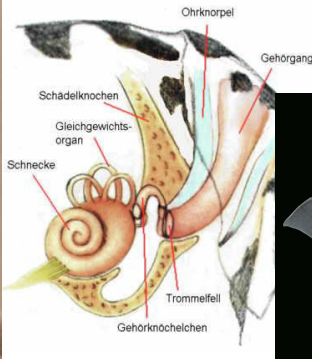
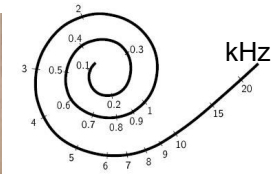


BIOPHYSIK

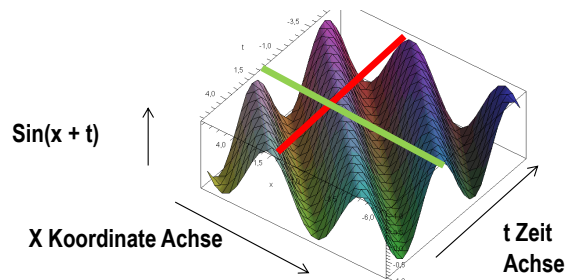
12. Vorlesung

Schall und Gehör

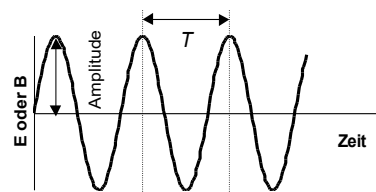


Zeitliche und räumliche Periodizität

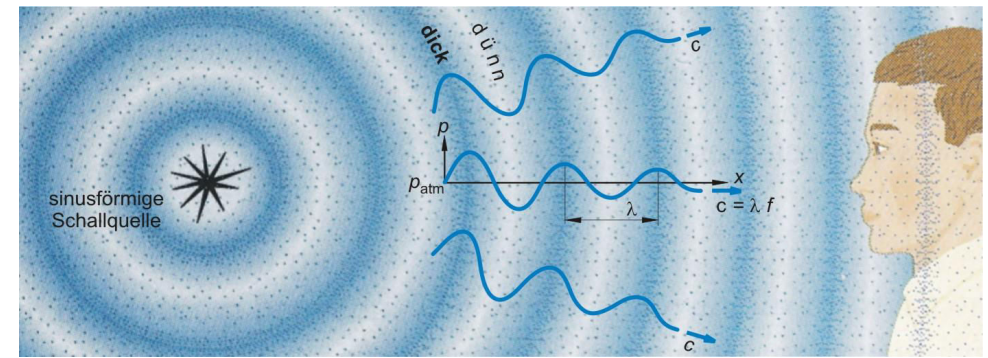
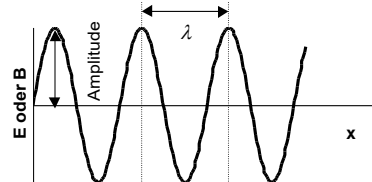
Eine $\sin(x + t)$ Welle, eine Funktion von 2 Variablen $\longrightarrow$ eine Oberfläche



räumlicher Punkt fixiert



zeitlicher Punkt fixiert



Schall – **mechanische** Welle :

periodische Auslenkungen von Materieteilchen breiten sich räumlich in einem (elastischen) Medium aus

– longitudinale Welle

– transversale Welle (nur in Festkörper)

$u(x,t)$: Auslenkung der Materieteilchen,
Dichte-/Druckänderung, (**Schall**)**Druck**

2

Wiederholung von 6. Vorlesung

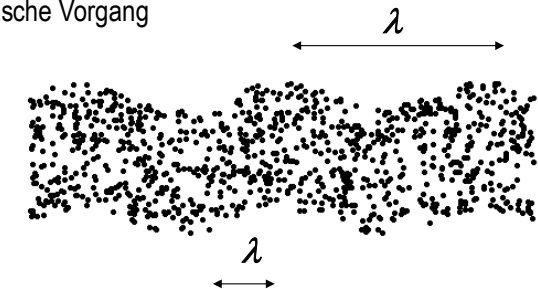
Wellenbewegung

Ausbreitung eines Schwingungszustandes in einem schwingungsfähigen Medium.

Räumlich und zeitlich periodische Vorgang

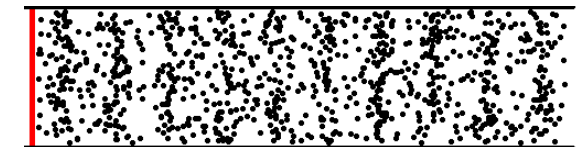
transversale Welle:

Schwingungsrichtung
senkrecht zur
Ausbreitungsrichtung
EM Welle



longitudinale Welle:

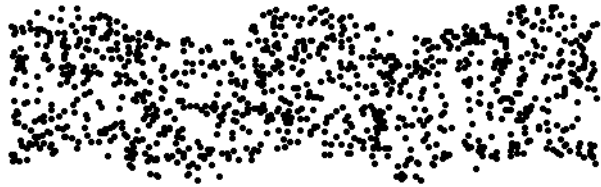
Schwingungsrichtung
parallel zur
Ausbreitungsrichtung
(Druckwellen)



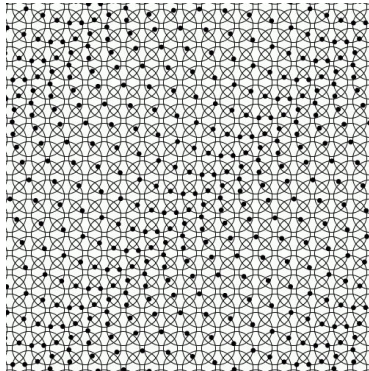
4

Wiederholung von 6. Vorlesung

Beispiel Animation für eine transversale Welle



Beispiel Animation für eine longitudinale Welle



Wiederholung

Physikalische Zusammenhänge

$$I = \frac{\Delta E}{\Delta t \Delta A} \quad \text{Intensität} = \text{Leistungsdichte} = \text{Energiestromdichte}$$

$$I = \frac{1}{Z} p_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{2Z} p_{\text{max}}^2 \quad \text{Zusammenhang zwischen der Intensität und dem Schalldruck}$$

$$\kappa = - \left(\frac{\Delta V}{V} \right) \frac{1}{\Delta p} \quad \text{Kompressibilität: relative Volumenveränderung/Druck}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho \kappa}} \quad \text{Schallgeschwindigkeit determiniert durch die Dichte und Kompressibilität des Mediums}$$

6

Wiederholung

Absorption und Reflexion von Schallwellen

Absorptionsgesetz: $I = I_0 e^{-\mu x}$, $\mu = \mu(Z, f)$
vgl.: Lichtabsorption, Ultraschallabsorption

Reflexion: Snellius-Descartes Gesetz
vgl.: Lichtabsorption, Ultraschallabsorption

Reflexionsvermögen:

$$R = \frac{I_{\text{refl}}}{I_{\text{einfall}}} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2, \quad Z = \rho c : \text{akustische Impedanz} \\ \text{Wellenwiderstand}$$

