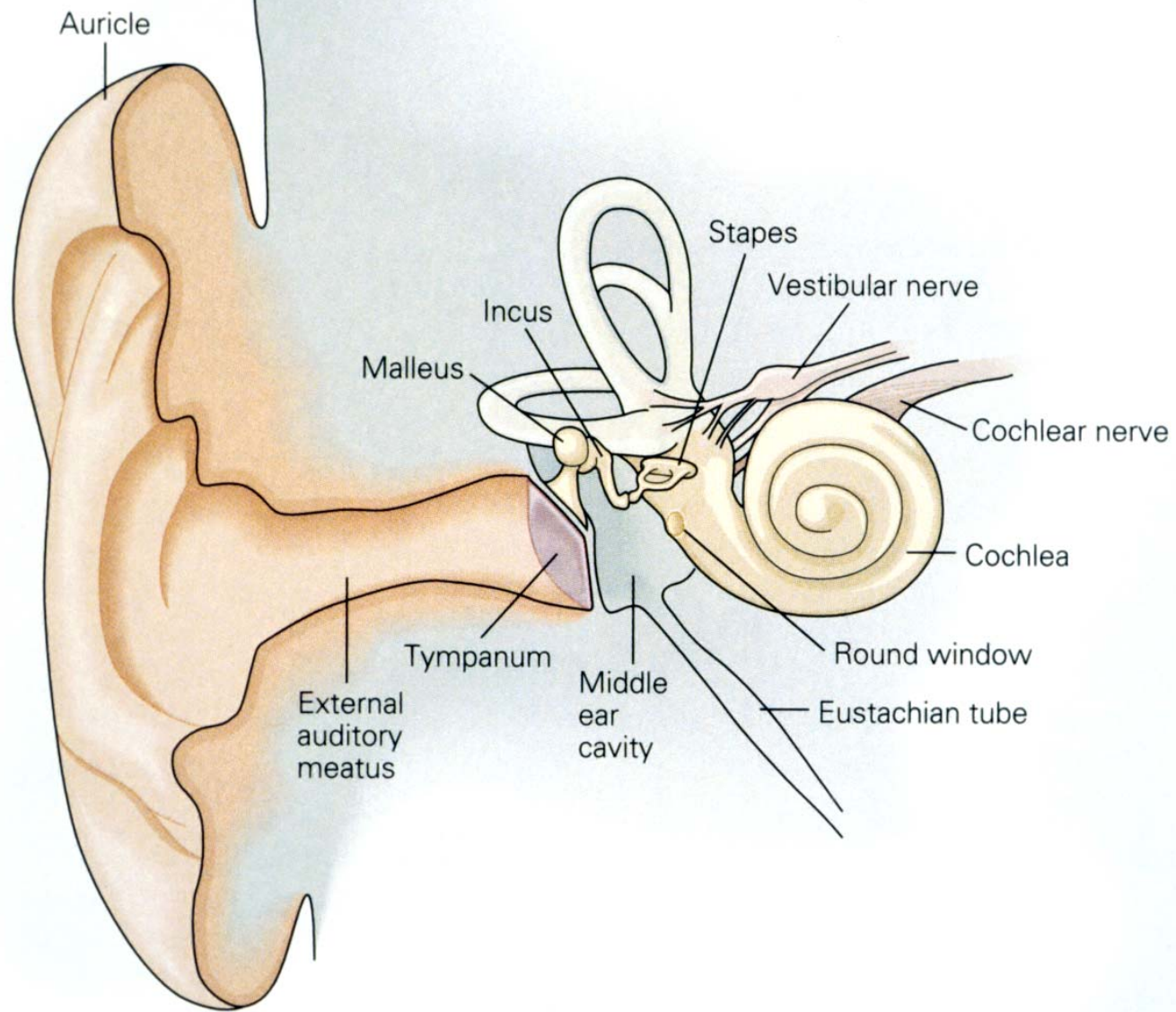


Gehör und Gleichgewicht

Prof. Manfred Fahle
Human- Neurobiologie
Universität Bremen

Hören: Überblick

- Umwandlung von Schallwellen in elektrische Impulse in der Cochlea („Schnecke“) durch Haarzellen (ca. 15.000/Ohr)
- Dort auch Beginn der Frequenz-Unterscheidung
- Empfindlichkeit im (sub) atomaren Bereich
- Signalfluss von Cochlea zu cochleären Kernen und weiter zum Hirnstamm (Identifikation und Lokalisation von Schallquellen)
- Schallgeschwindigkeit: 340 m/s = wesentlich langsamer als Licht

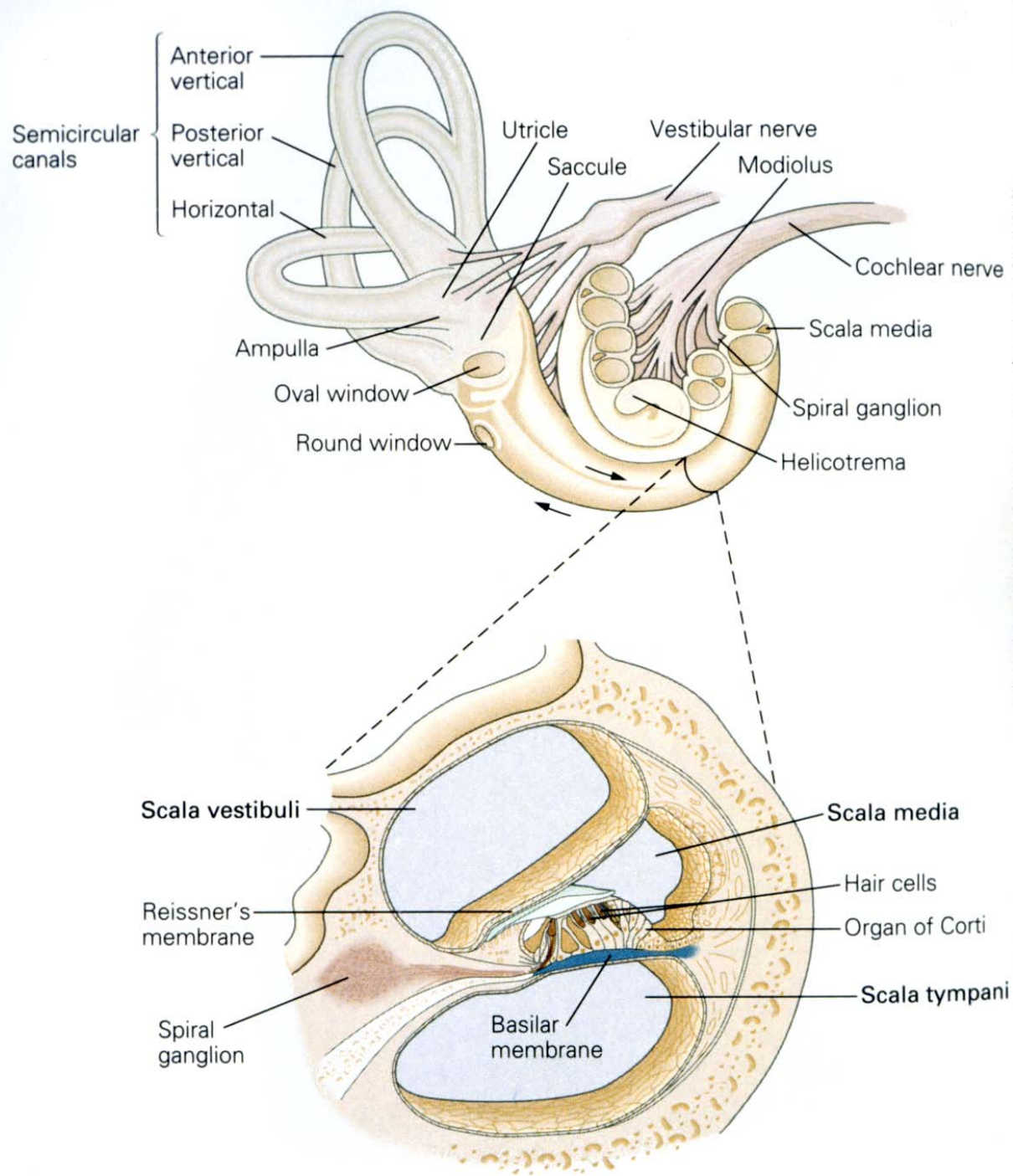


Aufbau des Ohres I

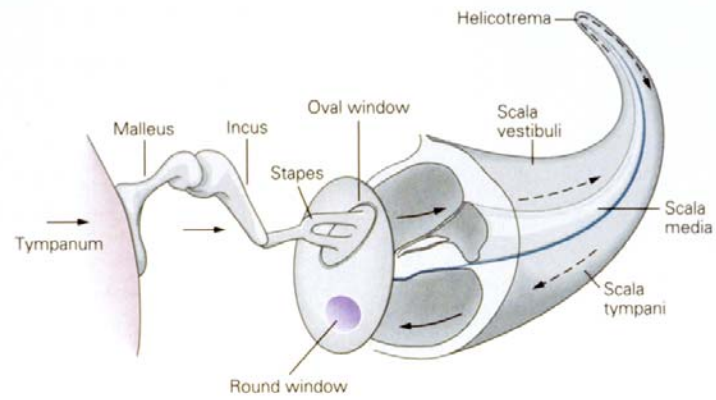
- äußeres Ohr
 - Ohrmuschel wirkt als Trichter (Reflektor)
 - ‚Empfangs-Stärke‘ von Schallwellen ist frequenz- und richtungsabhängig
 - Lokalisation bezüglich (vertikaler) Höhe von Schallquellen wird durch Ohrmuschel verbessert
 - endet am Trommelfell (Durchmesser 9 mm)
- Mittelohr
 - durch Eustach‘sche Röhre mit Schlund verbunden
 - Schallenergie wird im (luftgefüllten) Mittelohr über 3 Knochen (Hammer, Amboss, Steigbügel) zum ovalen Fenster weitergeleitet

