsorgan

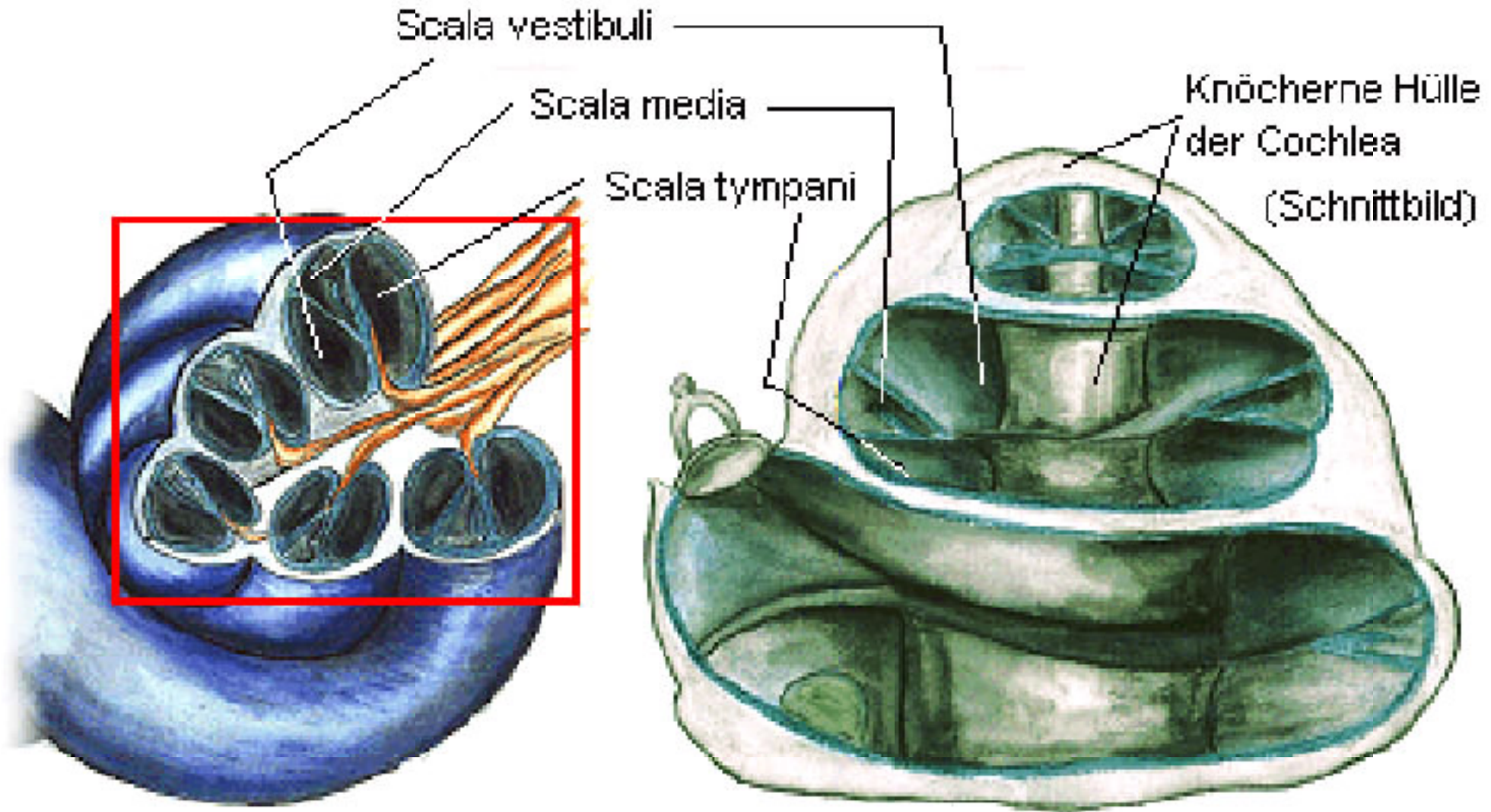
**Schnecke (Cochlea)
eigentliches Hörorgan**

Aufgaben des Innenohres
Reizverteilung an Sinneszellen
**Reiztransformation (mech.
Schwingungen -> Nervenimpulse)**

**Schnecken gang mit Endolymphe
(Ductus cochlearis, Scala media)
und Corti-Organ (rot)**

Die Cochlea

Schnecke abgerollt $\approx 30\text{mm}$ lang
Verjüngung $0,9 \dots 0,3\text{mm}$
2,5 Windungen



Gänge der Cochlea

Vorhoftreppe (scala vestibuli)

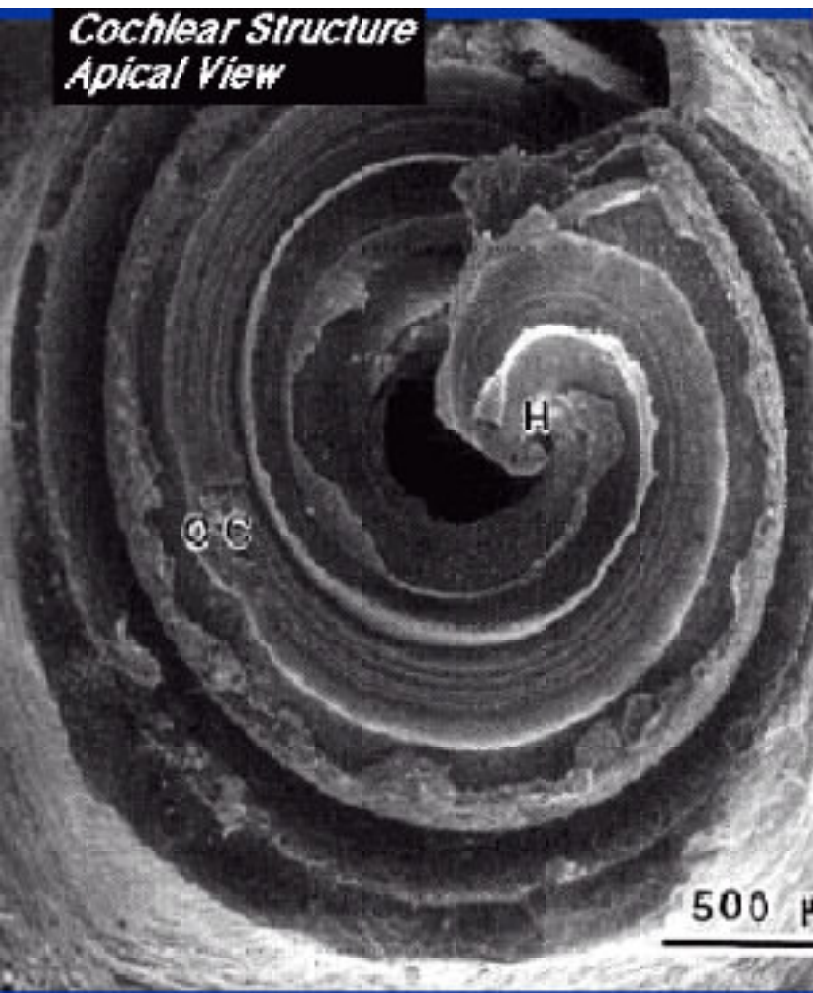
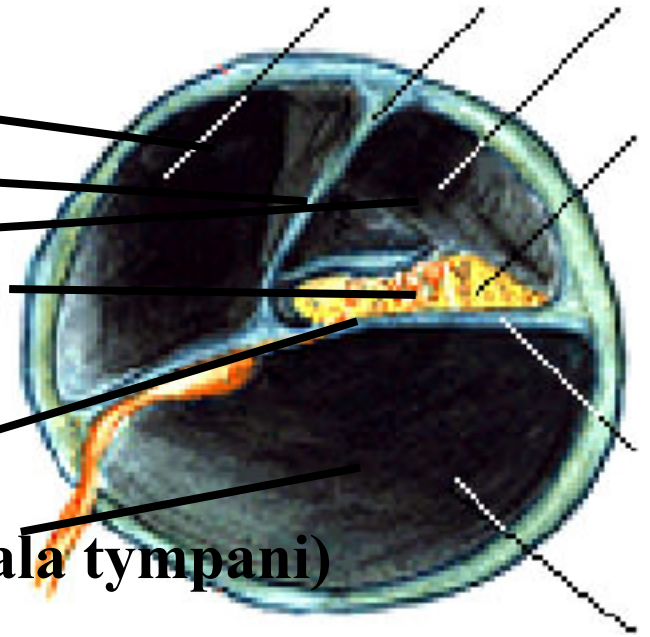
Reissnersche Membran

Mittlerer Schneckengang (scala media)

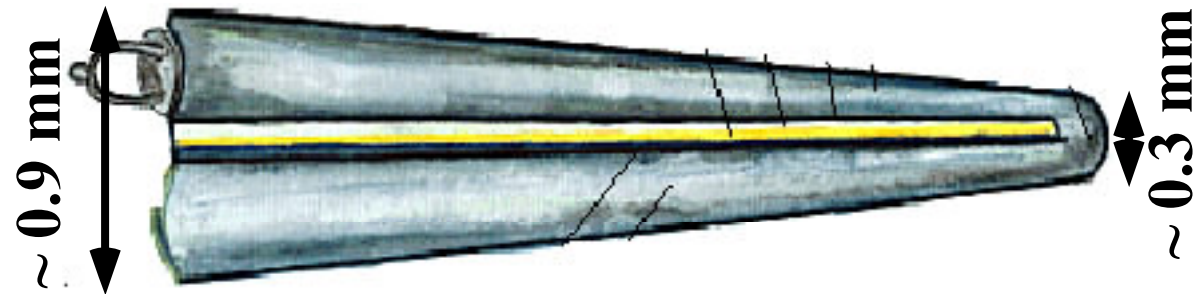
Transformationsorgan (Corti'sches Organ)

Basilarmembran

Pauckentreppe (scala tympani)