ρ : Dichte, c : Schallgeschwindigkeit

Echoortung von Fledermäusen



7

Wiederholung

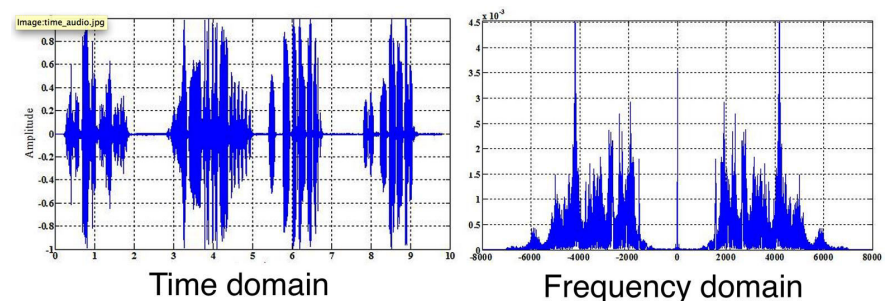
Über Signalverarbeitung

Es gibt zwei äquivalente Darstellung von Signalen/Tönen:

Zeitraum

oder

Frequenzraum

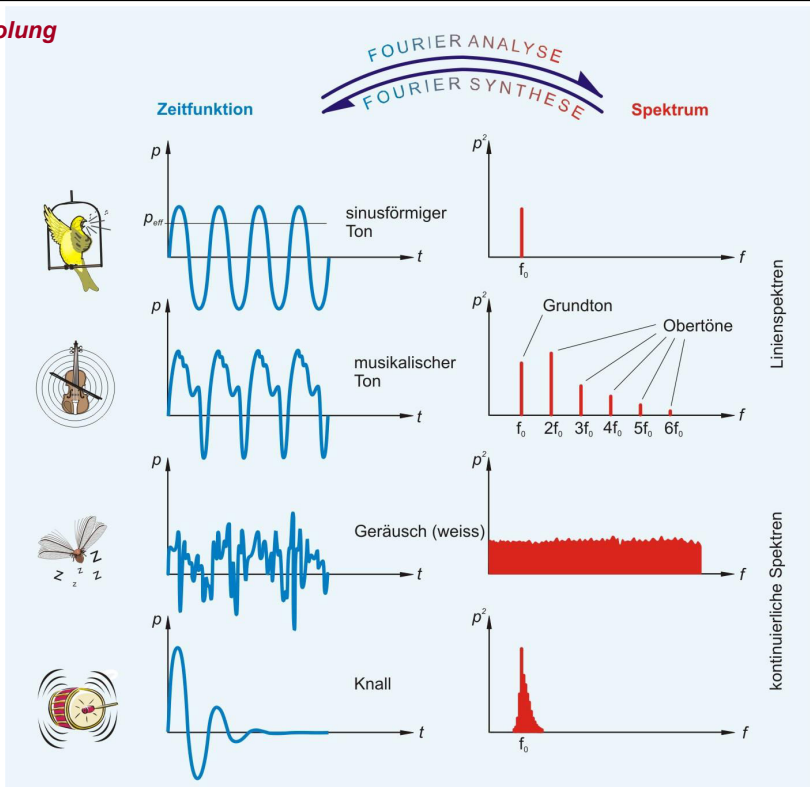


x-Achse: Zeit
Hz [s⁻¹]

[s]
Fourier Analyse
Fourier Synthese

Frequenz in

8



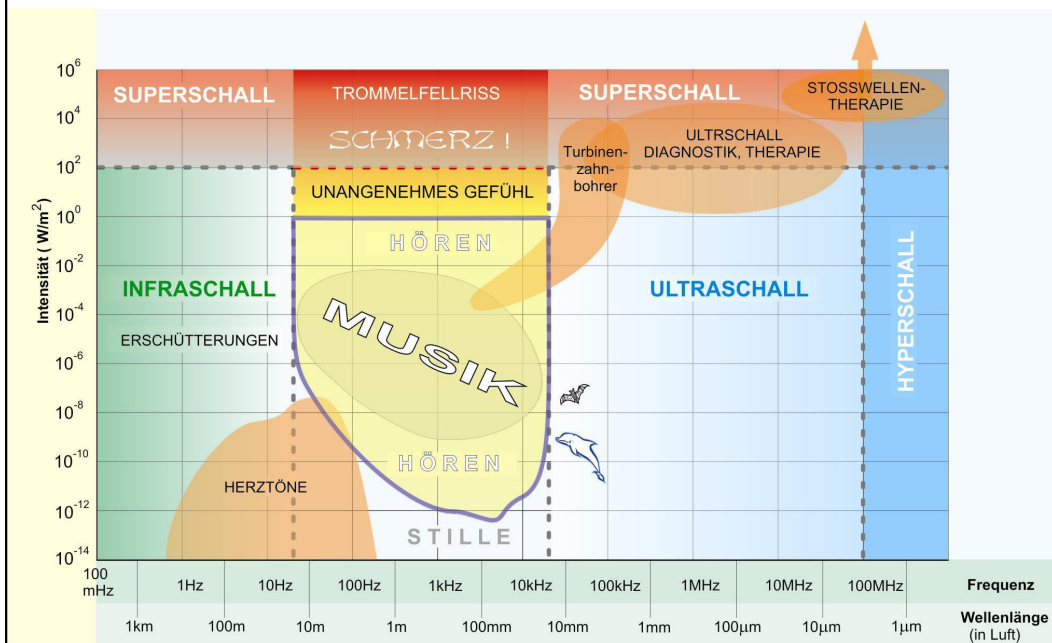
9

Charakteristiken des Reizes und der Empfindung

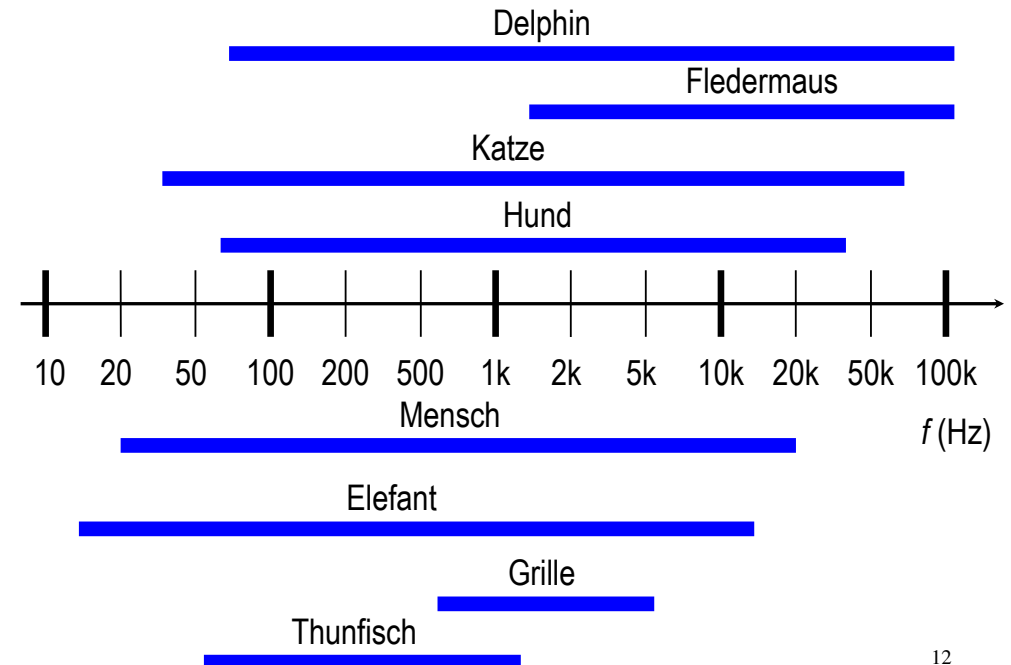
Physik (Reiz)	Physiologie (Empfindung)
Intensität, I (W/m^2)	Lautstärke, L (phon, sone)
Grundfrequenz	Tonhöhe
Obertöne (Spektrum)	Klangfarbe