Aufbau des Ohres II

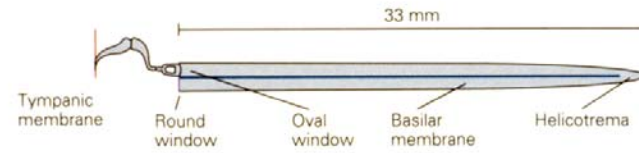
- Innenohr
 - Cochlea (griech. „Schnecke“) besteht aus fast drei vollständigen Windungen mit abnehmendem Radius
 - insgesamt ca. 9 mm groß, liegt im Temporal-Knochen
 - Cochlea besteht aus drei mit Flüssigkeit gefüllten Hohlräumen:
 - Scala vestibuli (mit ovalem Fenster)
 - Scala tymphani (mit rundem Fenster)
 - Scala media, trennt S. vestibuli und S. tymphani, begrenzt durch elastische Membranen außer am Apex: dort Verbindung (Helicotrema)
 - untere Membran = Basilarmembran



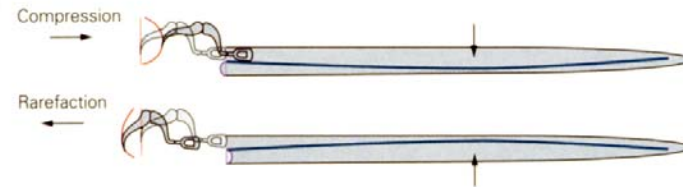
A



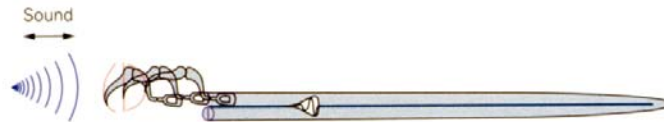
B



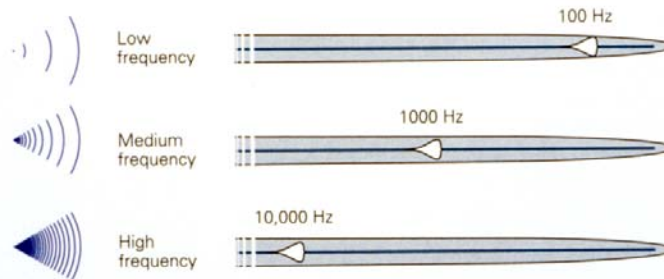
C



D



E



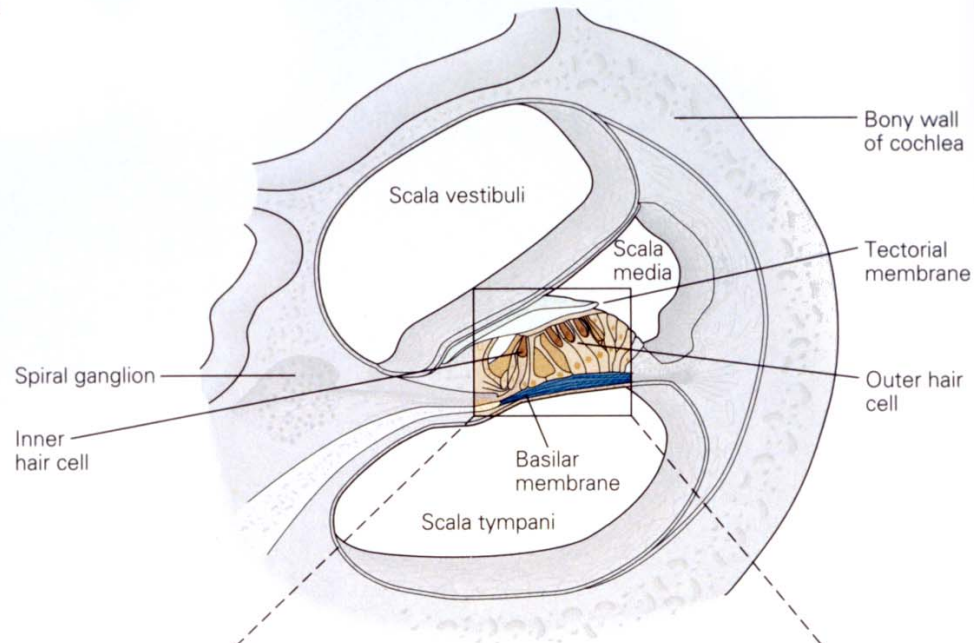
F



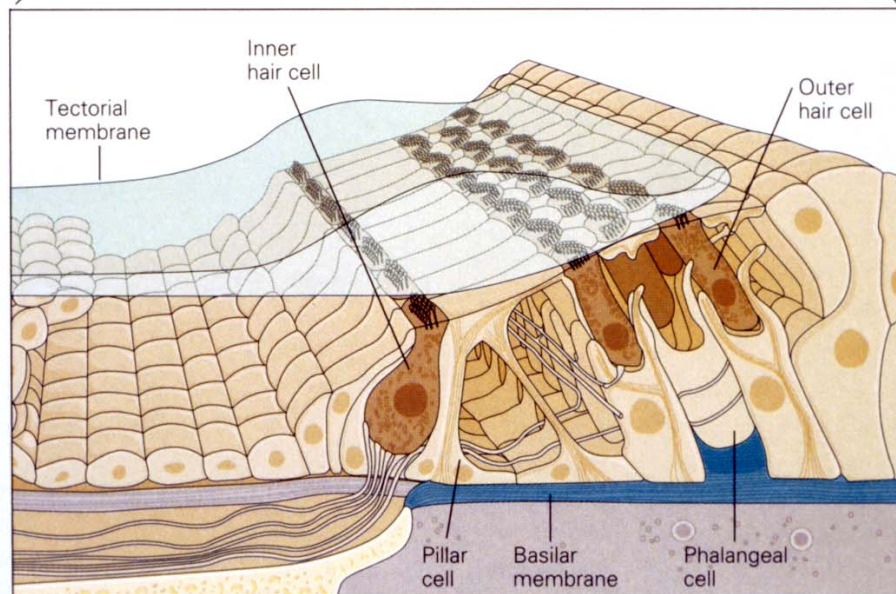
Schallaufnahme im Ohr

- subjektive Lautstärke wächst mit dem Logarithmus des Schalldrucks
- Maßeinheit dB SPL = $L = 20 * \log_{10} (P/P_{\text{ref}})$ mit P = Reizstärke; $P_{\text{ref}} = 0 \text{ dB} = 20 \mu\text{Pa}$ = etwa Hörschwelle für 4000 Hz (höchste Empfindlichkeit)
- höchste tolerierbare Lautstärke $\cong 120 \text{ dB} \cong 105 \text{ Pa}$; ändert den Luftdruck um weniger als 0,1 % und bewegt Basilarmembran um $\pm 150 \text{ nm}$ [Bei Flächen von 1 m^2 entspricht 120 dB einer Kraft von ca. $\pm 30 \text{ kp}$.]
- 10 dB-Ton $\pm 90 \mu\text{Pa}$ Änderung des Luftdrucks um $\pm 0,000001 \%$
- Luftdruckänderungen bewegen das Trommelfell
- Trommelfellbewegung -> Bewegung von Hammer -> Amboss -> Steigbügel -> ovales Fenster -> Flüssigkeit der Scala vestibuli -> Bewegung der Basalmembran
- Entzündungen des Mittelohres und Sklerose der Bänder -> Schwerhörigkeit (Knochenleitung intakt!) -> Prothese hilft

A

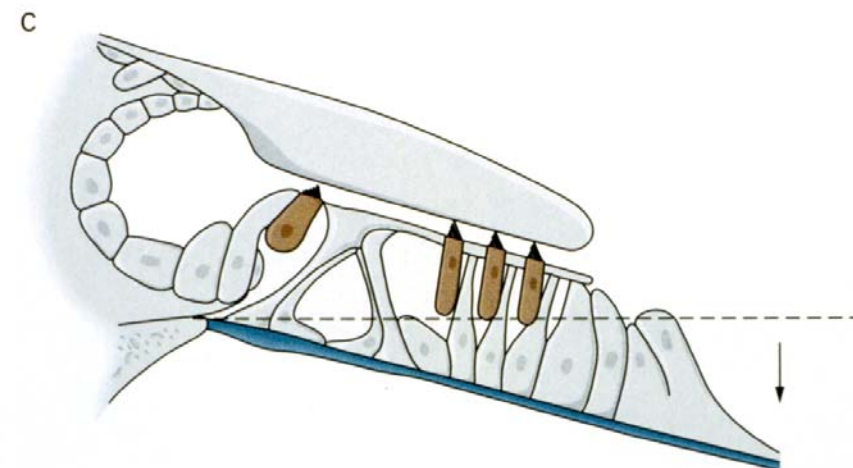
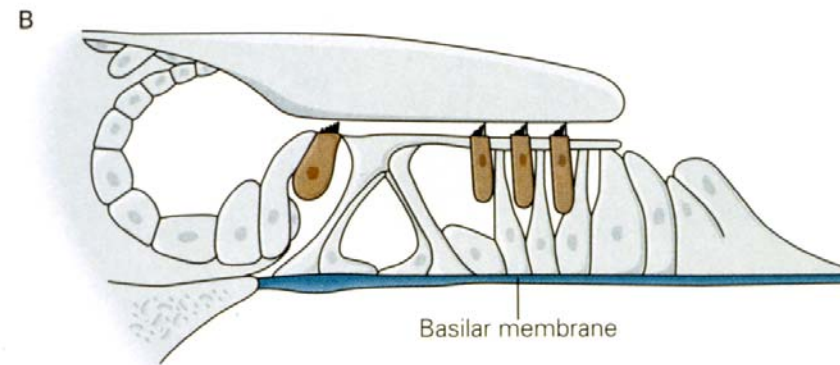
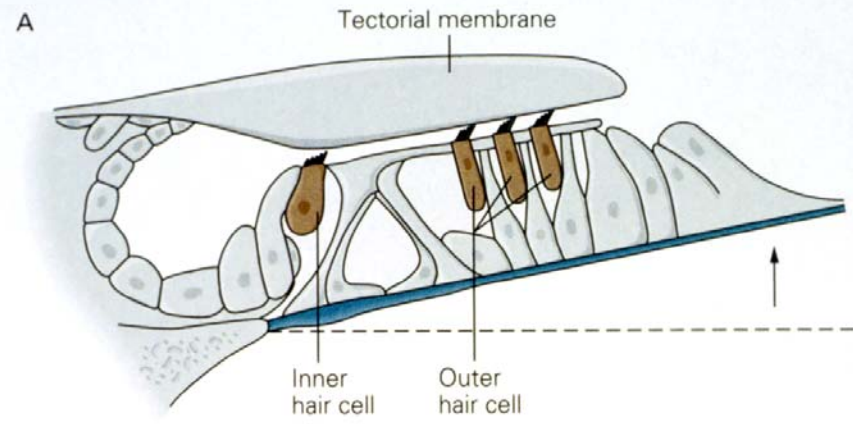