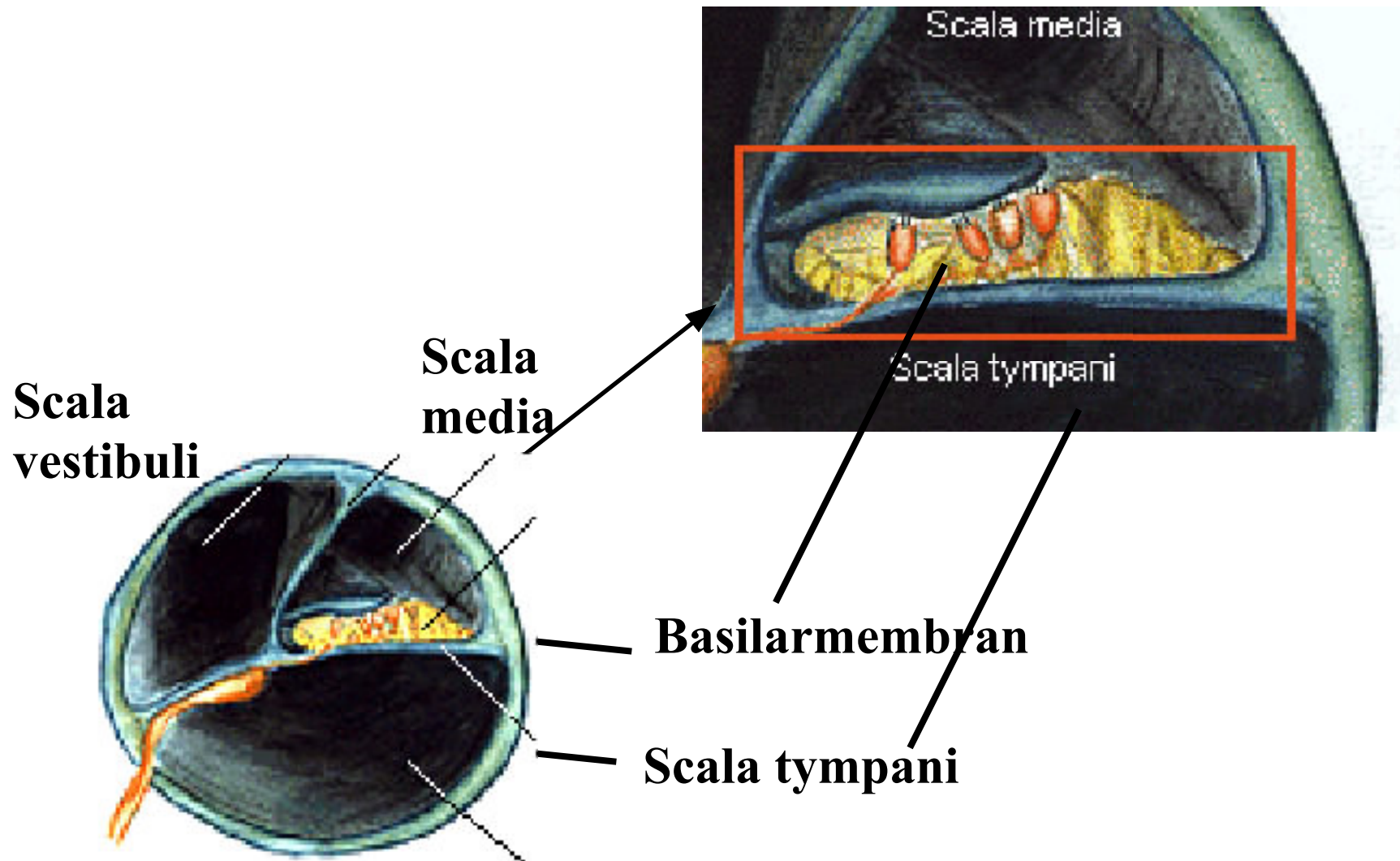


~ 30 mm



Das Transformationsorgan

Umwandlung der Schwingungen in neuronale Impulsmuster



Transformation

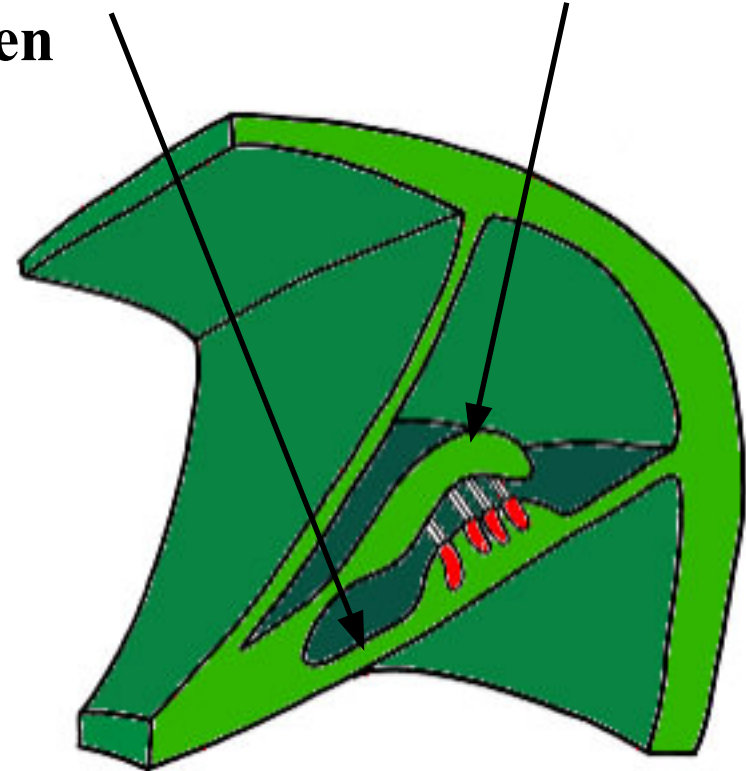
Bewegungen Steigbügel im ovalen Fenster

- => Flüssigkeitsverschiebung**
- => Basilarmembran schwingt; Wanderwellen bilden sich aus**
- => Amplitudenmaximum an frequenzabhängiger Stelle**
- => Relativbewegung zwischen Basilarmembran und Tektorialmembran**
- => Tangentiale Abscherung der Haarzellen**



=> Nervenimpulse

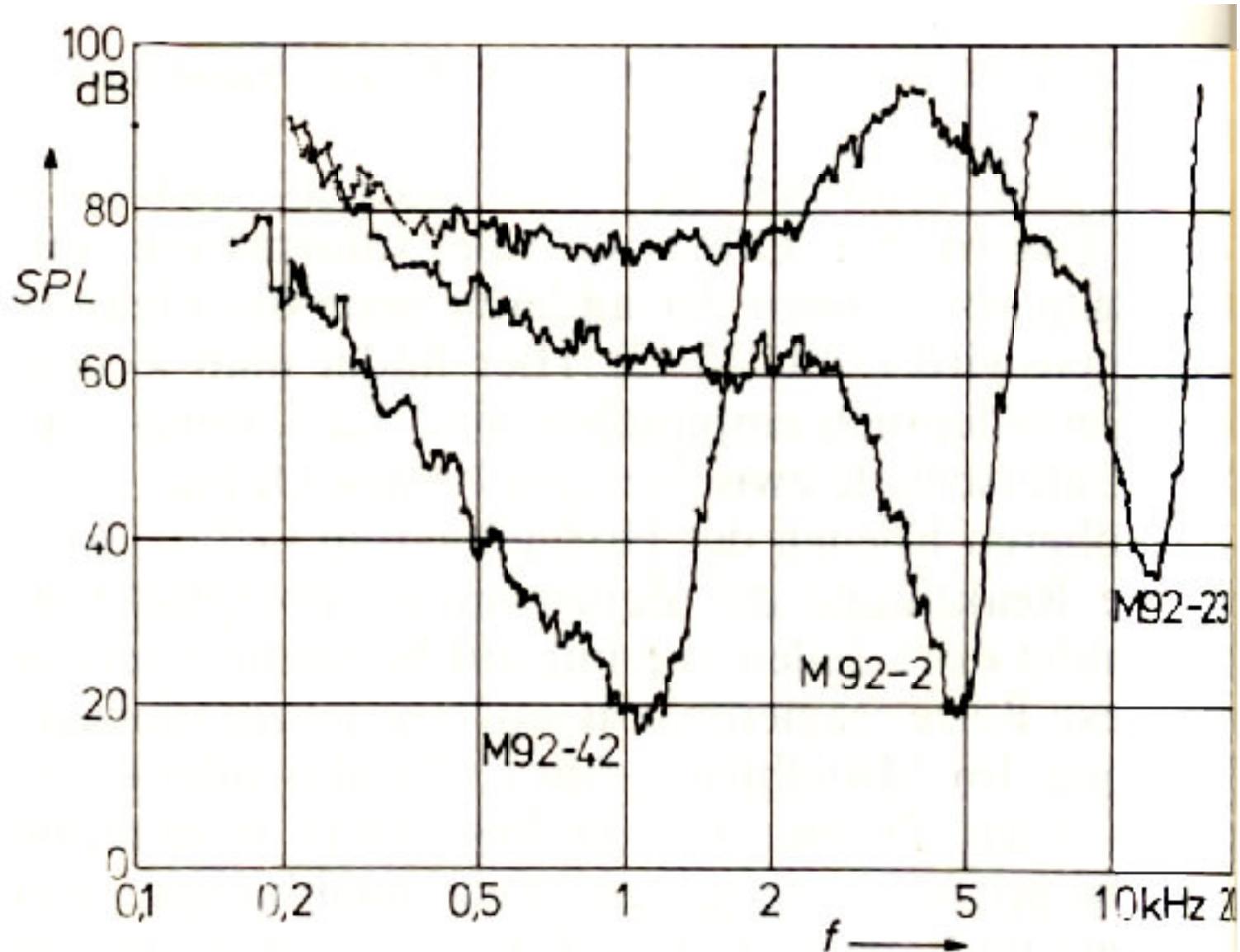
=> ...



Frequenzgang einzelner Nerven

Die Ortskodierung führt dazu, dass unterschiedliche Sinneszellen unterschiedlich auf monochromatische Anregung reagieren

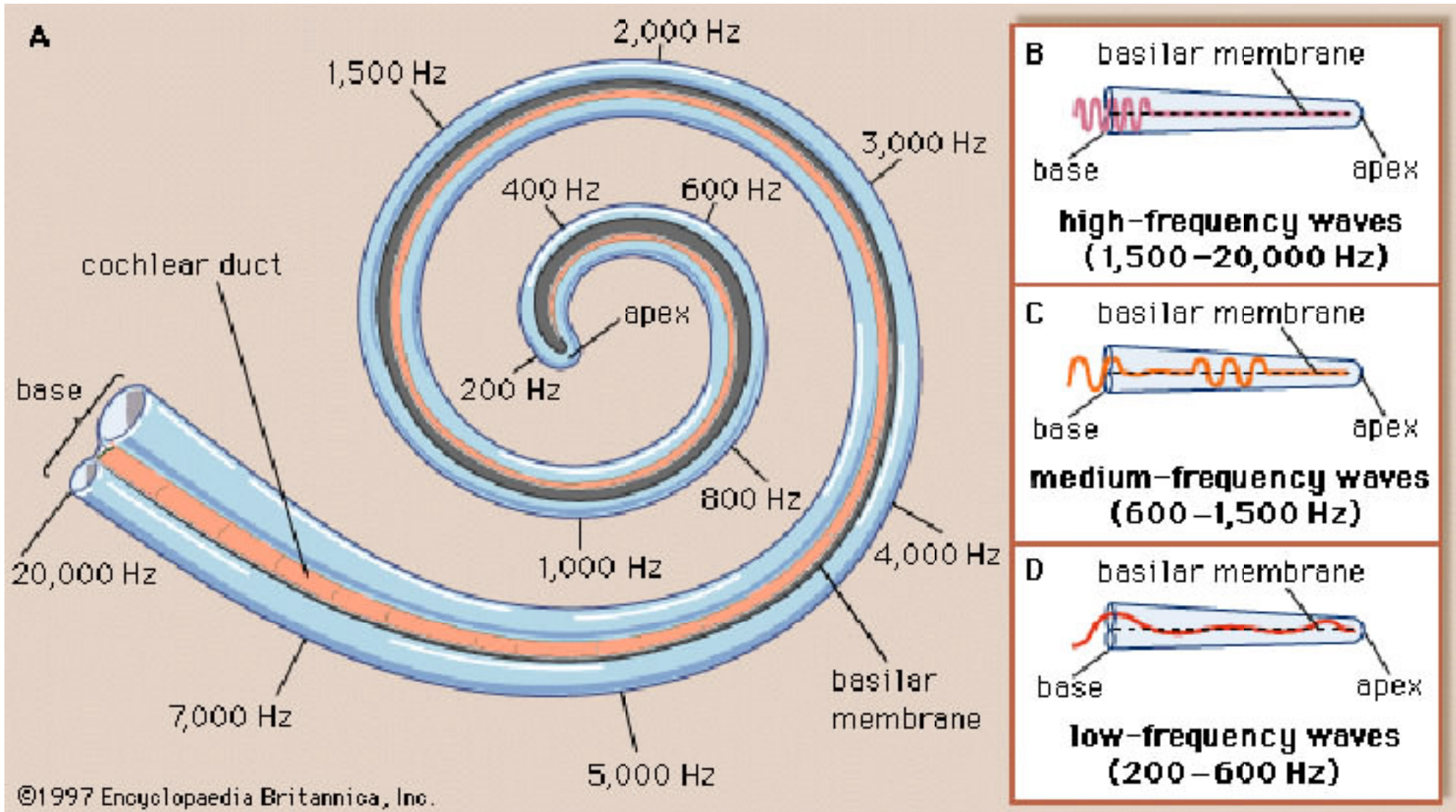
Tuning - Kurven
von 3 Nervenfasern
einer Katze