10

Frequenz und Intensität System



Einteilung nach der Frequenz



12

Hörorganen von Octopus

Octopusse haben keine Hörorganen und erzeugen keine Töne :(



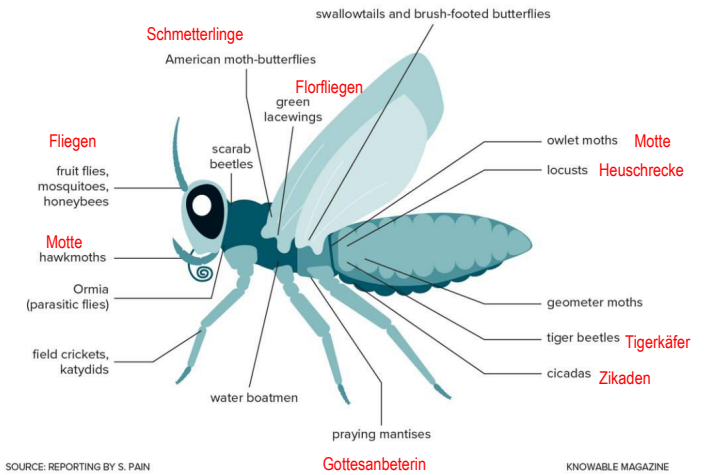
<https://octopusworlds.com/octopus-senses/>

Hörorganen von Insekten 1

Ergänzungsmaterial

Verschiede Insekten haben verschieden Hörorganen, im Körper

Here an ear, there an ear, everywhere an ear
Where hearing organs reside on various insects



SOURCE: REPORTING BY S. PAIN

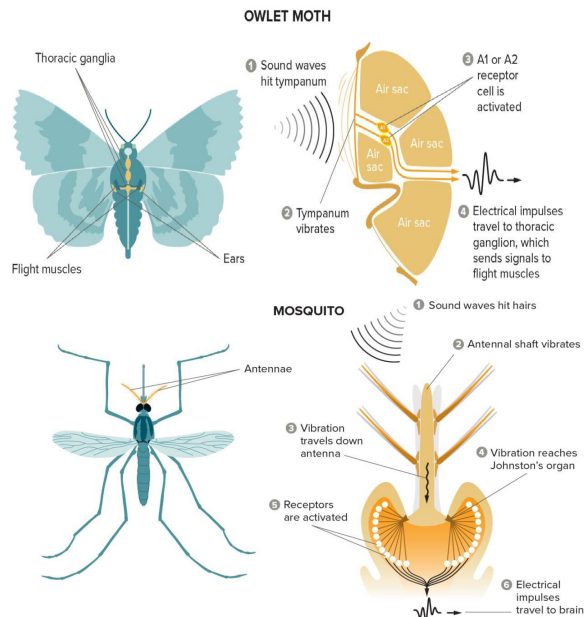
KNOWABLE MAGAZINE

<https://www.scientificamerican.com/article/awesome-ears-the-weird-world-of-insect-hearing/>

Hörorganen von Insekten 2

Ergänzungsmaterial

Zwei Beispiele:



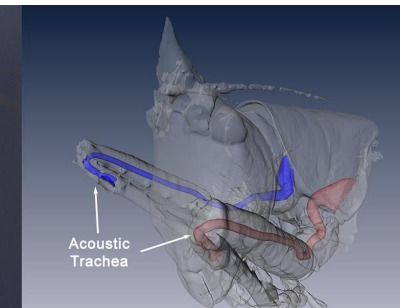
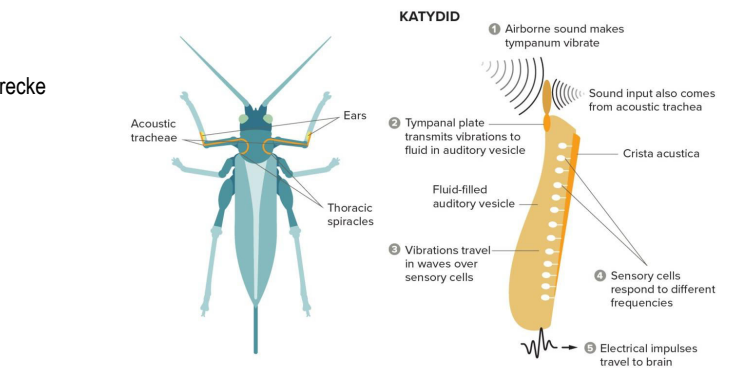
<https://www.scientificamerican.com/article/awesome-ears-the-weird-world-of-insect-hearing/>

Hörorganen von Insekten 3

Ergänzungsmaterial

noch ein Beispiel:

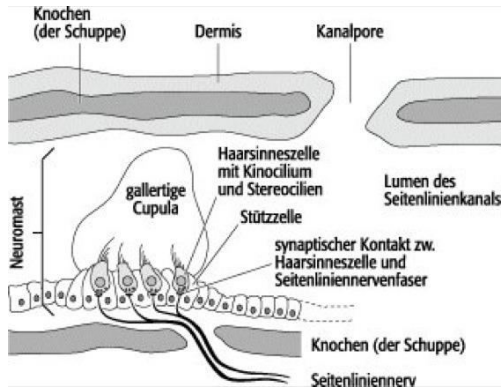
Amerikanische Heuschrecke



Hörorganen von Fische

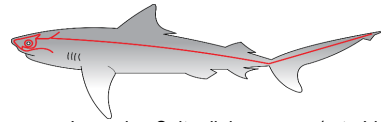
Seitenlinienorgane sind Hautsinnesorgane bei „niederen Wirbeltieren“ (Anamnia) und dienen der Exterozeption (Außenwahrnehmung) im Wasser

Aufbau:

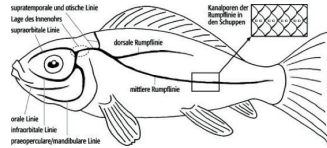


<https://de.wikipedia.org/wiki/Seitenlinienorgan>

<https://faculty.weber.edu/rmeyers/Placode%20evolution.pdf>



Schema zur Lage des Seitenlinienorgans (rote Linien) bei einem Hai



Glatter Krallenfrosch (Xenopus laevis) mit Seitenlinienorgan, sichtbar an den länglichen, weißen Hautpapillen

Einteilung nach der Intensität

Geräuschquelle	I (W/m ²)	n (dB)
Raketenstart	10^6	180
startender Düsenjet	10^2	140
Schmerzgrenze	$10^0 = 1$	120
Maschinenraumlärm	10^{-3}	90
laute Radiomusik	10^{-4}	80
normales Gespräch	10^{-7}	50
Flüstern	10^{-10}	20
Hörschwelle (Mensch)	10^{-12}	0

n : (Schall)intensitäts-Pegel

$$n = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0} \text{ dB, wo } I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Wiederholung