B



Funktion der Basilarmembran

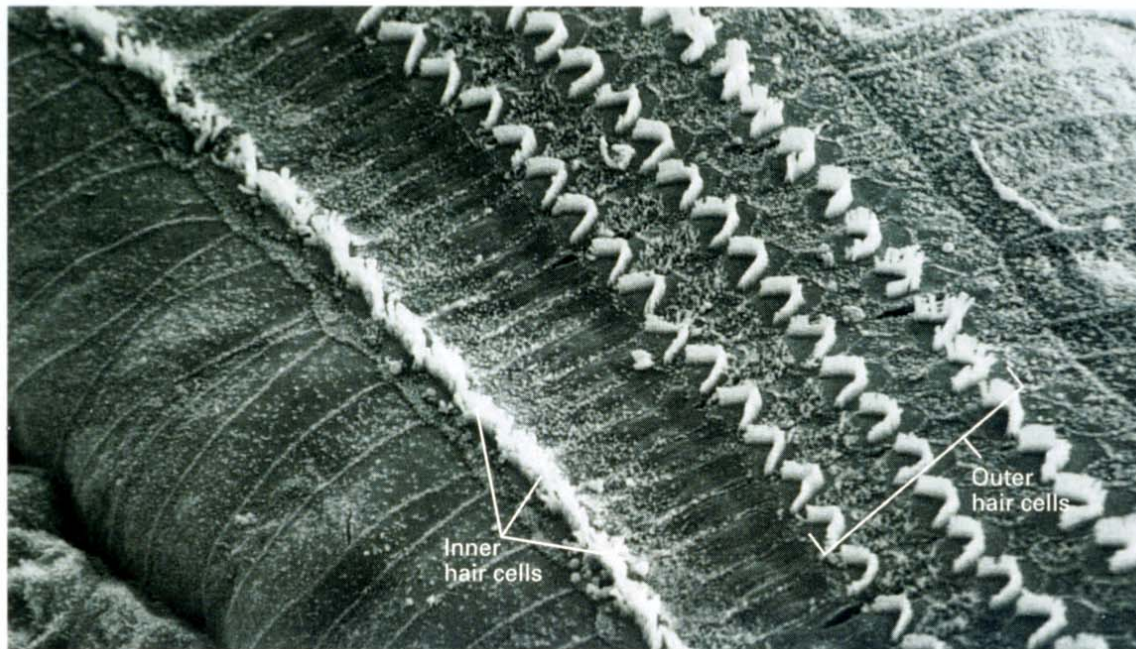
- mit steigendem Abstand vom ovalen Fenster (Gesamtlänge Cochlea 33 mm) wird die Cochlea *schmäler* und die Basilarmembran *breiter* und fester
- Amplitude der Schallauslenkung der Basilarmembran variiert mit der Frequenz: am größten für hohe Frequenzen (20 kHz) nahe ovalem Fenster, für tiefe (20 Hz) nahe Helicotrema (,Wanderwelle‘)
- Differenz benachbarter Rezeptoren ca 0,2 % (Klavier: 6 %)
- Empfindlichkeitsbereich ca. 1 Oktave
- Tonotope Abbildung mit logarithmischer Kennlinie
- Basilarmembran = mechanischer Frequenz-Analysator



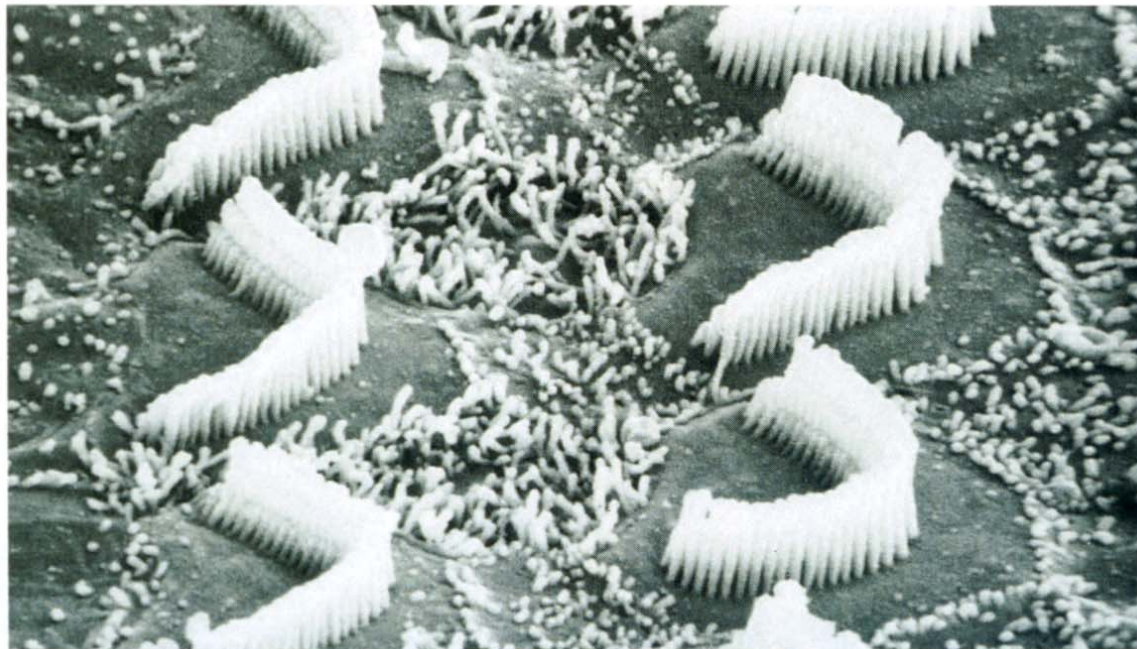
Mechanoelektrische Transduktion

- vollzieht sich im Cortischen Rezeptor-Organ des Innenohrs
- ca. 16.000 Haarzellen mit insg. 30.000 Nervenfasern pro Ohr (N VIII)
- ca. 12.000 äußere Haarzellen
- ca. 3.500 innere Haarzellen
- Tektorial-Membran mit fragiler Verbindung zum Corti'schen Organ und mit fester Verbindung zu Stereozilien der Haarzellen
- bei Bewegung der Basilarmembran: Scherkräfte an Stereozilien (Aufwärtsbewegung -> Zilien in Richtung langer Elemente -> Erregung: Depolarisation -> Rezeptor-Potential bis -25 mV)
- ähnlicher Mechanismus im Gleichgewichts-Organ