Ortskodierung der Frequenz

Wanderwellentheorie - Reizweiterleitung an die Sinneszellen

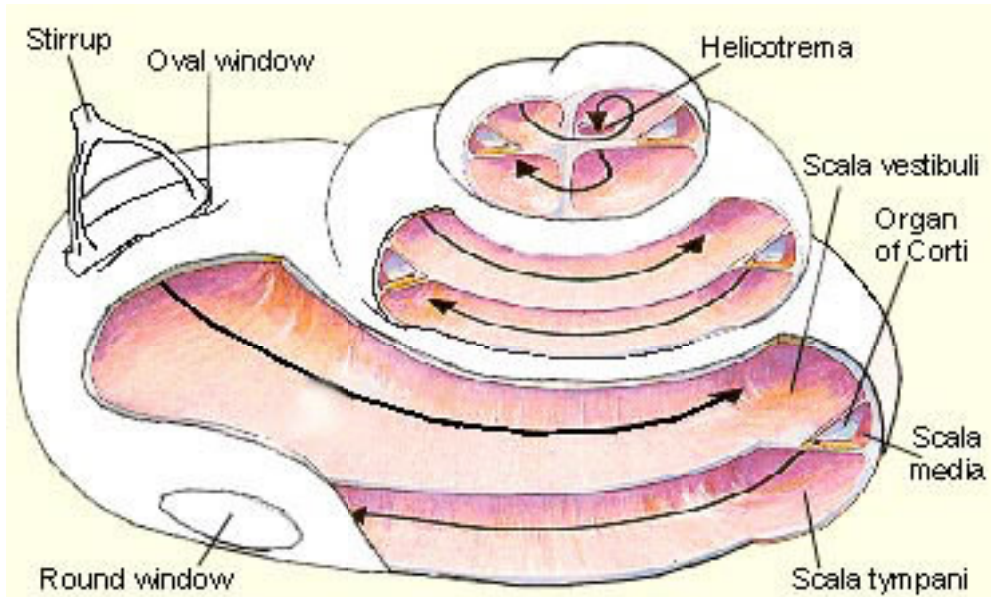
Amplitudenmax. wird an fester Stelle frequenzabhängig ausgebildet:



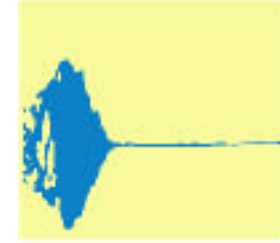
Krümmung Cochlea: ...

Pulsausbreitung

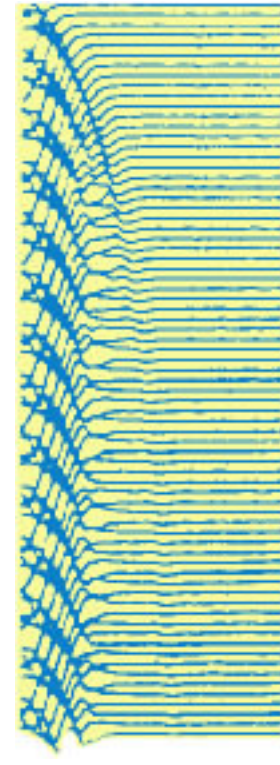
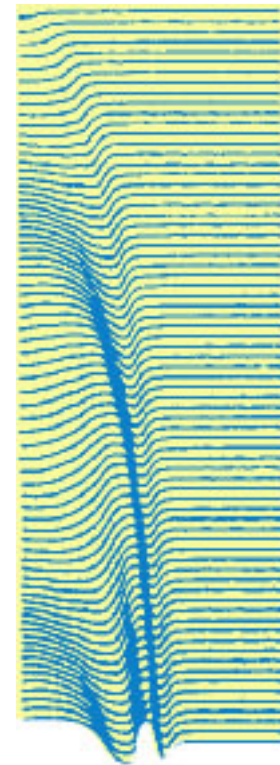
Flüssigkeitswelle in der Cochlea