Grösse (und Einheit), die für die Vergleichung der Maße der Signale verwendet wird:

Bel-Zahl: n
(nach A. Bell)

(nach A. Bell)

Einheit von n : Bel (B)

$$n = \lg \frac{P_2}{P_1} \text{ B} = \lg \frac{I_2}{I_1} \text{ B} = \lg \frac{E_2}{E_1} \text{ B}$$

Zehnerlogarithmus des Quotienten von zwei Leistungen (oder Intensitäten, oder Energien)

Lautstaerke

Wird in decibel gemessen

Minimal hörbare Druckunterschied

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ dB}$$

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

- Hörpegel: 0dB, 20 μPa , eine Mücke von 3m
- Im Luft über 85 dB ist schon schaedlich
- Fensterglas bricht beim 163 dB
- Trubinenflugzeug 133 dB, von 33 meter
- In normal Luft (neben $p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$) maximal 194.09 dB messbar sonst Stosswellen

Psychophysikalische Gesetze

Wie hängt die Lautstärke (Empfindungsstärke) von der Intensität (Reizstärke) ab?

Weber-Fechner Gesetz:

$$L \sim \log I \quad \left(L \sim L_0 \log \frac{I}{I_0} \right)$$

L : Lautstärke, Einheit: phon

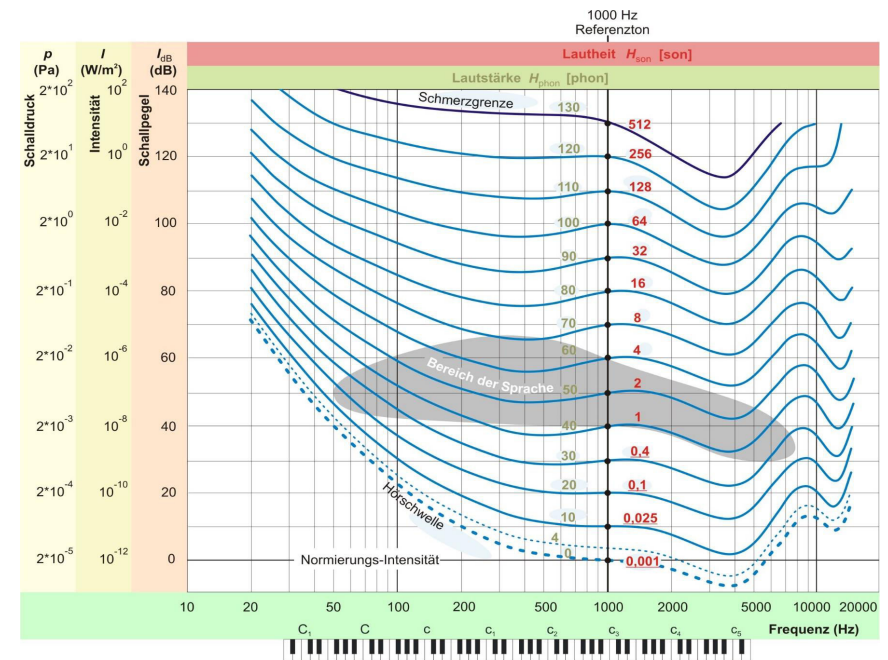
Stevens Gesetz:

$$L^* \sim I^k \quad \left(L^* \sim L_0 \left[\frac{I}{I_0} \right]^k \right)$$

L^* : Lautheit, Einheit: sone

21

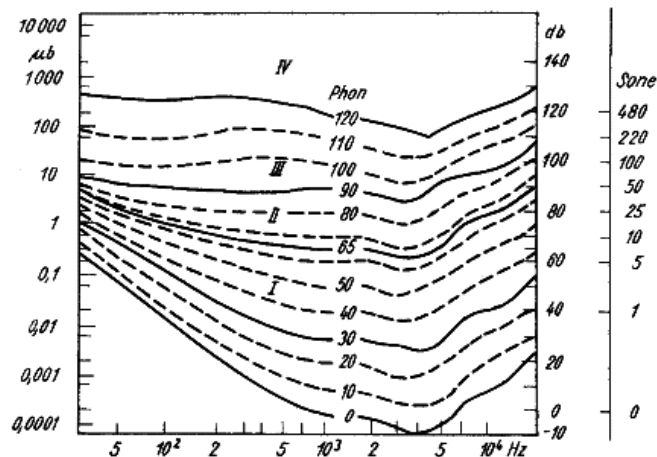
Kurven gleicher Lautstärke des menschlichen Ohres



Fletcher-Munson J. Acoust. Soc Am. 5, 82-108 (1933).

22

Phon und Sone



Hörfäche des menschlichen Gehörs (Beziehungen zwischen Schalldruck ($\mu\text{bar} = \mu\text{b}$) Schallstärke (Dezibel = db), Lautstärke (Phon) und Lautheit (Sone) nach FLETCHER und MUNSEN)

23

Audiometrie – Audiogram

subjektive Schwellenaudiometrie:

die Messung der bei einer gegebenen Frequenz kleinsten Intensität, die zur Auslösung der Tonempfindung nötig ist.

Hörschwelle: die Darstellung dieser Kurve

Hörschwellenkurve: 0 phon

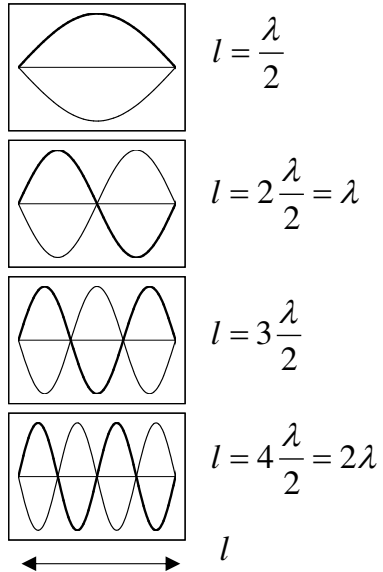
objektive Audiometrie: mit Hilfe von EEG-Signal

Audiogram: die Bestimmung der Abweichung der Hörschwellenkurve der Versuchsperson von der normalen Hörschwellenkurve

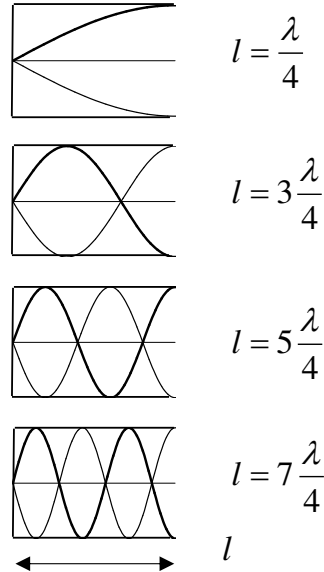
24

Stimmgebung mit einfachen Systemen

Saite-Eigenschwingungen



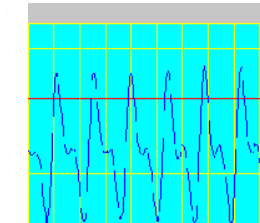
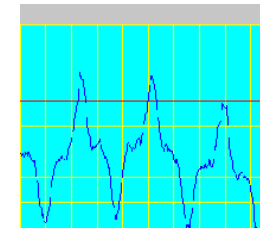
Hohlresonator