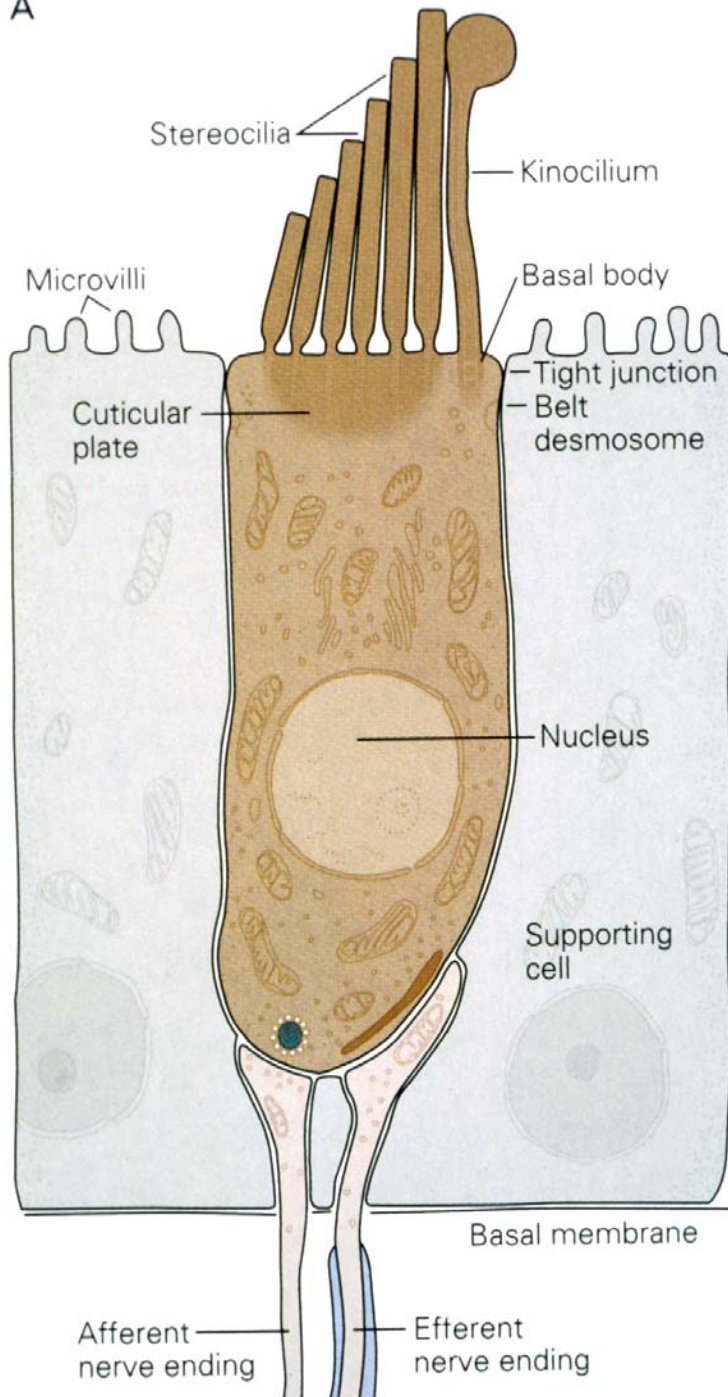
A



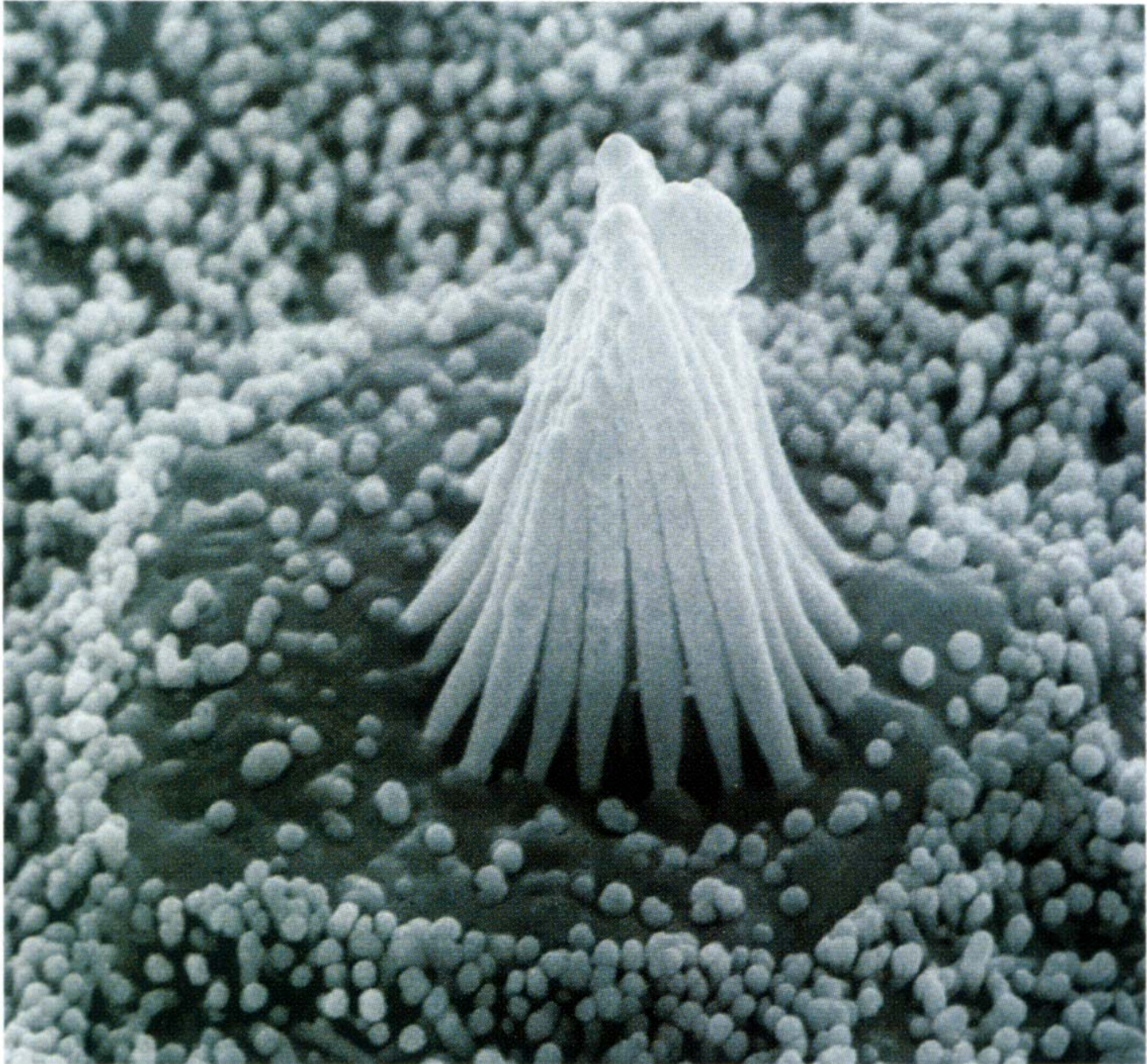
B



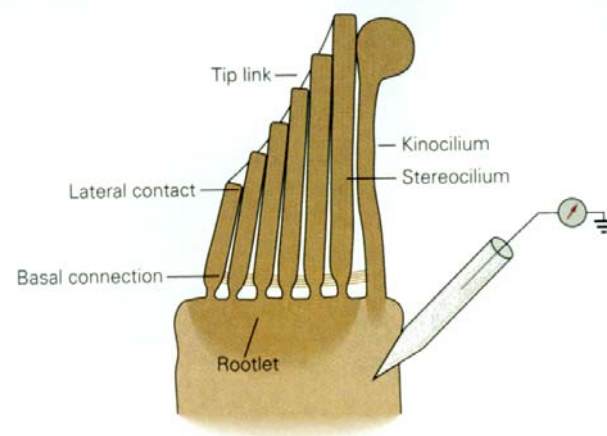
A



B



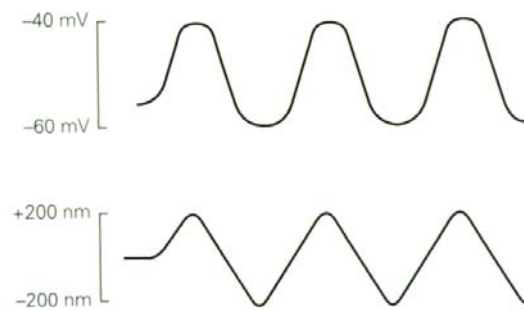
A



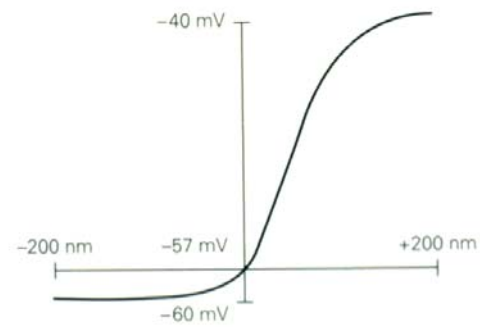