Entfernung vom ovalen Fenster [mm]
0 36 0 36

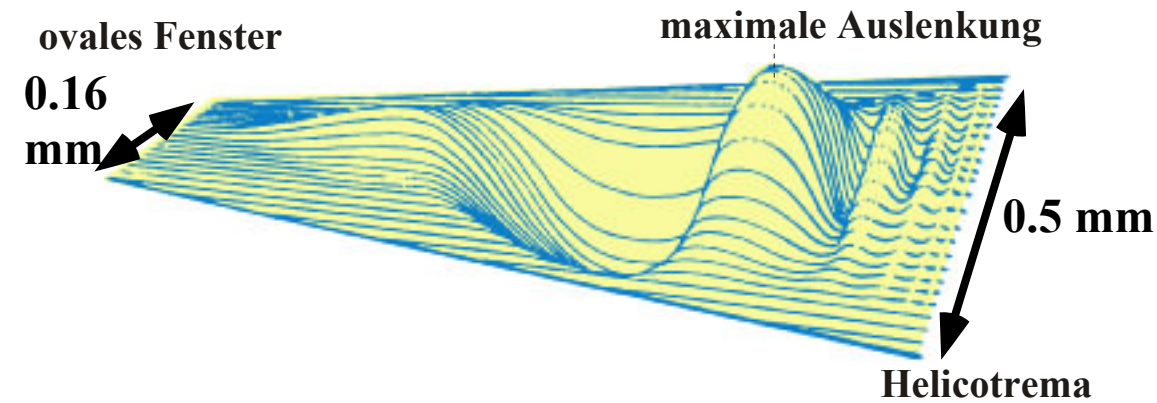


Amplitude



1 ms

Schwingung der Basilarmembran

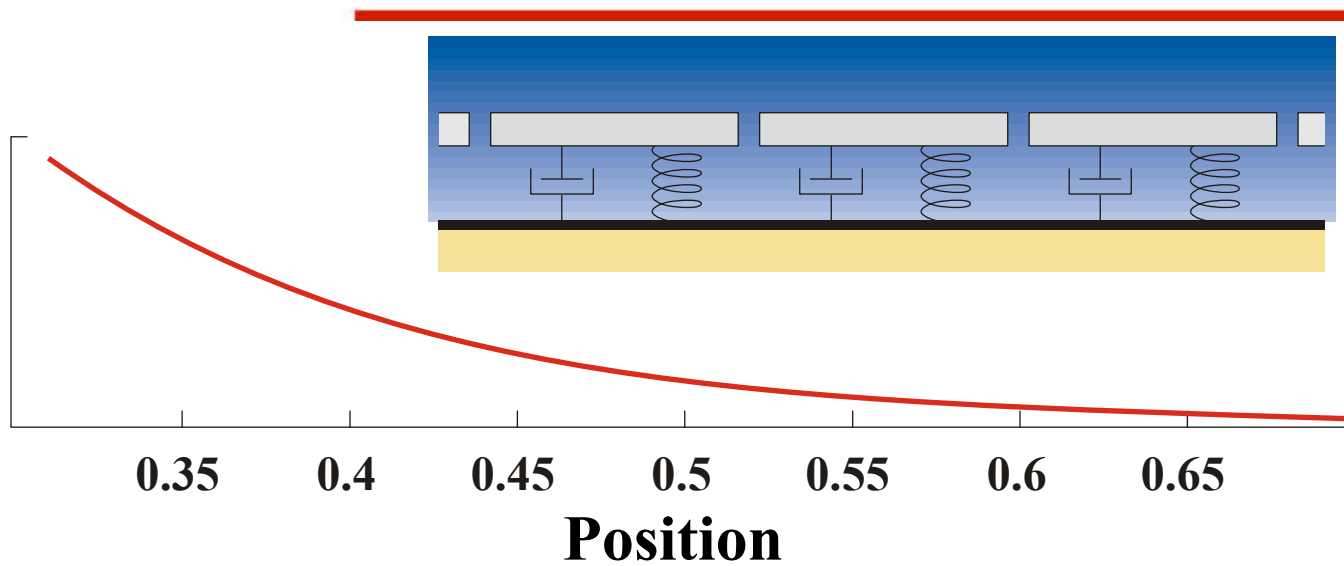


500 Hz

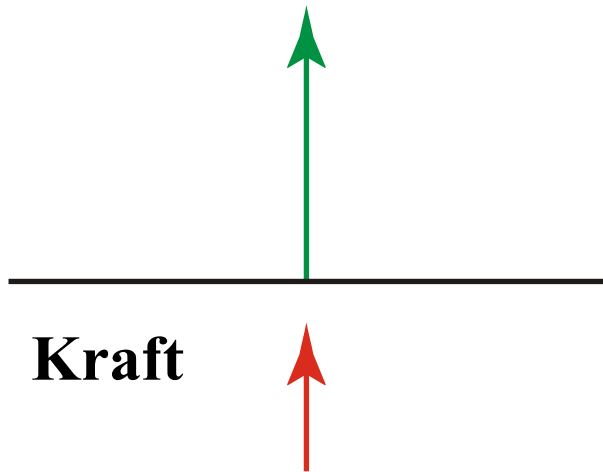
4000 Hz

Kette von Oszillatoren

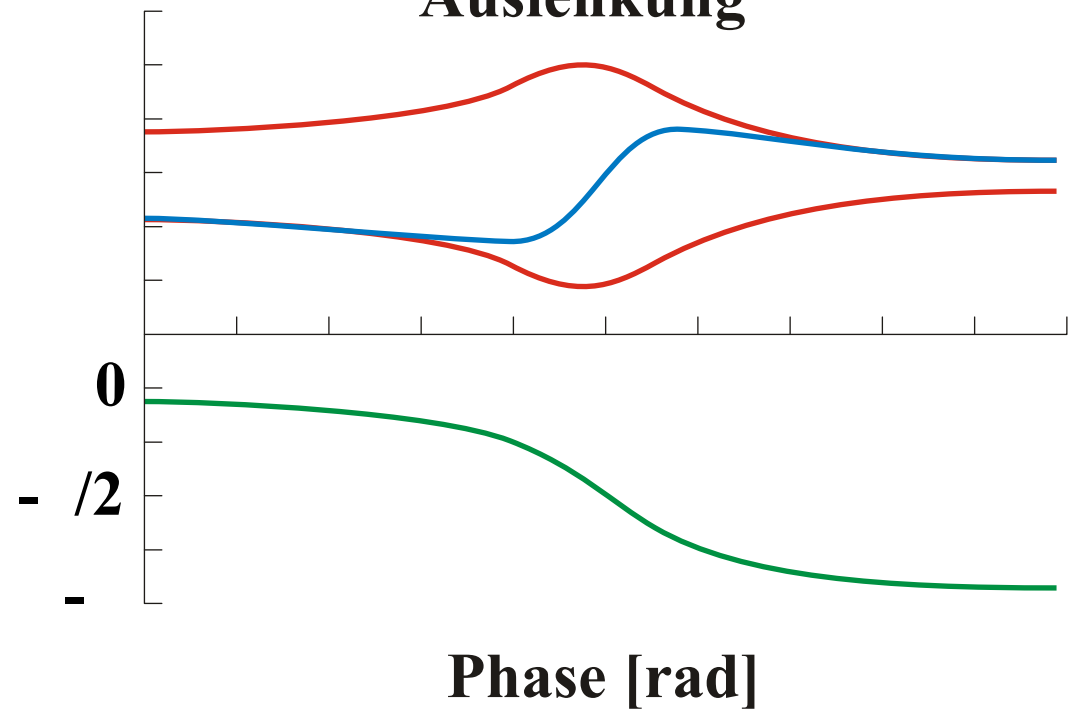
Steifigkeit der
Basilarmembran



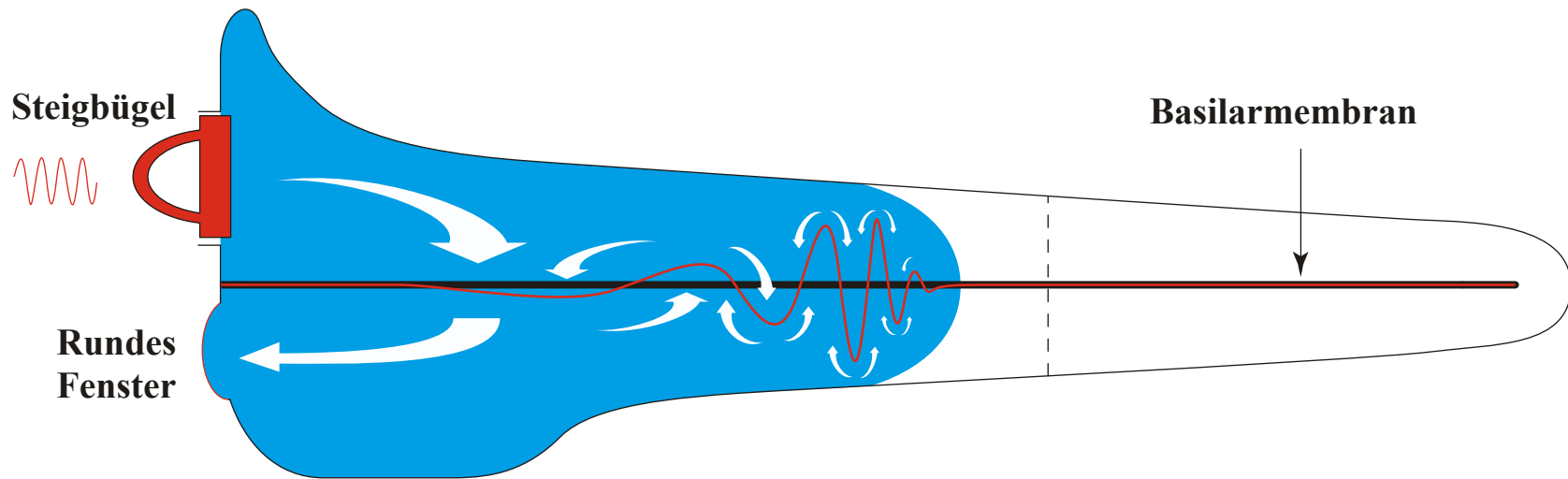
Beschleunigung
der Membran



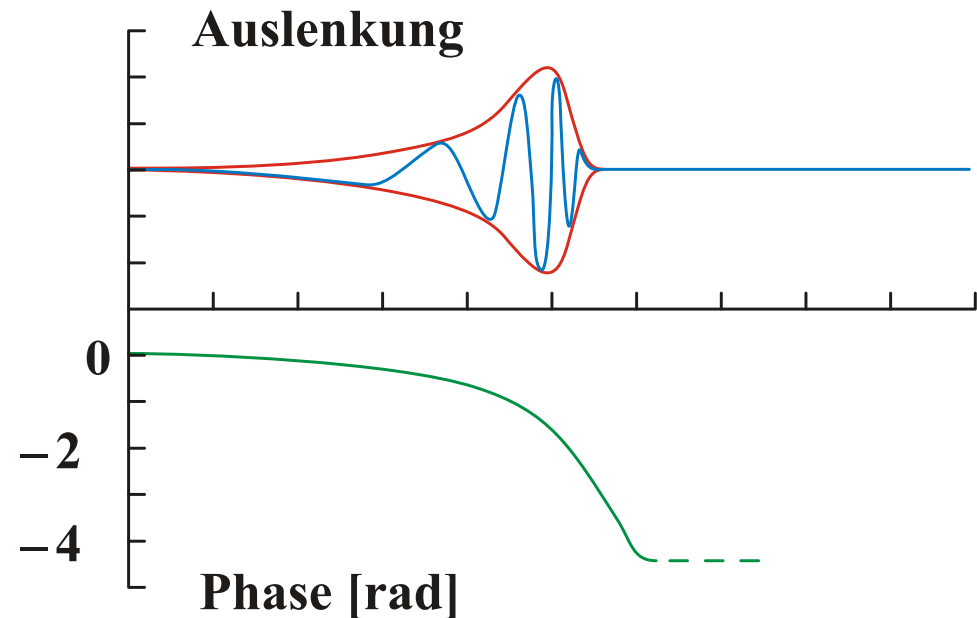
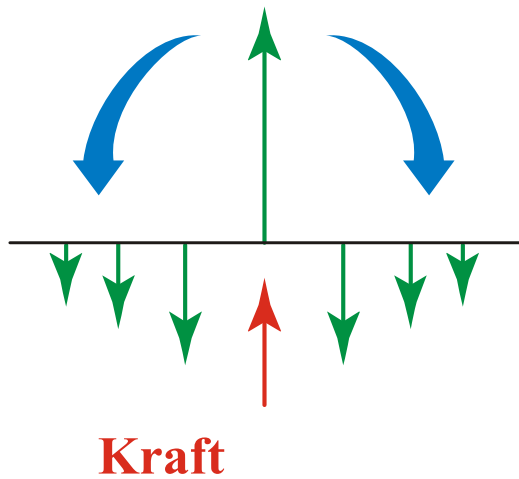
Auslenkung