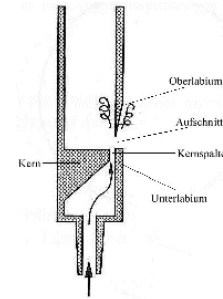
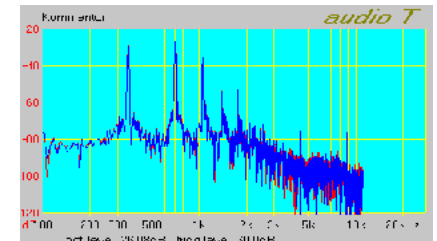
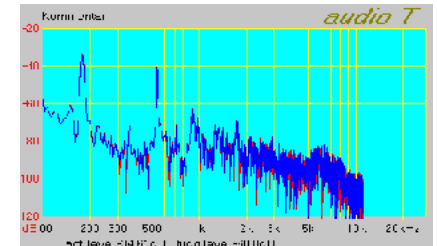
25

Einfaches Musikinstrument

die Zeitfunktion

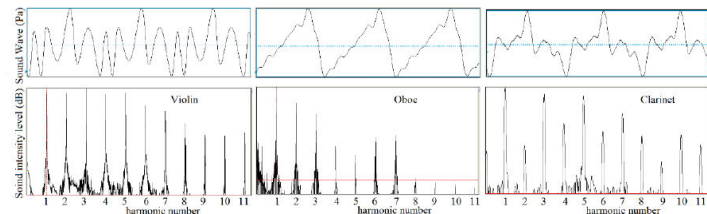
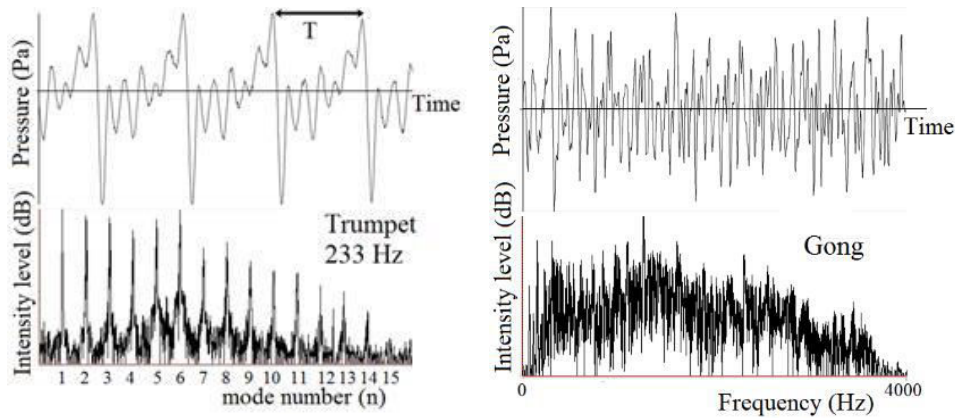


das Spektrum



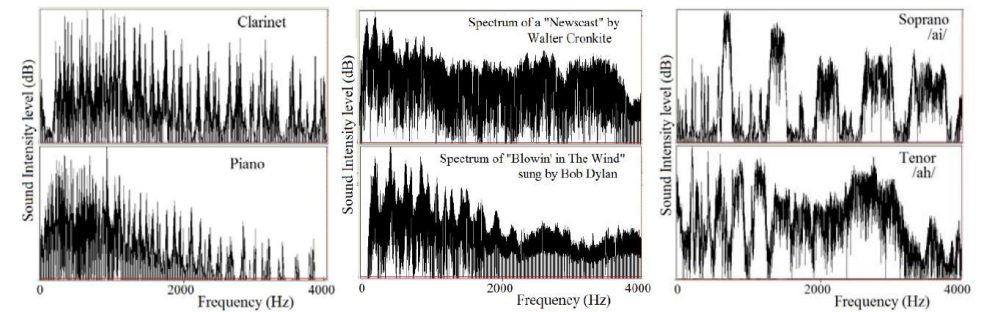
26

Reele Musikinstrumente



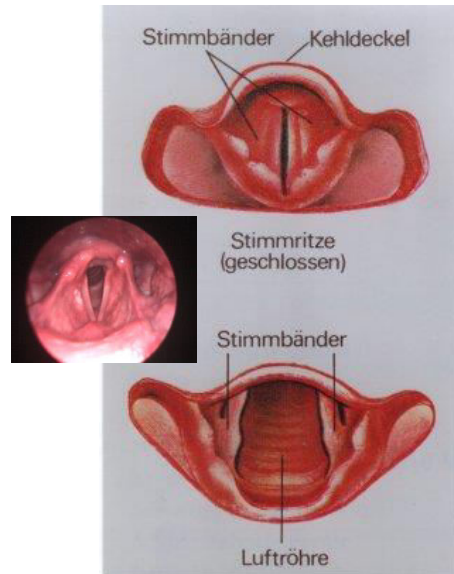
27

Reele Musikinstrumente + Singen



28

Stimmgebung mit den Stimmbändern



Stimmritze, die von zwei Membranen, den Stimmbändern begrenzt ist

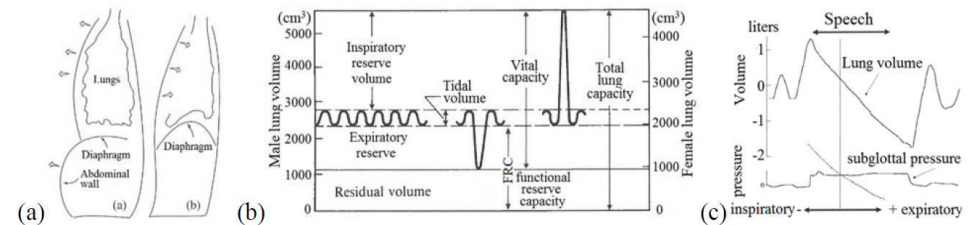
bei normaler Atmung ist die Stimmritze weit geöffnet

bei Stimmgebung rücken die Stimmbänder zusammen, die Atemmuskulatur bewirkt eine Erhöhung des Luftdruckes
 > leichte Erweiterung der Stimmritze
 > Druckabfall
 > Verengung der Stimmritze ... usw.