B



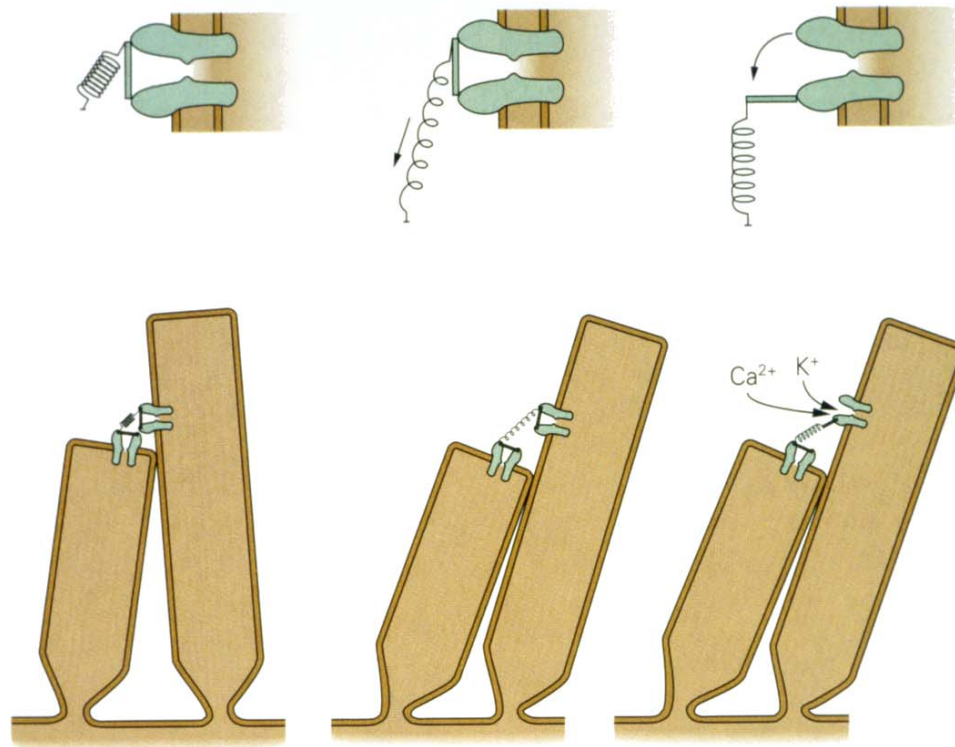
C



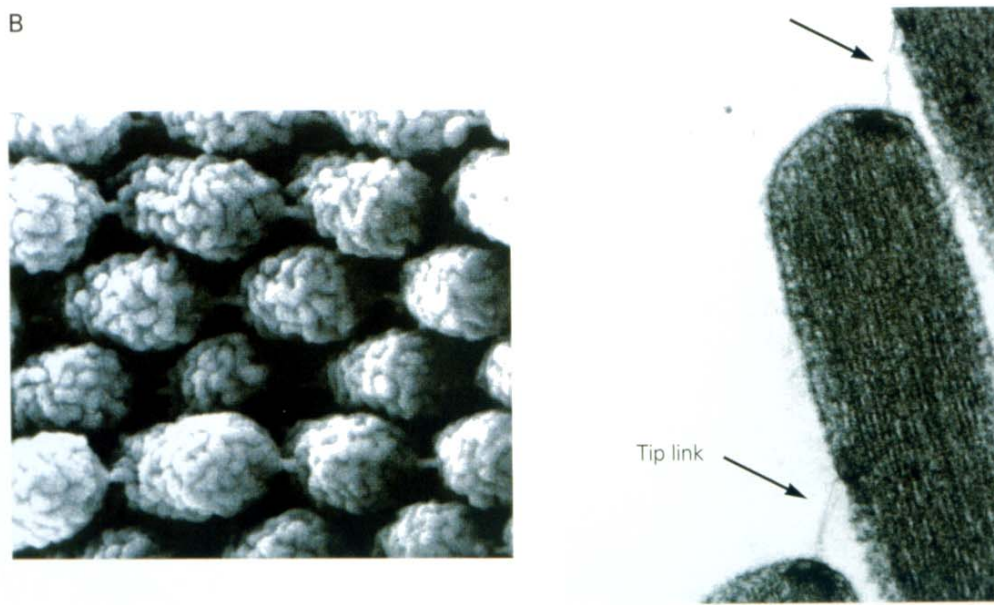
D

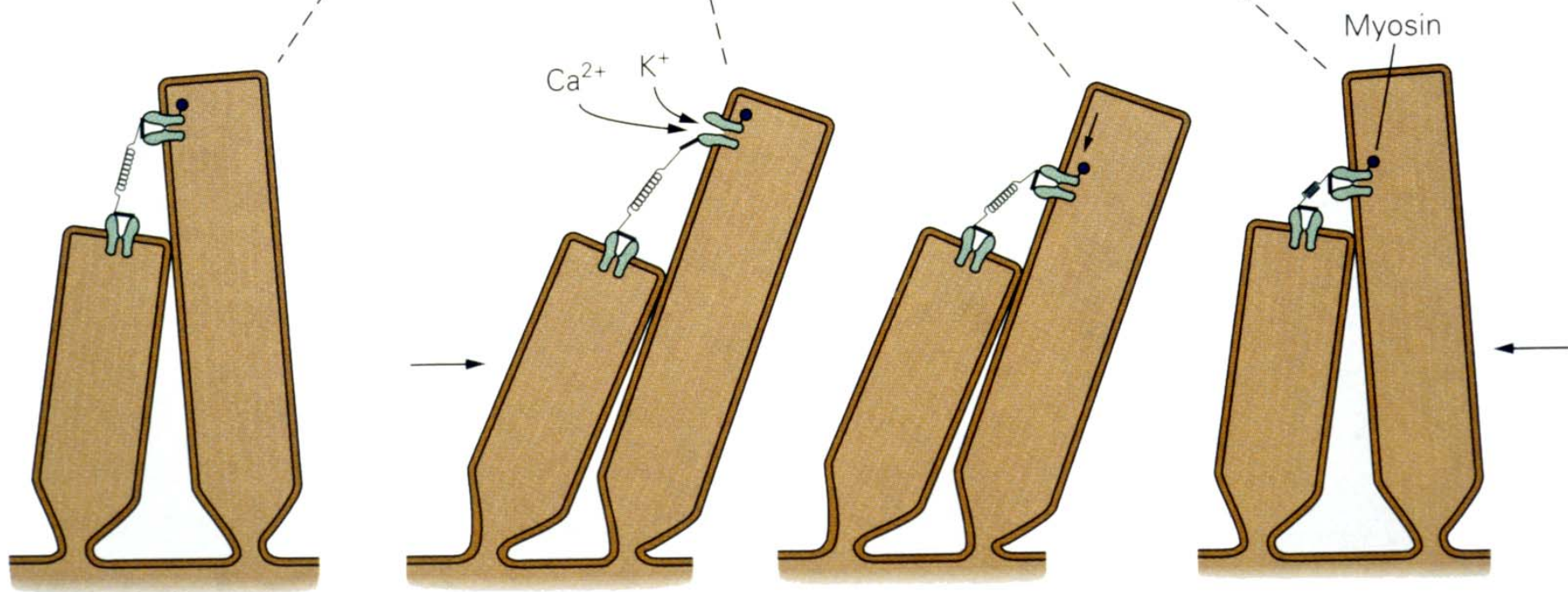


A



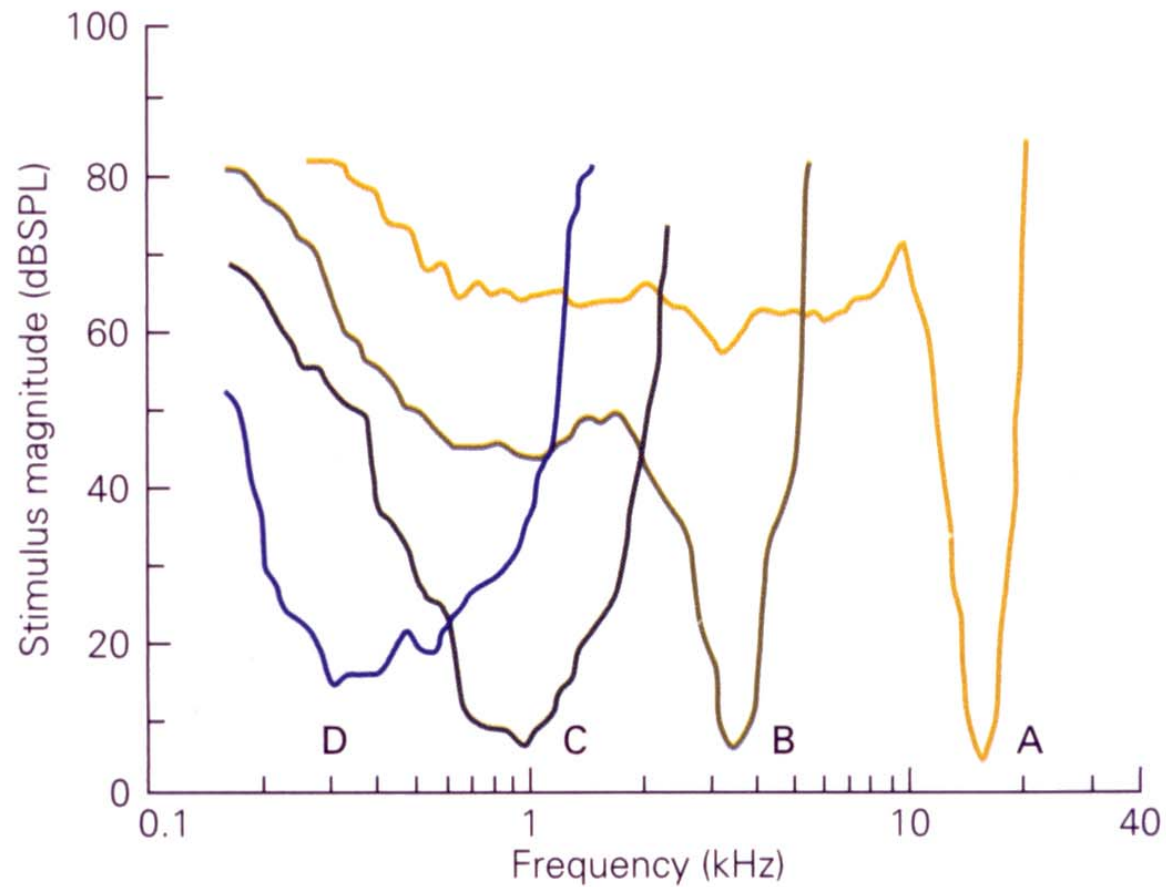
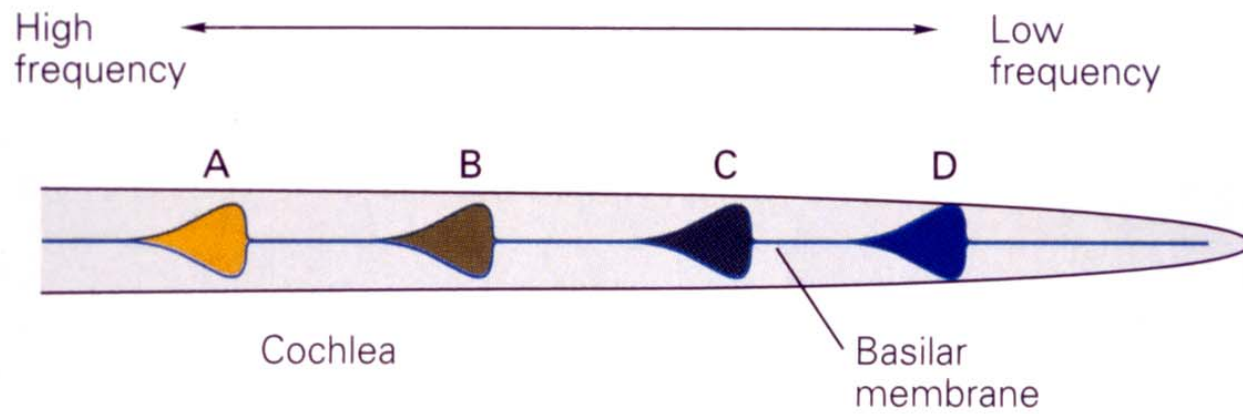
B