Hydrodynamische Kopplung

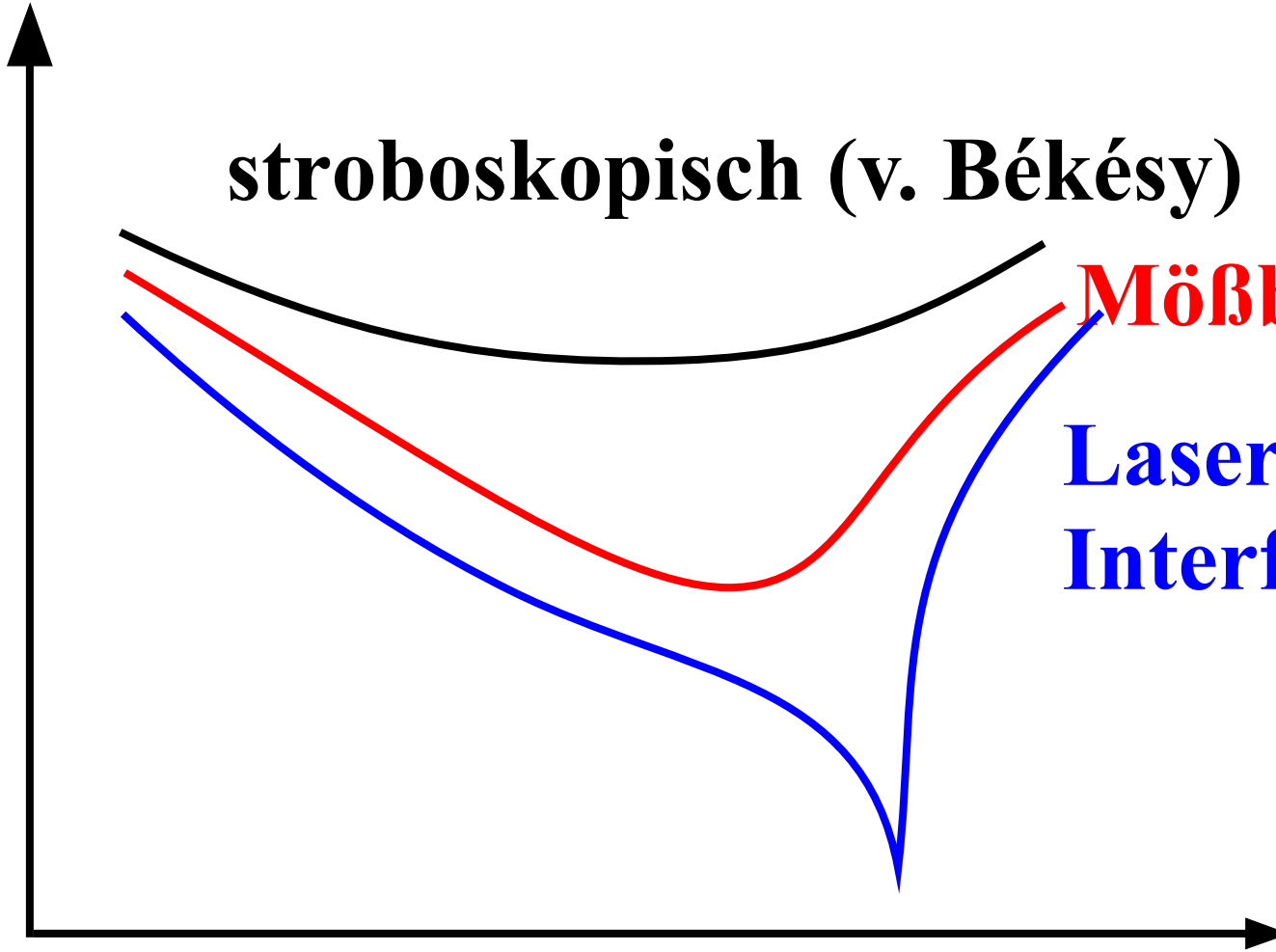


Beschleunigung der Membran



Tuning-Kurve

Pegel



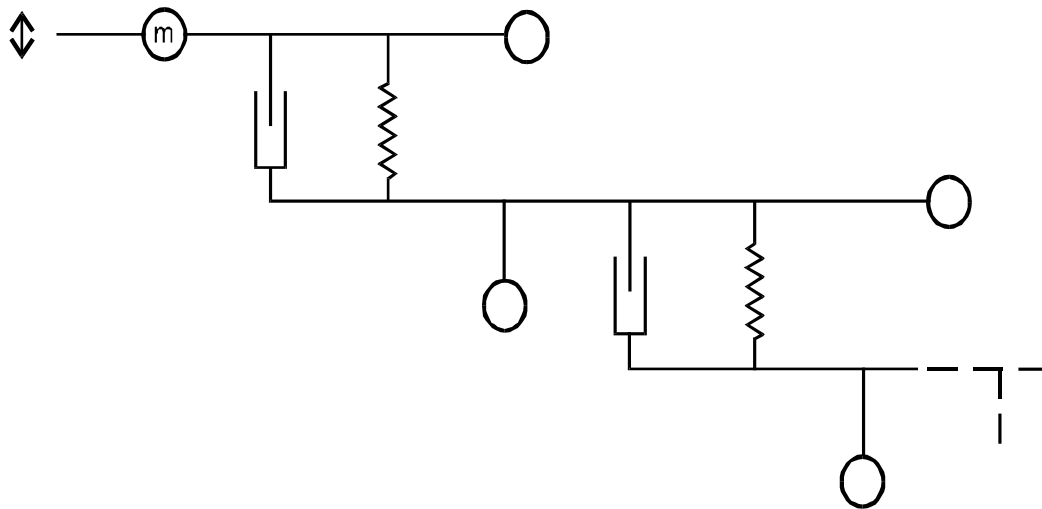
stroboskopisch (v. Békésy)