29

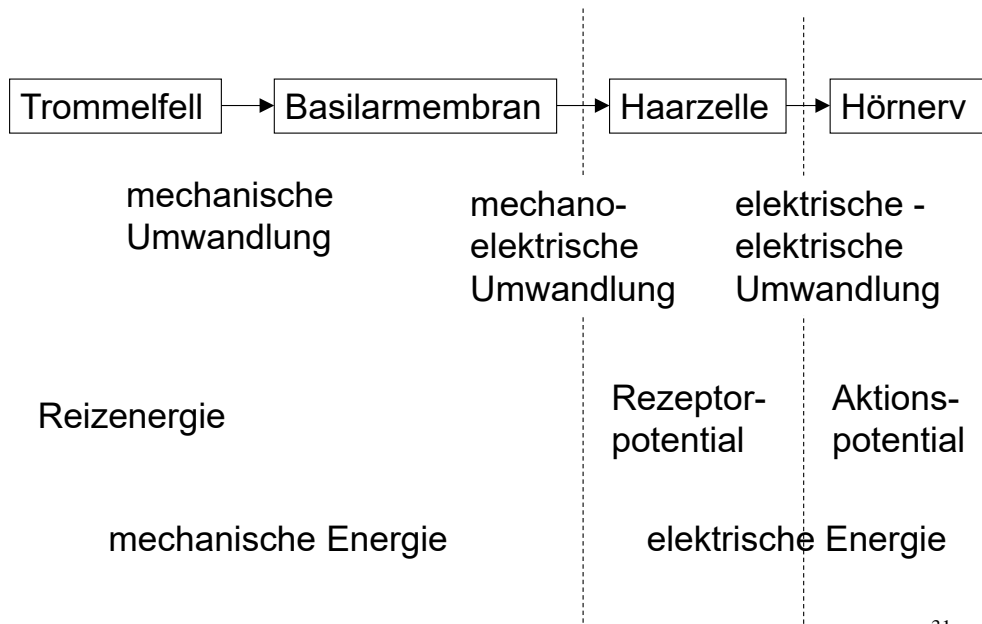
Menschliche Lunge beim Sprechen

Ergänzungsmaterial



Category of functions	Volume (cm ³)	
	In men	In women
Inspiratory reserve volume (IRV)	3100	1900
Tidal volume (TV)	500	500
Expiratory reserve volume (ERV)	1200	700
Vital capacity (VC=IRV+TV+ERV)	4600	3100
Residual volume (RV)	1200	1100
Functional Residual capacity (FRC=ERV+RV)	2400	1800
Total lung capacity (TLC=VC+RV)	5800	4200

Signalumwandlungen bei Gehör



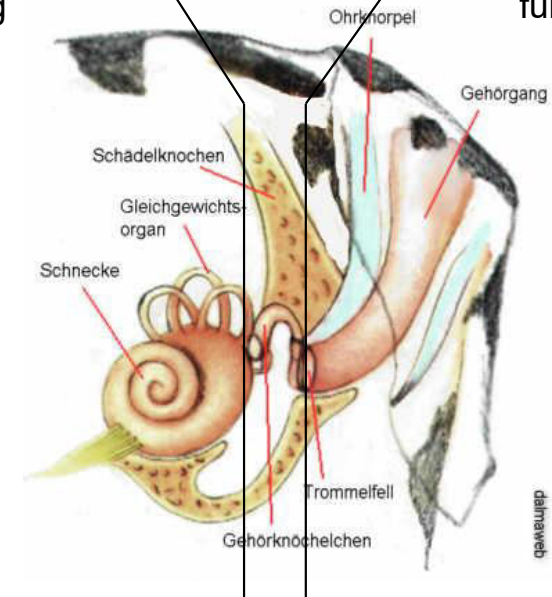
31

Innenohr
Schall-empfindung

Mittelohr
Impedanzanpassung

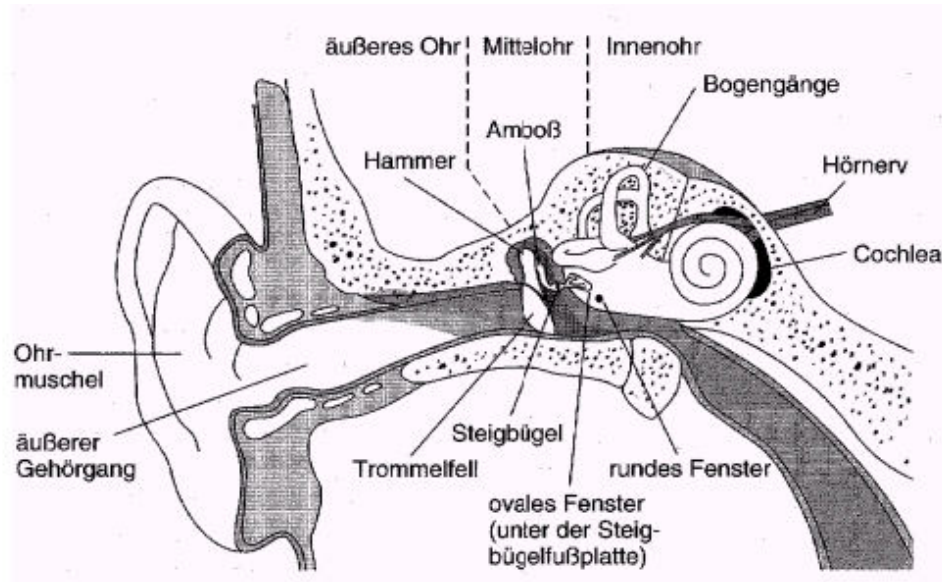
Aussenohr
Resonator-funktion

Das Ohr



32

Das menschliche Ohr



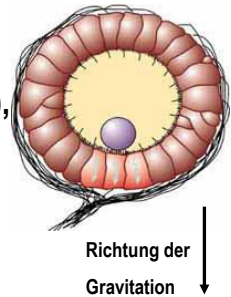
33

Statocysten sind Gleichgewichtsorgane bei wirbellosen Tieren

die aus einer mit Flüssigkeit gefüllten Blase bestehen, in welcher ein oder mehrere Statolithen (Kalk oder Sandkorn) liegen



Schema einer Statozyste:
Rezeptorzellen (rot), Statolith (blau),
Sensible Nervenfasern (schwarz)

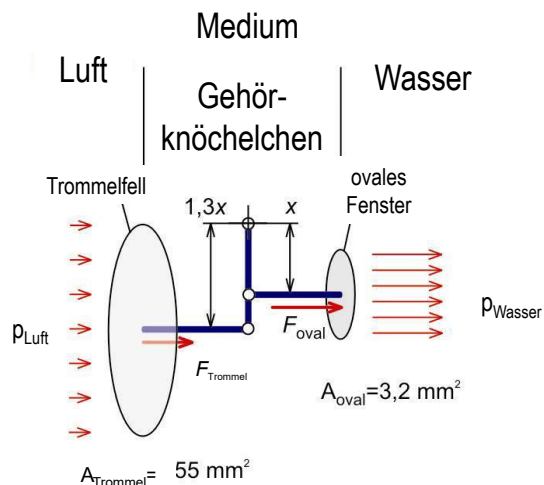
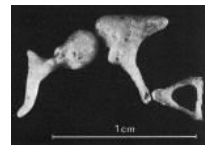


Statolithen, Otolithen („Ohrsteine“), Otokonien
oder Statoconia sind mikroskopisch kleine
Körnchen Steine

Neil A. Campbell: **Biology**. Pearson Benjamin Cummings, San Francisco 2008, ISBN 978-0-321-53616-7, S. 1092

<https://de.wikipedia.org/wiki/Statolith> <https://de.wikipedia.org/wiki/Statocyste>

Funktion von Gehörknöchelchen



Druckvergrößerung:
(Hebel +
Flächenverkleinerung)