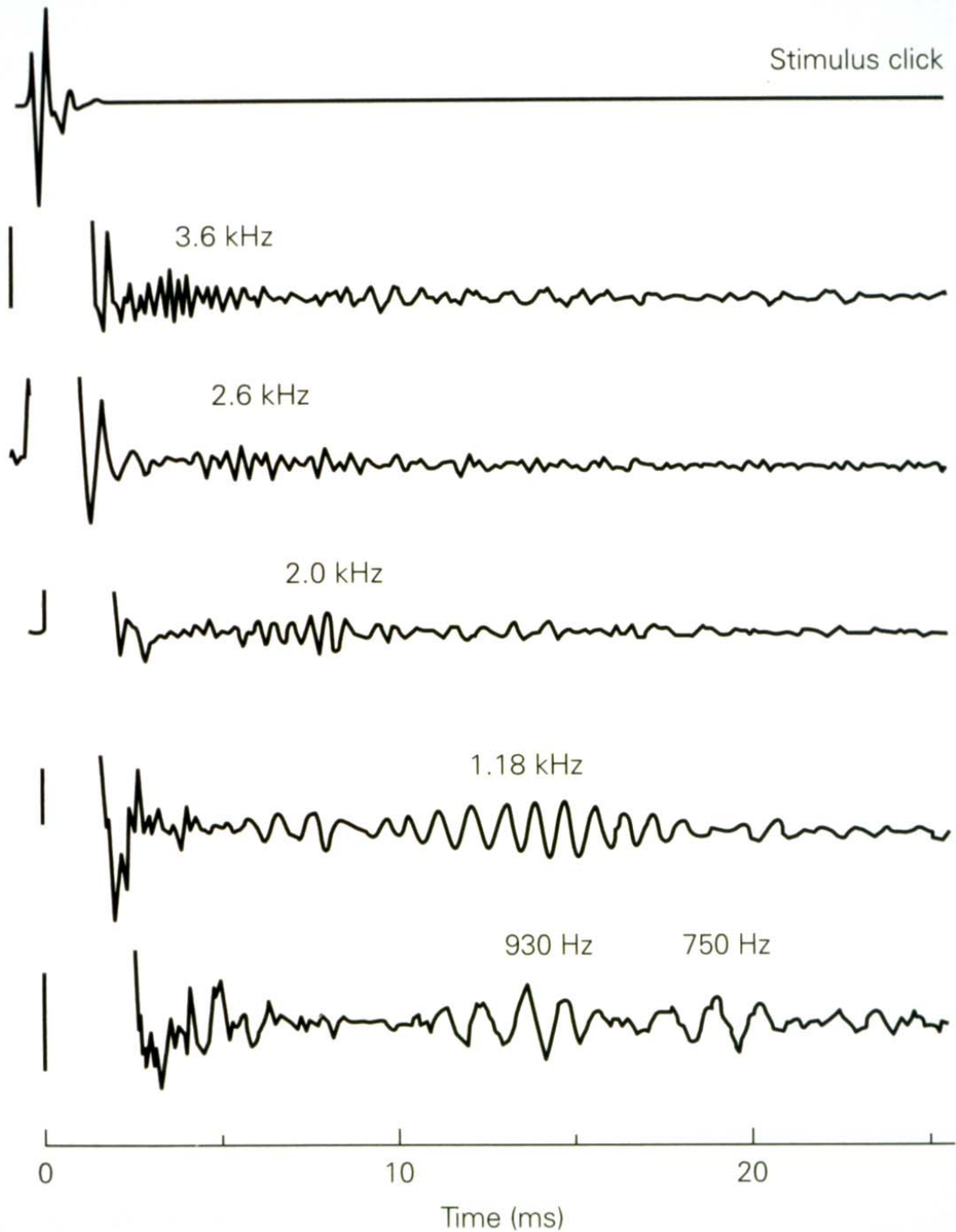


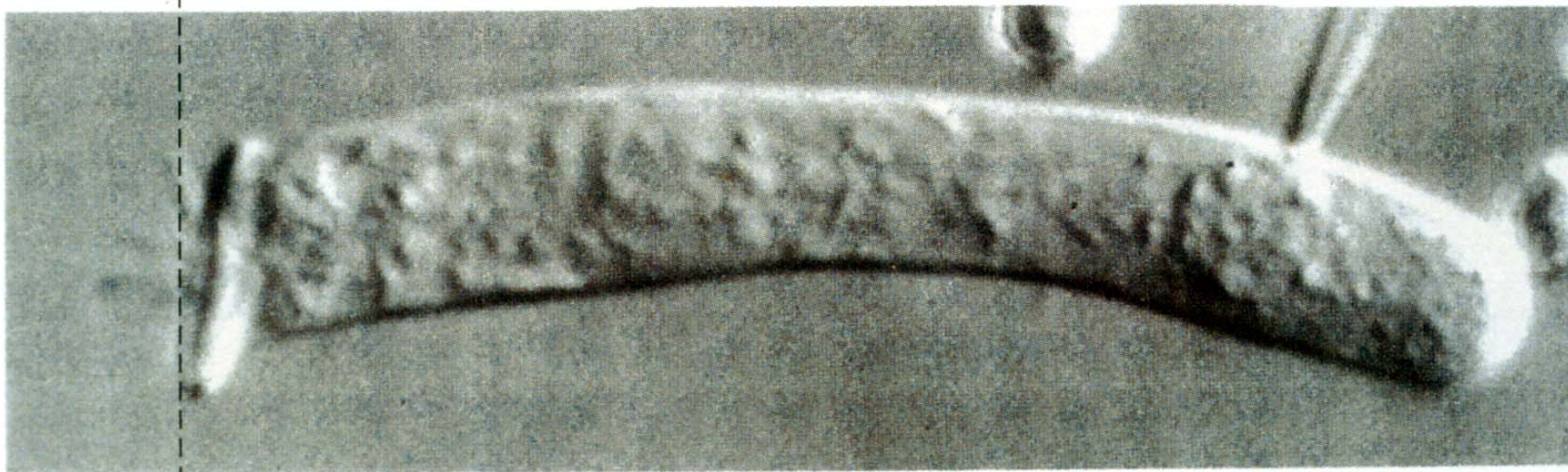
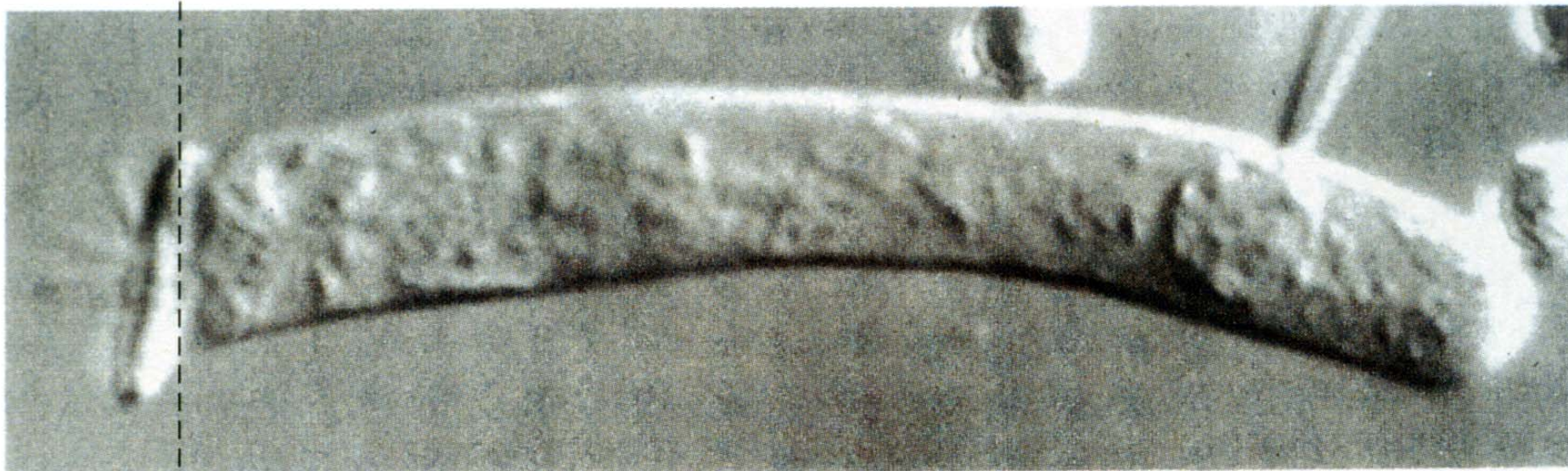


Haarzellen

- besitzen Haarbündel = 20-300 Stereozilien. Insges. 1-100 μm lang, enthalten Actin und Myosin. Stereozilien sind an ihrer Basis am dünnsten, d.h. beweglich
- Ruhepotential ca -60 mV , ca. 15% der relevanten Kanäle sind geöffnet
- 100 nm Auslenkung führen zu 90% der möglichen Antwortstärke (ca 20 mV)
- Schwelle bei ca. 1° Auslenkung = 0,3 nm, Rezeptor-Potential ca 0,1 mV
- Mechanische Kräfte öffnen und schließen die Ionen-Kanäle (schnell!!)
- Adaptations-Prozess adjustiert die Empfindlichkeit der Zellen, vermutlich durch Veränderung der Spannung der mechanischen Verbindungen zwischen den Haarzellen
- Frequenz-Spezifität: Zellen für niedrige Frequenzen haben lange Haarbündel, Zellen für hohe Frequenzen kurze Haarbündel