Mößbauer

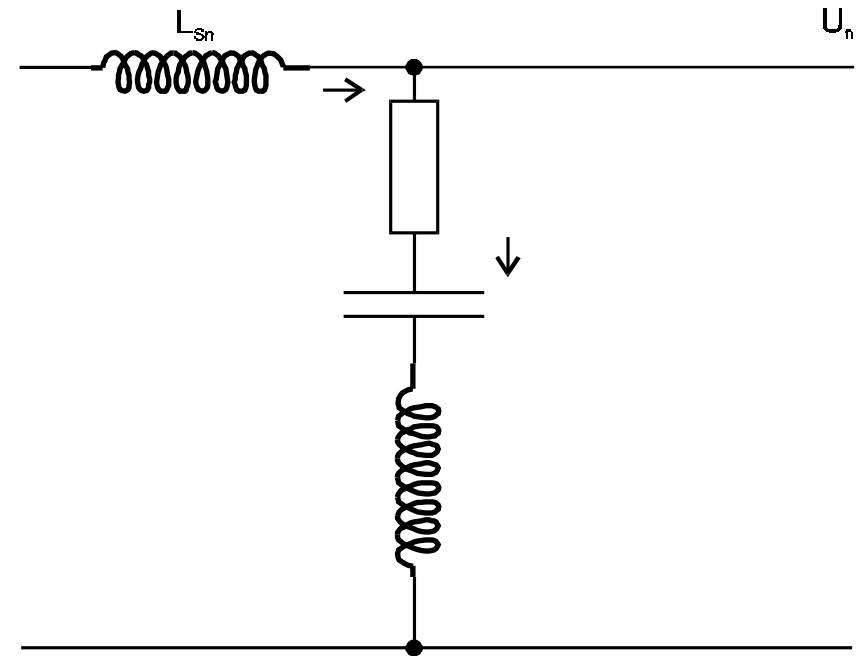
Laser-
Interferometer

Frequenz

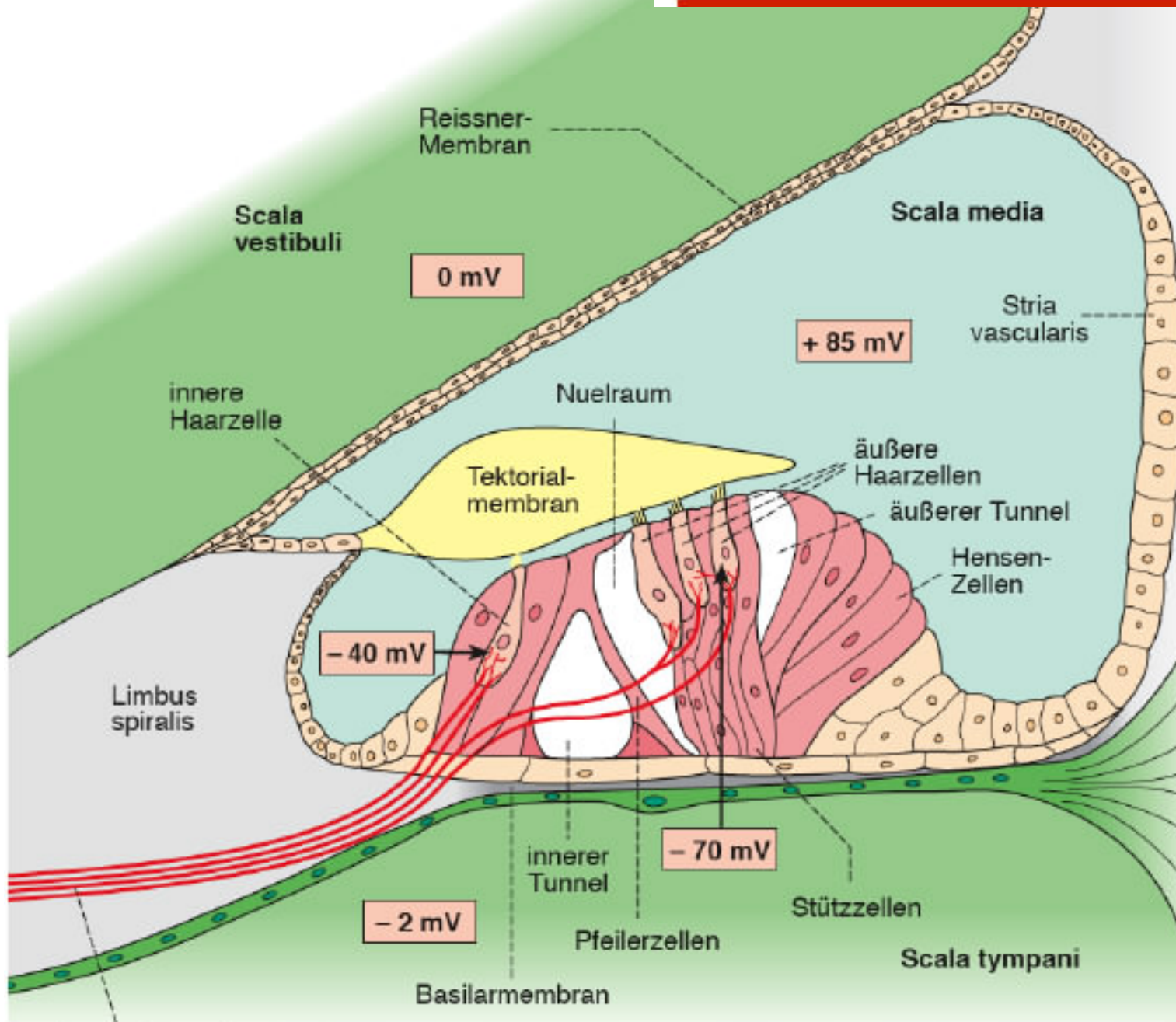
Mechanisches Modell



Elektrisches Modell



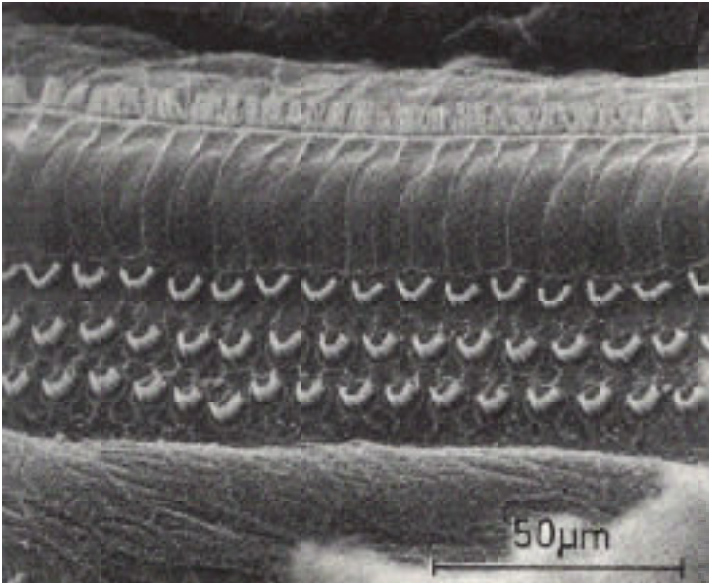
Reizumwandlung



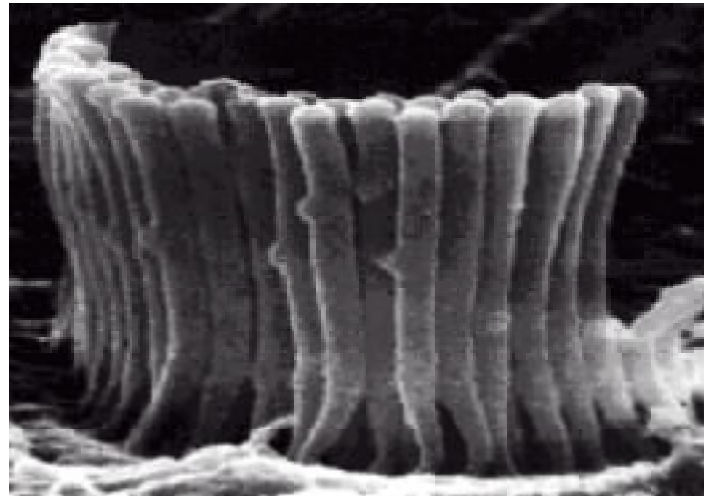
Nervenfasern des
N. cochlearis

Haarzellen

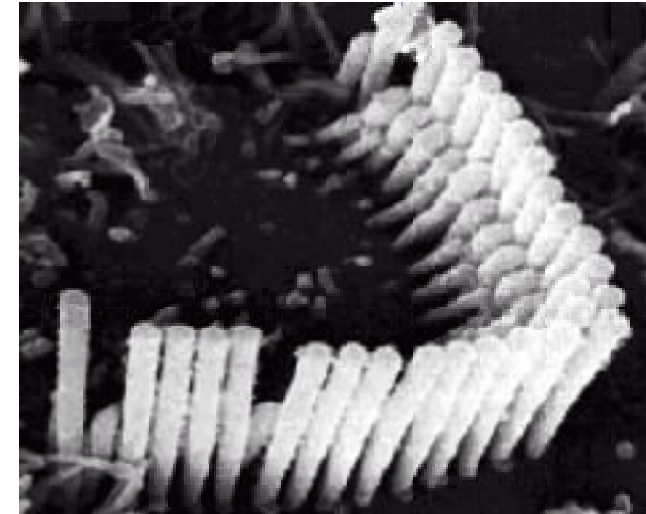
Haarzellen



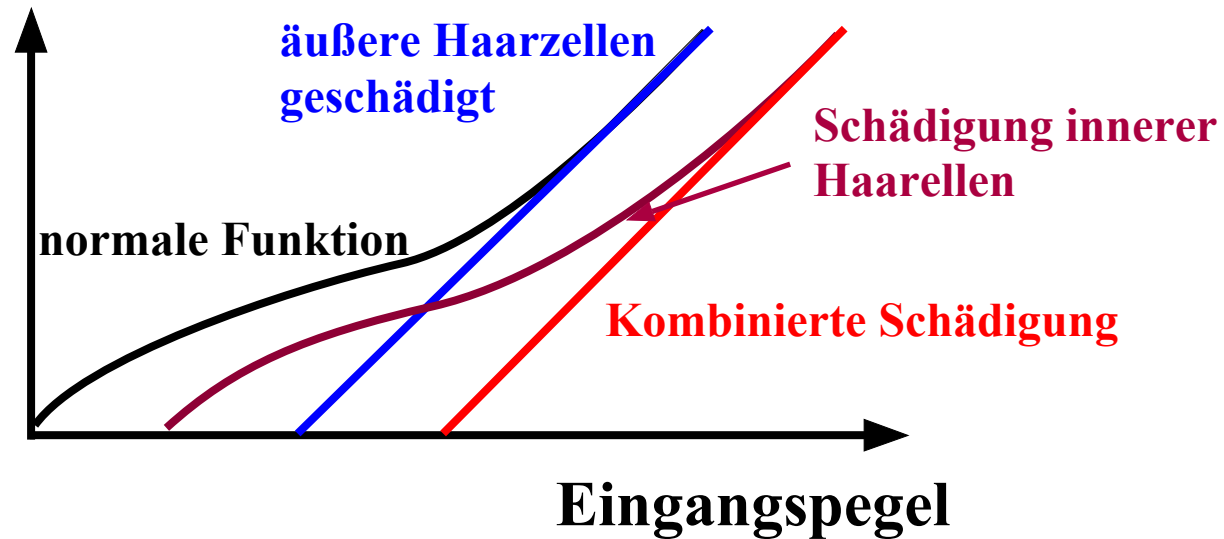
innere Haarzellen



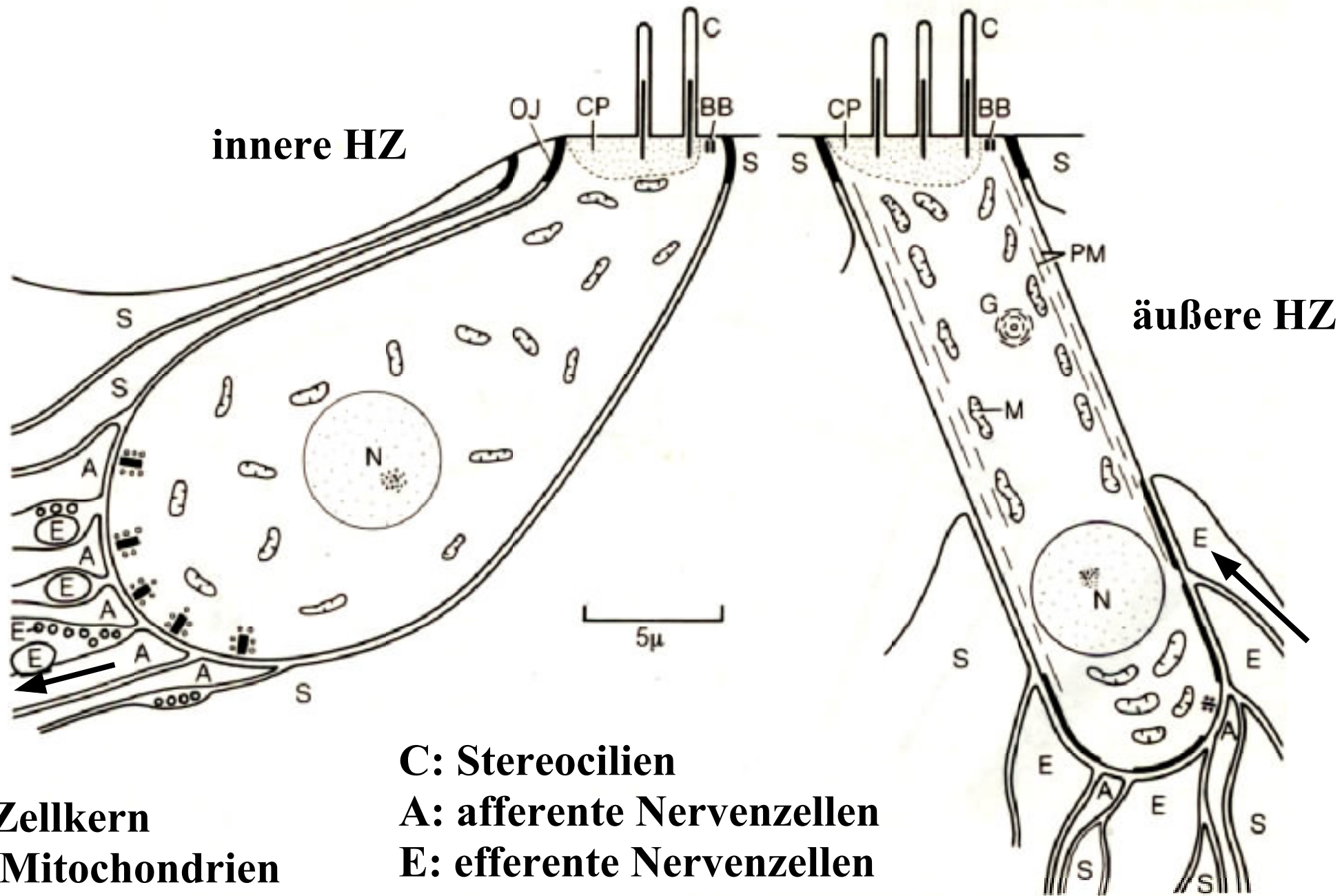
äußere Haarzellen



Auslenkung der Basilarmembran

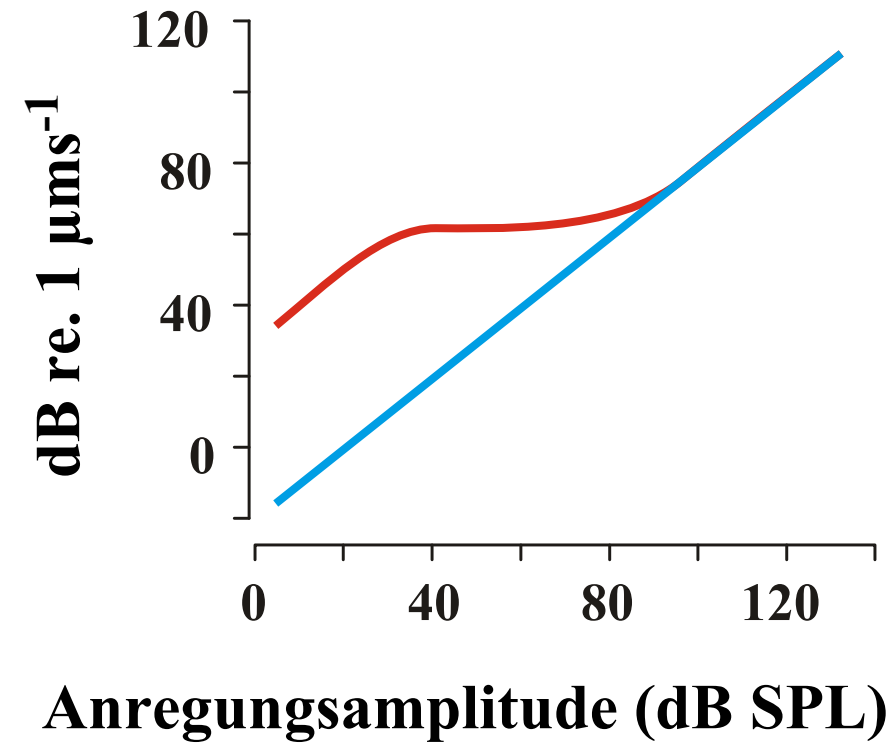
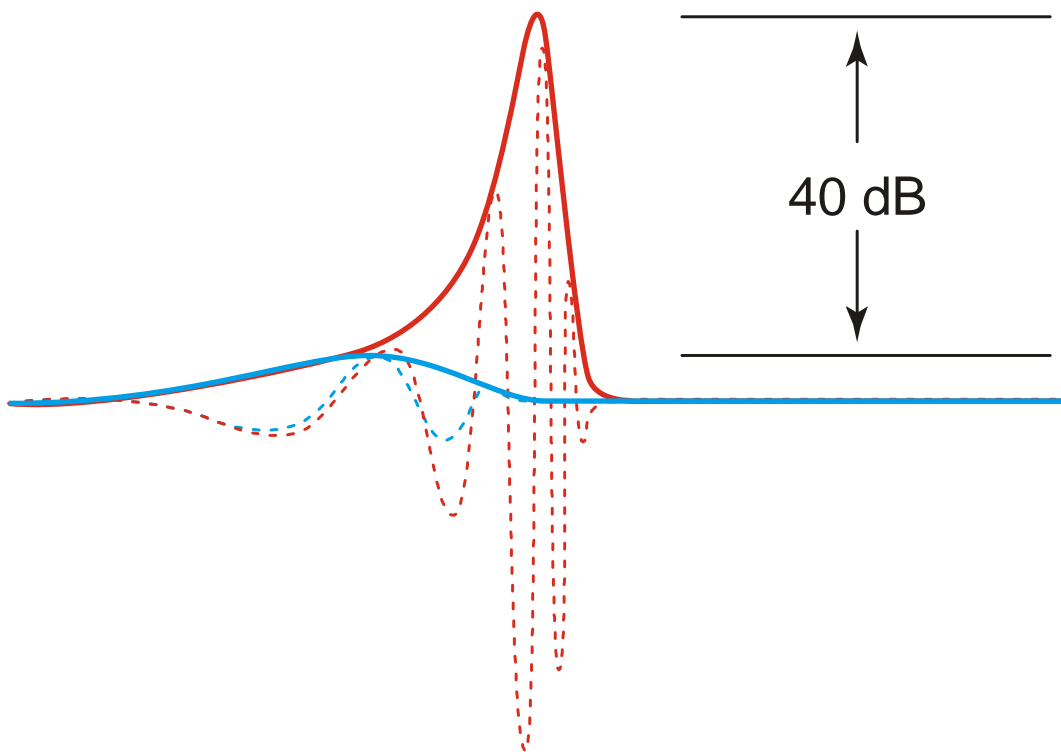