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

35

Mittelohr als Impedanzanpasser

$$R = \frac{I_{refl}}{I_{einfall}} = \left(\frac{Z_{Wasser} - Z_{Luft}}{Z_{Wasser} + Z_{Luft}} \right)^2 = 0,9989$$

wegen der grossen Impedanzdifferenz
von Luft und Wasser die Intensität in
Wasser wäre 0,0011-mal kleiner als die
Intensität in Luft

$$\frac{I_{Wasser}}{I_{Luft}} = \frac{\frac{p_{Wasser}^2}{Z_{Wasser}}}{\frac{p_{Luft}^2}{Z_{Luft}}} = \left(\frac{p_{Wasser}}{p_{Luft}} \right)^2 \frac{Z_{Luft}}{Z_{Wasser}} = (22,3)^2 \frac{414}{1,5 \cdot 10^6} = 0,137 < 1$$

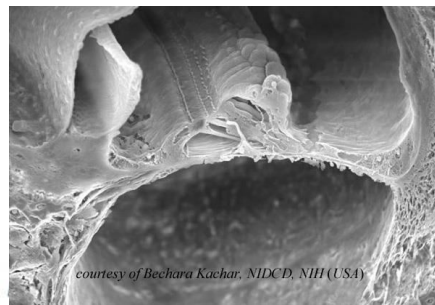
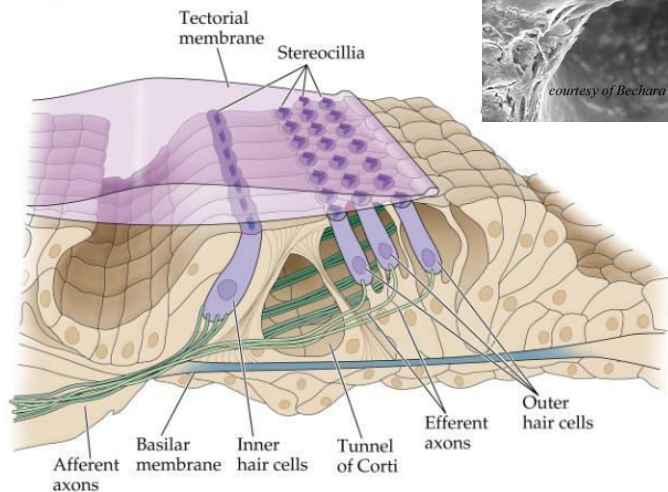
wegen der Druckvergrößerung
13,7% der Intensität geht durch

Impedanzanpassung
(0,137 / 0,0011 = 125)

36

Das Corti Organ

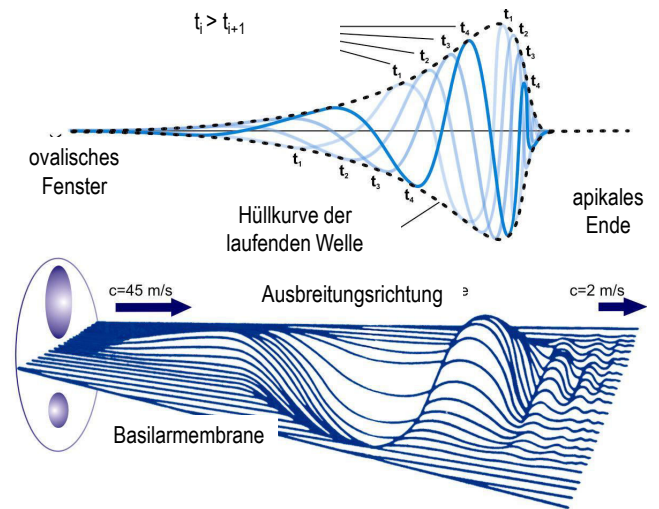
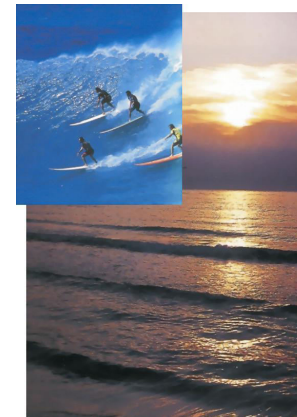
Organ of Corti



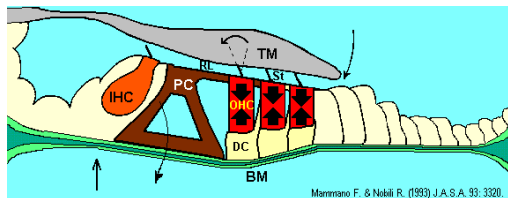
© 2001 Sinauer Associates, Inc.

37

Bewegung der laufenden Wellen auf der basilaren Membran

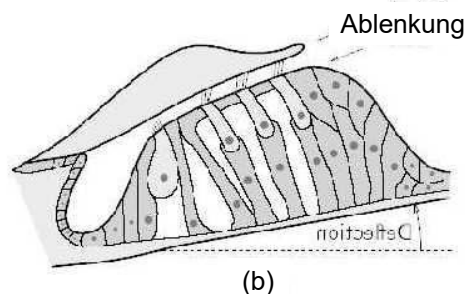
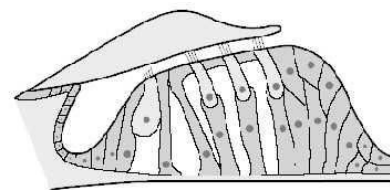
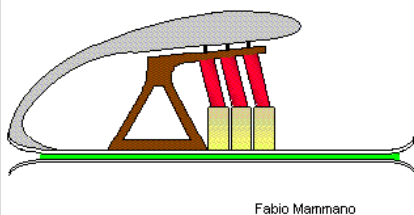


38



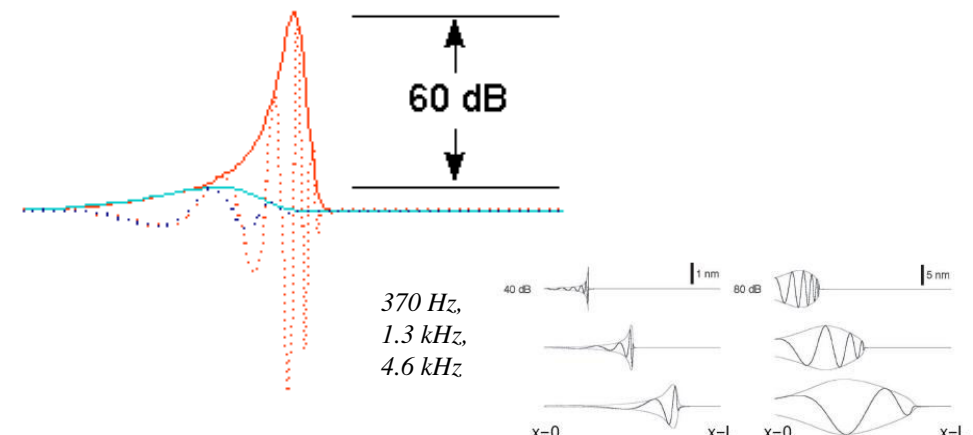
Mammiano F. & Noll R. (1993) J.A.S.A. 93: 3320

Modell:



39

Modell heutzutage: Frequenzanalyse + aktiver nichtlinearer Filtereffekt



regenerativer Verstärker :
Mitkopplung
(grosse Verstärkung in einem engen Frequenzbereich)