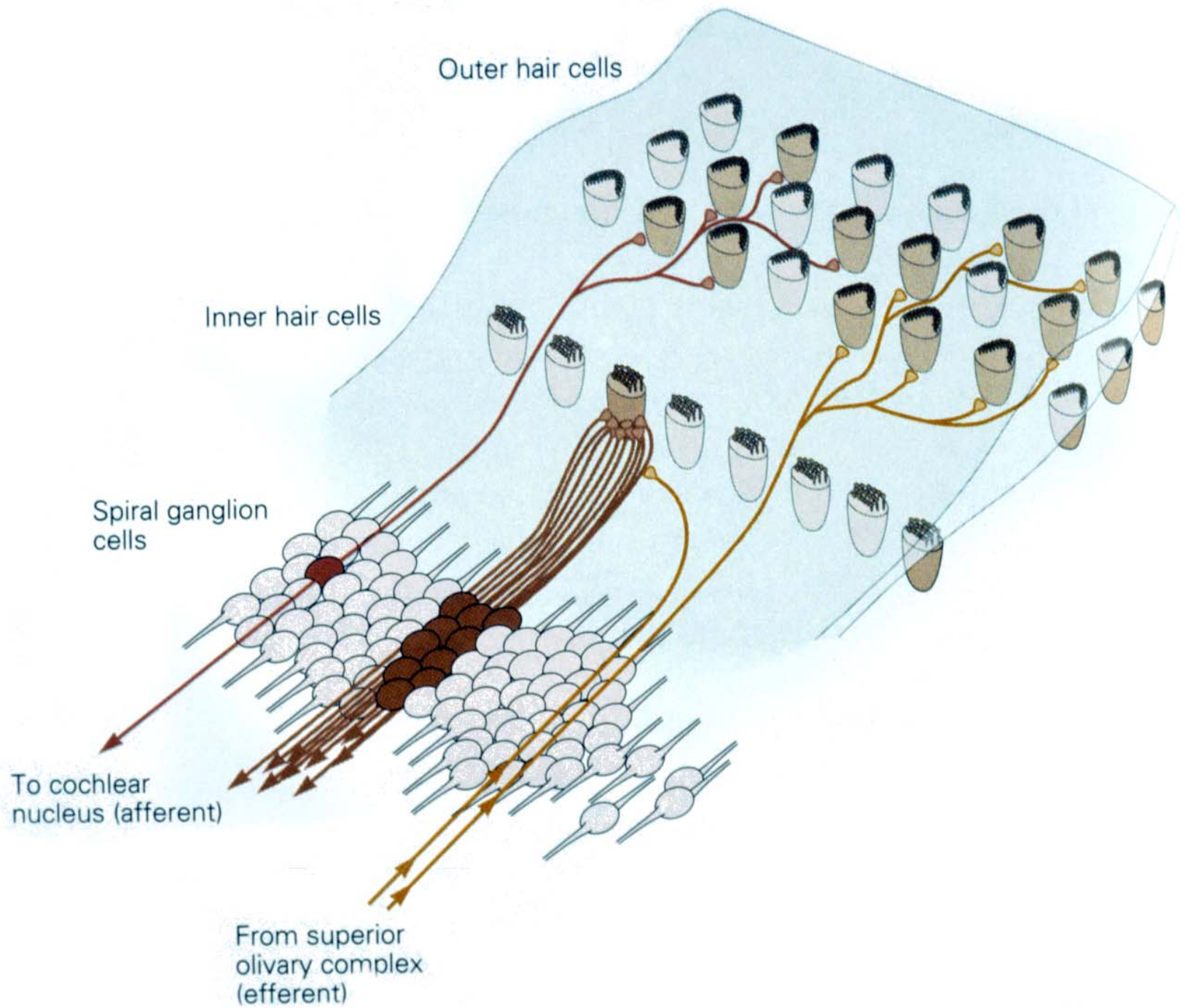






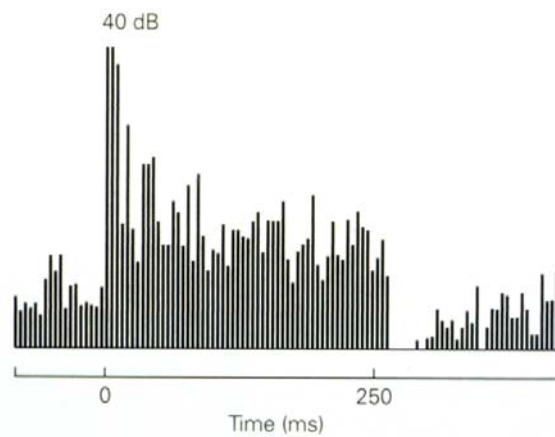
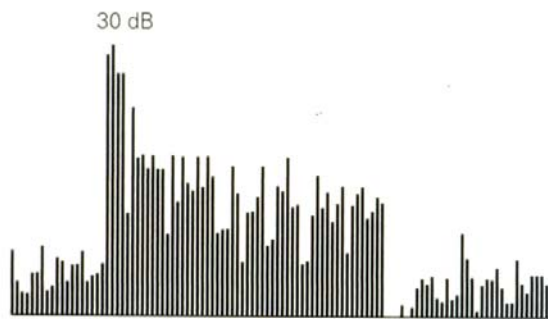
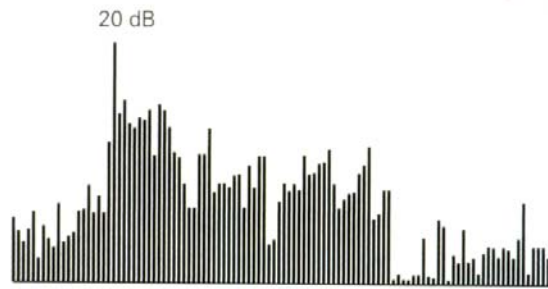
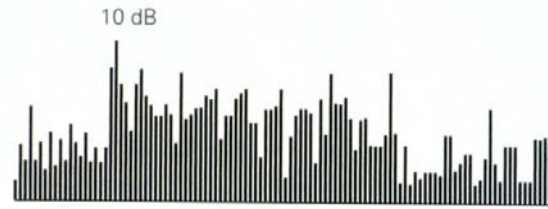
Mechanische Verstärkung der Schallenergie

- großer Teil der Schallenergie wird durch die Flüssigkeit in der Cochlea gedämpft
- aktive Verstärkung schwacher Schallwellen im Ohr um ca. Faktor 100:
 - > akustische Emissionen: evoziert (Latenz 5 ms für hohe, 20 ms für tiefe Töne) oder spontan
- Vermutlich durch äußere Haarzellen bewirkt, die weit extensivere efferente als afferente Nervenversorgung aufweisen und sich bei elektrischer Aktivierung verkürzen

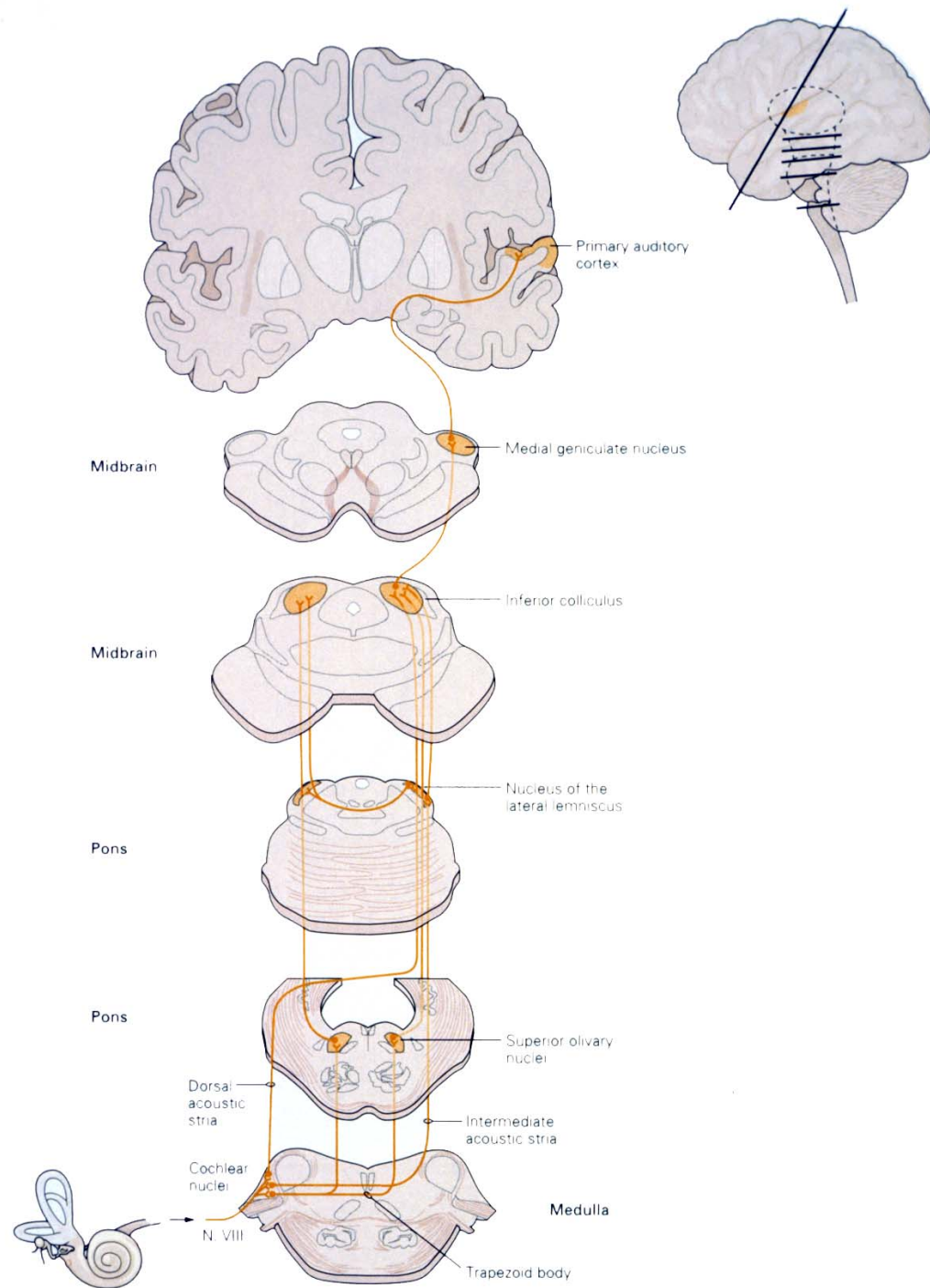


Ganglienzellen innervieren Haarzellen der Cochlea

- Haarzellen -> chemische Transmission über Glutamat -> cochleare Ganglienzellen (Ganglion cochlearis = Spiralganglion)
- mindestens 90 % der Afferenzen entstammen den *inneren* Haarzellen
- jede innere Haarzelle innerviert mehrere Axone (ca. 10), jedes Axon innerviert nur 1 Haarzelle, kaum efferente Fasern
- mehrere äußere Haarzellen müssen sich jeweils 1 Axon teilen (Konvergenz), sowohl bezüglich der afferenten als auch der efferenten Fasern