Struktur der Haarzellen



Nichtlinearitäten

Geschwindigkeit der Basilarmembran

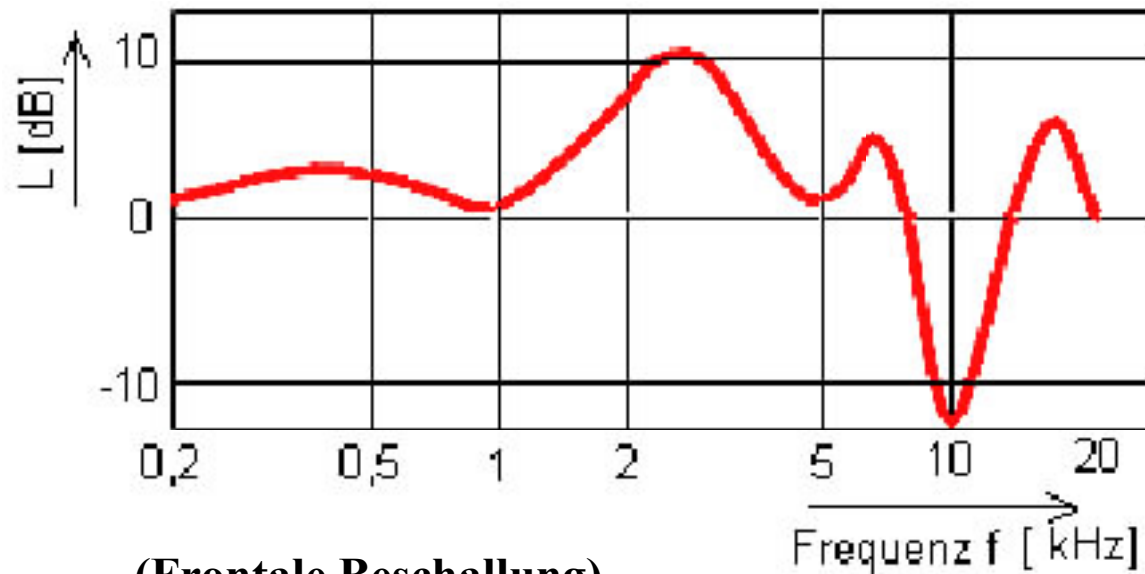


Übertragungsfunktion

Freifeld: Schallfeld ohne Person

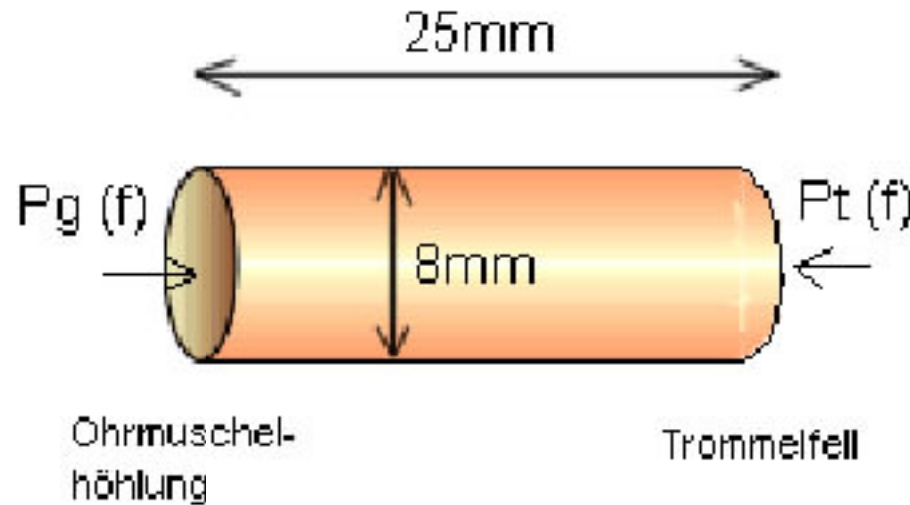
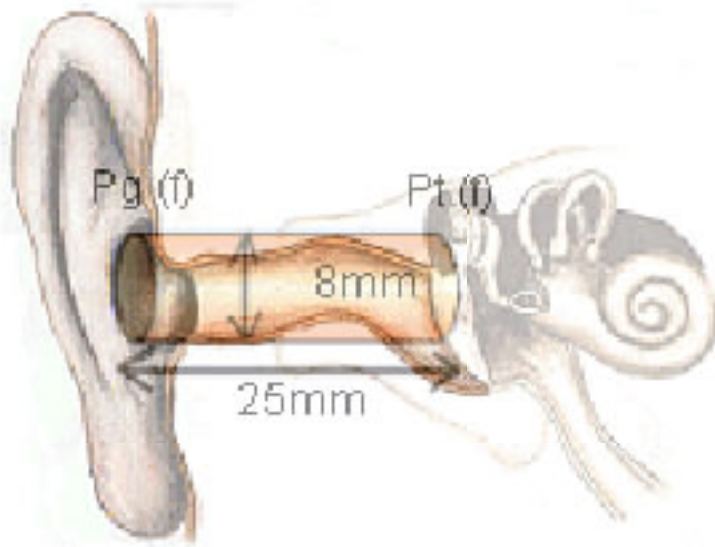
Freifeldübertragungsfunktion =

Unterschied zw. Schallfeldsignal und Ohrsignal

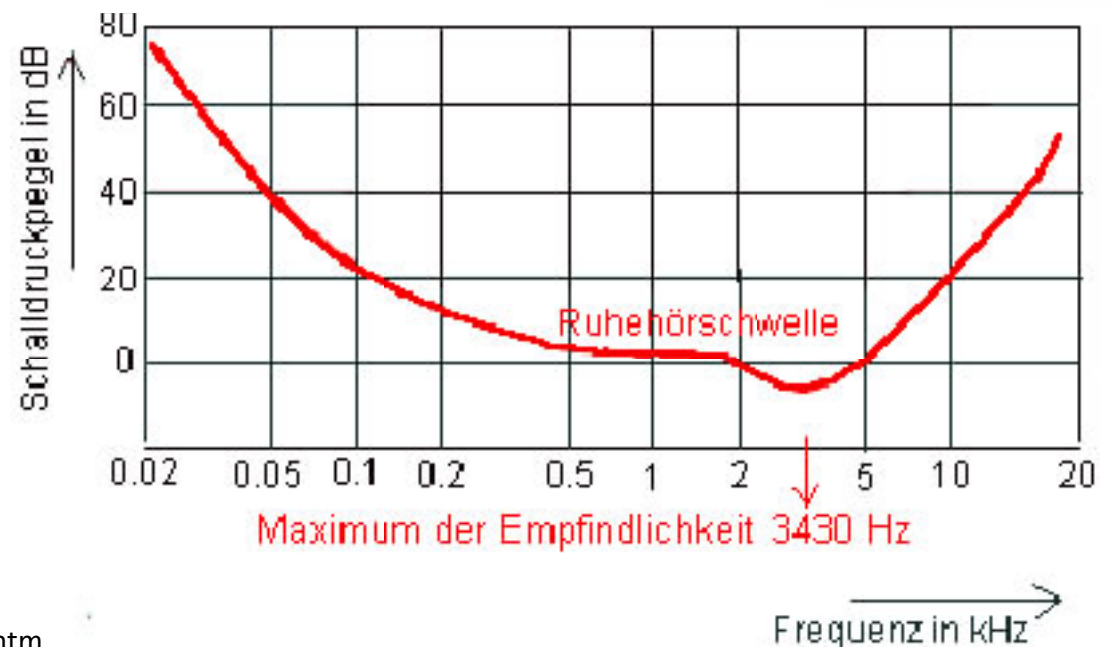


(Frontale Beschallung)

ÜF äußerer Gehörgang

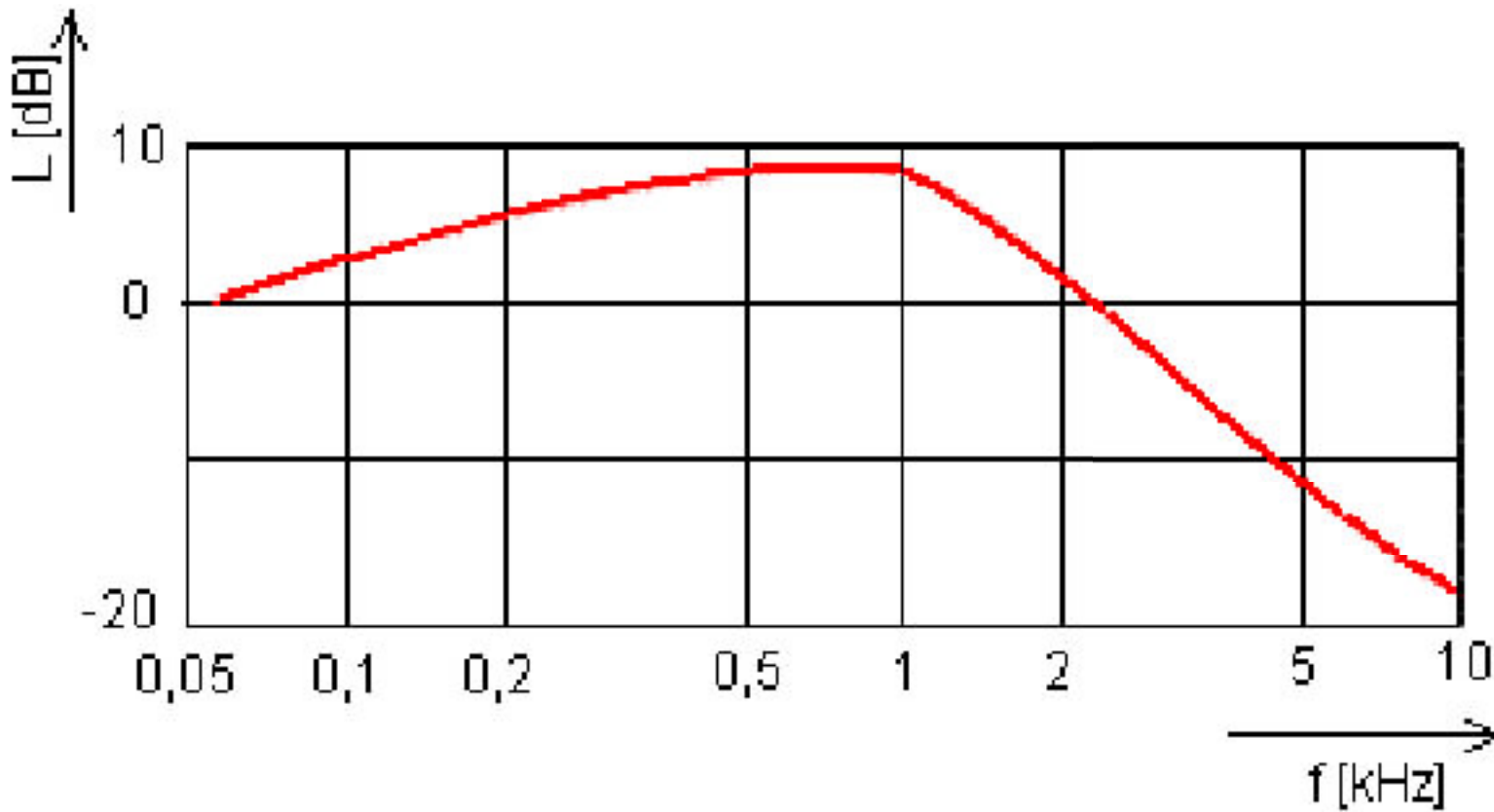


Modell: abgeschlossenes Rohr
=> Frequenzmax. 3430Hz
Zu sehen bei Ruheshwelle
(Min. benötigter Schalldruckpegel)