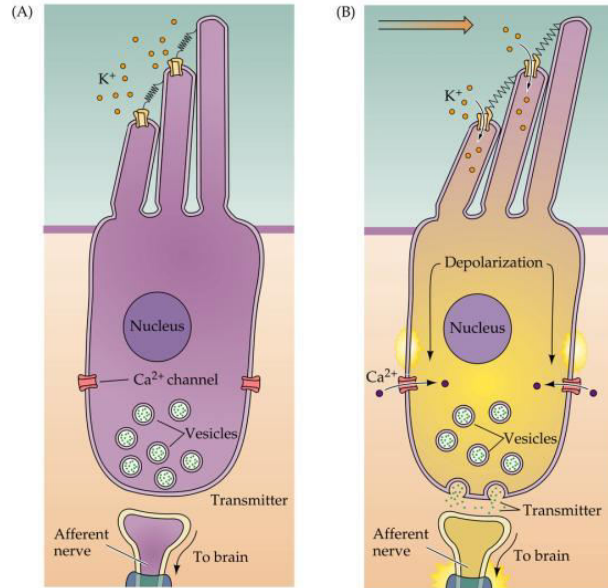
40

Haarzellen, als Mechanotransduzern

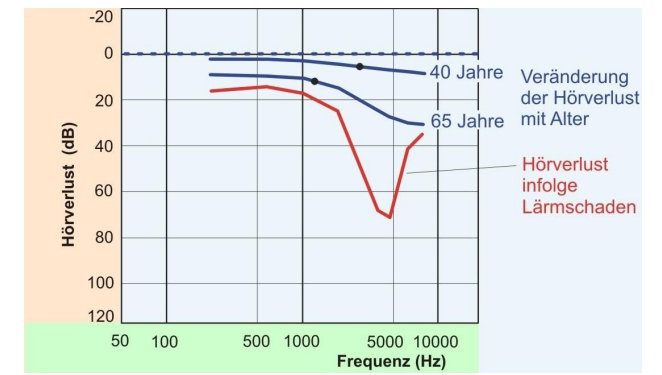
Auslenkung
der Cilien

Öffnung der
Ionenkanäle

AP Impulse
in die
Richtung des
Gehirns



Gehörverlust



Haarzellen
von Meer-
schweinchen

normale Bedingungen



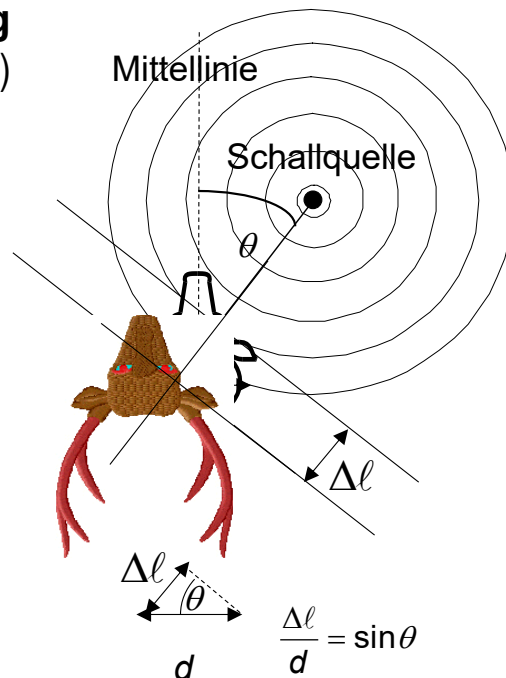
Bestrahlung (120 dB, 24 h)

Richtungsbestimmung (zweiohriges Richtungshören)

Bestimmung der zeitlichen
Verzögerung (Δt) des
Empfangs ein und
derselben
Schallwellenkomponente
zwischen beiden Ohren

$$\Delta t = \frac{\Delta \ell}{c} = \frac{d \sin \theta}{c}$$

d : Abstand der Ohren



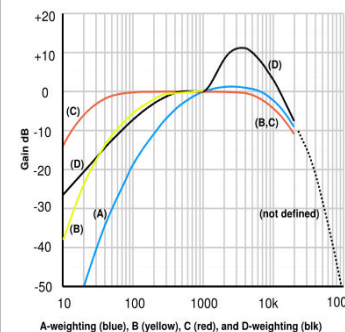
Ergänzungsmaterial

Lärm, Lärmschutz

Allgemeine Definition: Lärm, Ein Signal das keine Information betraegt

Akustische Definition: Geräusch, Unerwünschte Klangeffekte,

wird gemessen



A für klare Fletcher-Munsen Stimme bis 40 phon

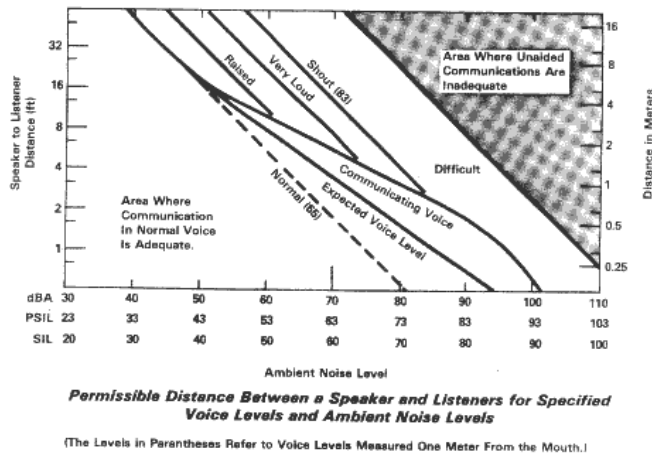
IEC179 Norm

B,C für Lautere Faelle, selten benutzt

D, für Flugzeuge

Lärm, Lärmschutz-Kommunikation

Figure 6.3



Wichtig beim Armee, Marine,

Im Flugzeug im cockpit 88dB ist zuviel

45

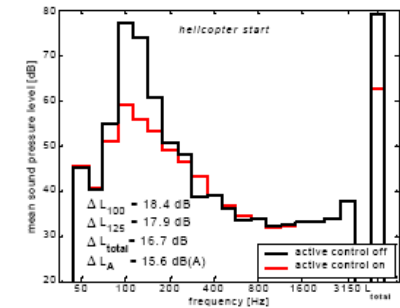
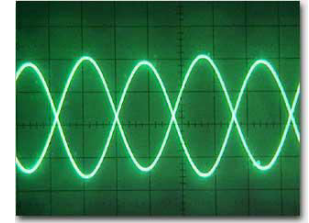
Zusammenfassung

- Schall und Gehör
- Musikinstrumente, Menschliche Ohr
- Lärm, Lärmschutz
- Nützliche Links: Neurophysiologie – Das auditorische System
- <https://www.youtube.com/watch?v=n959TVHAoBA>

47

Aktiver Lärmschutz

- Kreative Idee: destruktive Interferenz
- TU Berlin, Akustisches Institut,
- Aktives Fenster, plus ein Lautsprecher, 'im gegenphase'
- Strahlt 'gegen Lärm'



46

Vielen Dank für ihre



Aufmerksamkeit!

Fragen, Bemerkungen, Kommentare?

48