ÜF Mittelohr

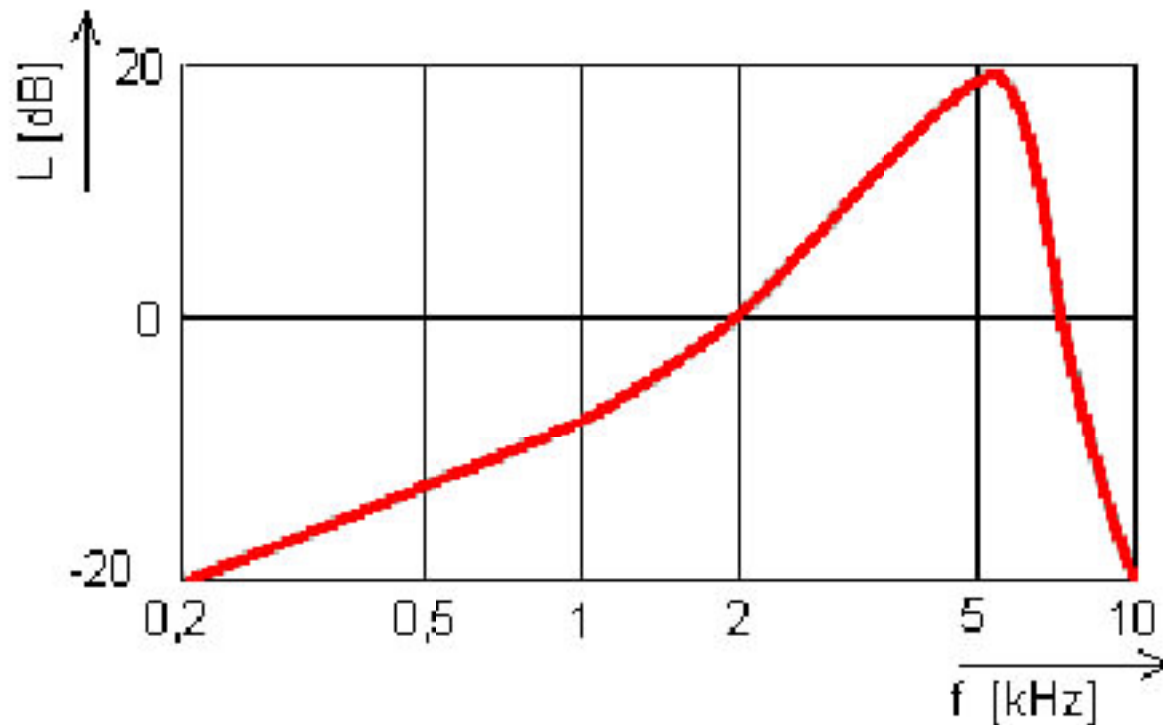
$20 \log(\text{Steigbügelschnelle}/\text{Schalldruck Trommelfell})$
 \approx Tiefpaß; Grenzfrequenz 1500Hz



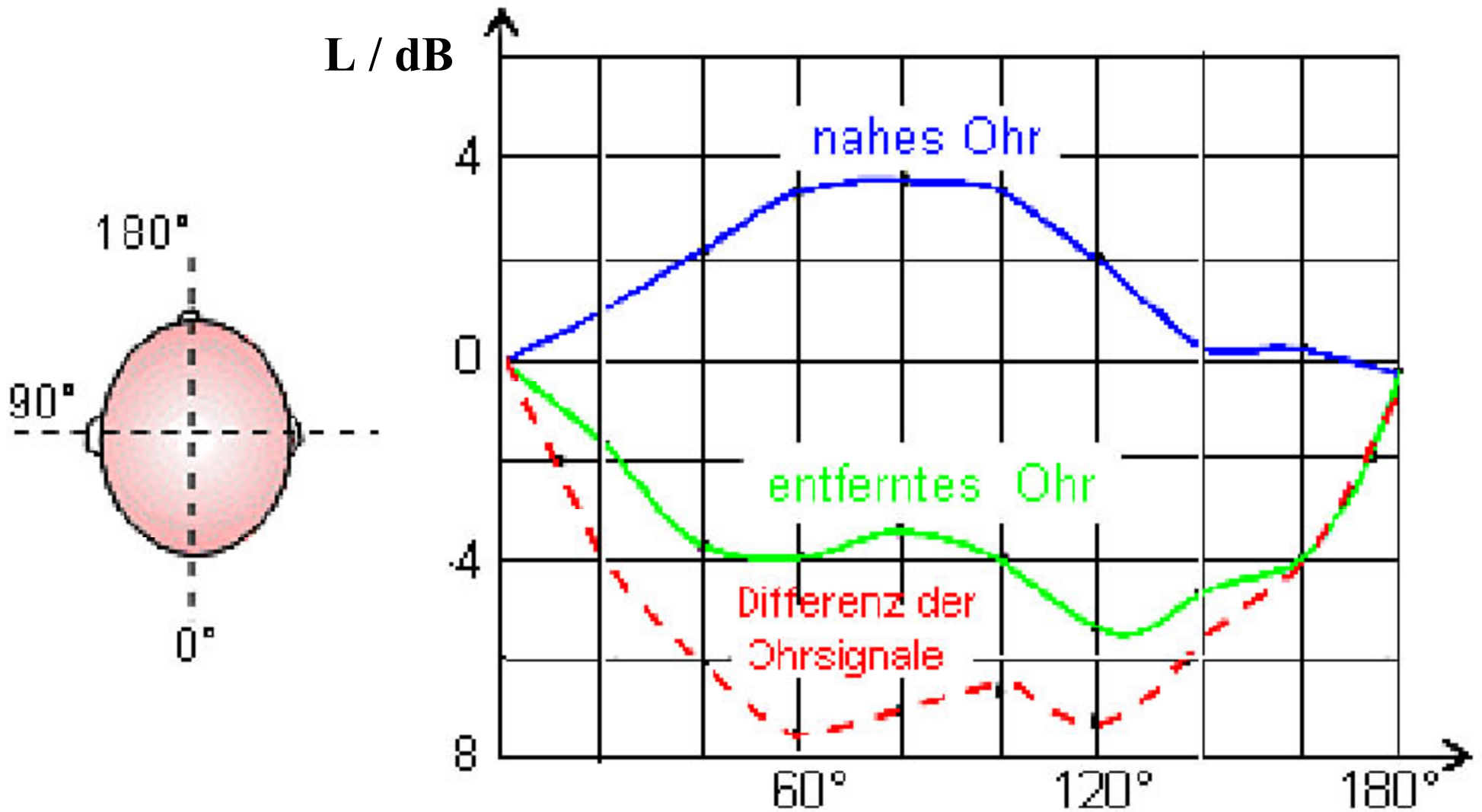
Übertragungsfunktion Innenohr

ÜF Innenohr:

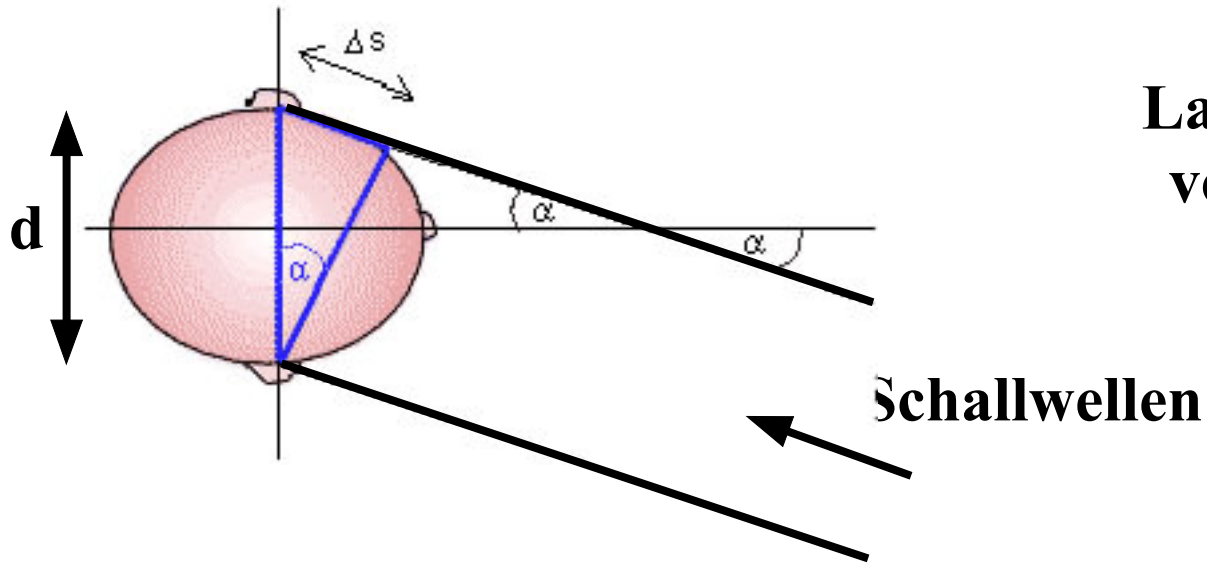
Verhältnis Auslenkung Basilarmembran zu
Auslenkung des Steigbügels im ovalen Fenster
(gemessen an fester Stelle auf Basilarmembran)



Richtungshören



Laufzeitunterschiede



Laufzeitdifferenz wird vom Gehirn erkannt

Winkelabhängigkeit