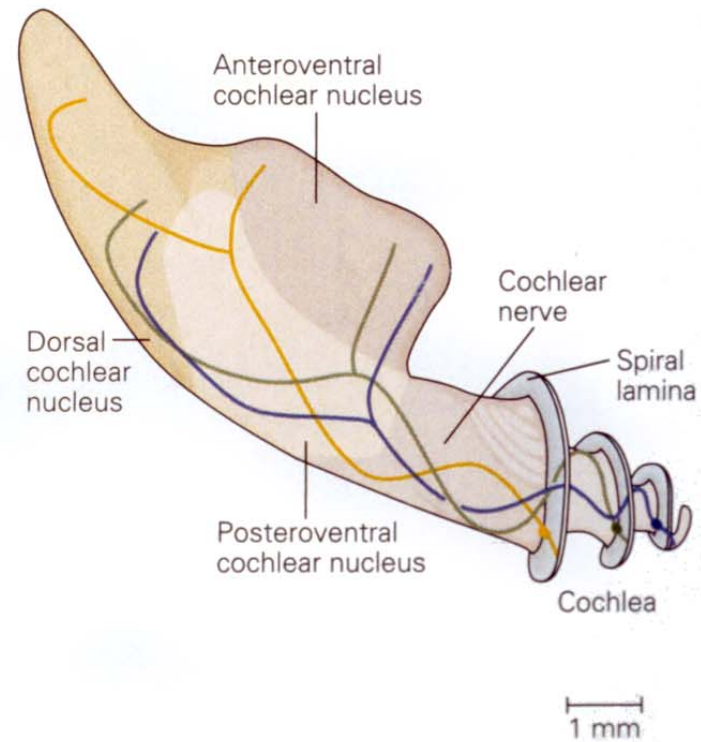
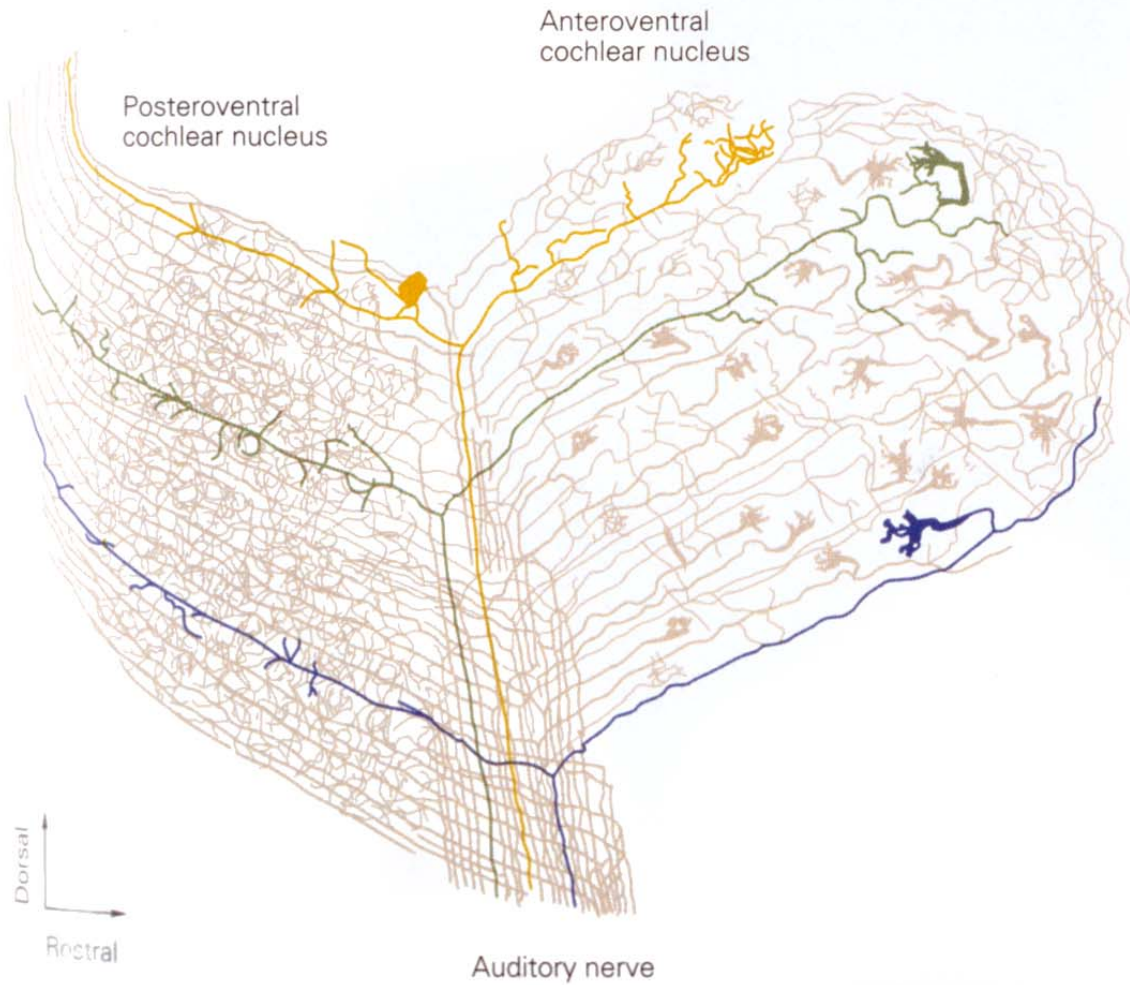
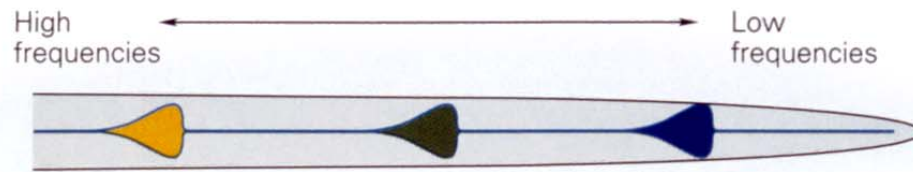


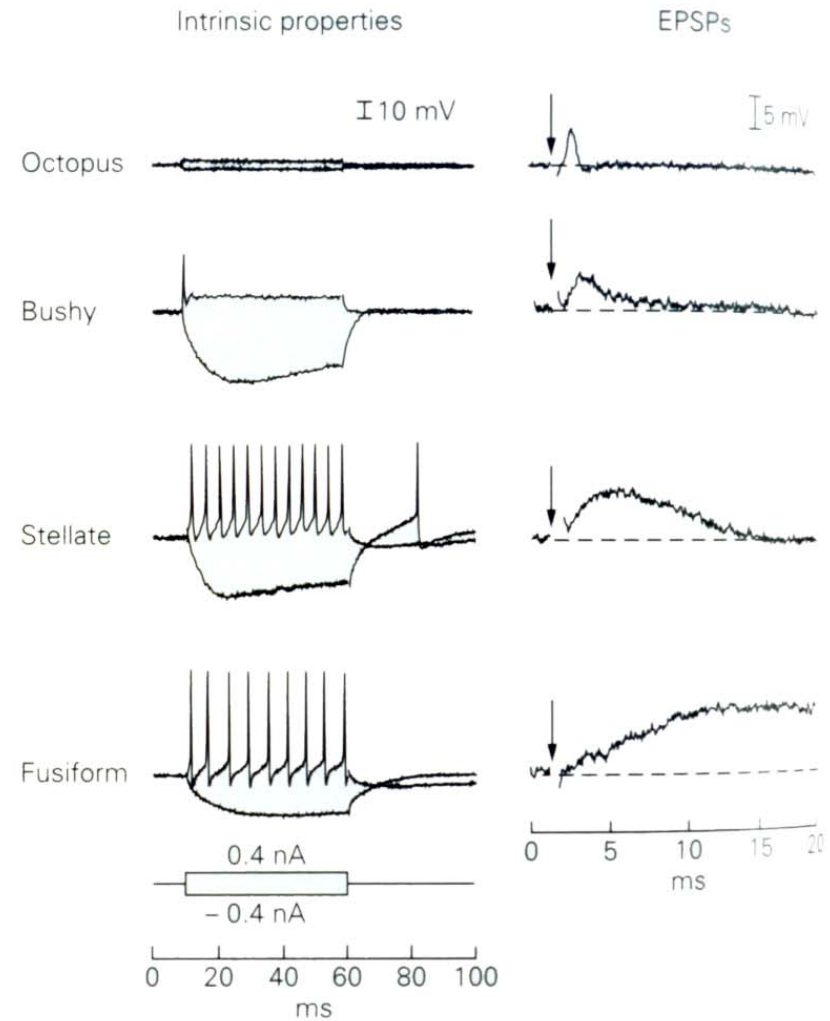
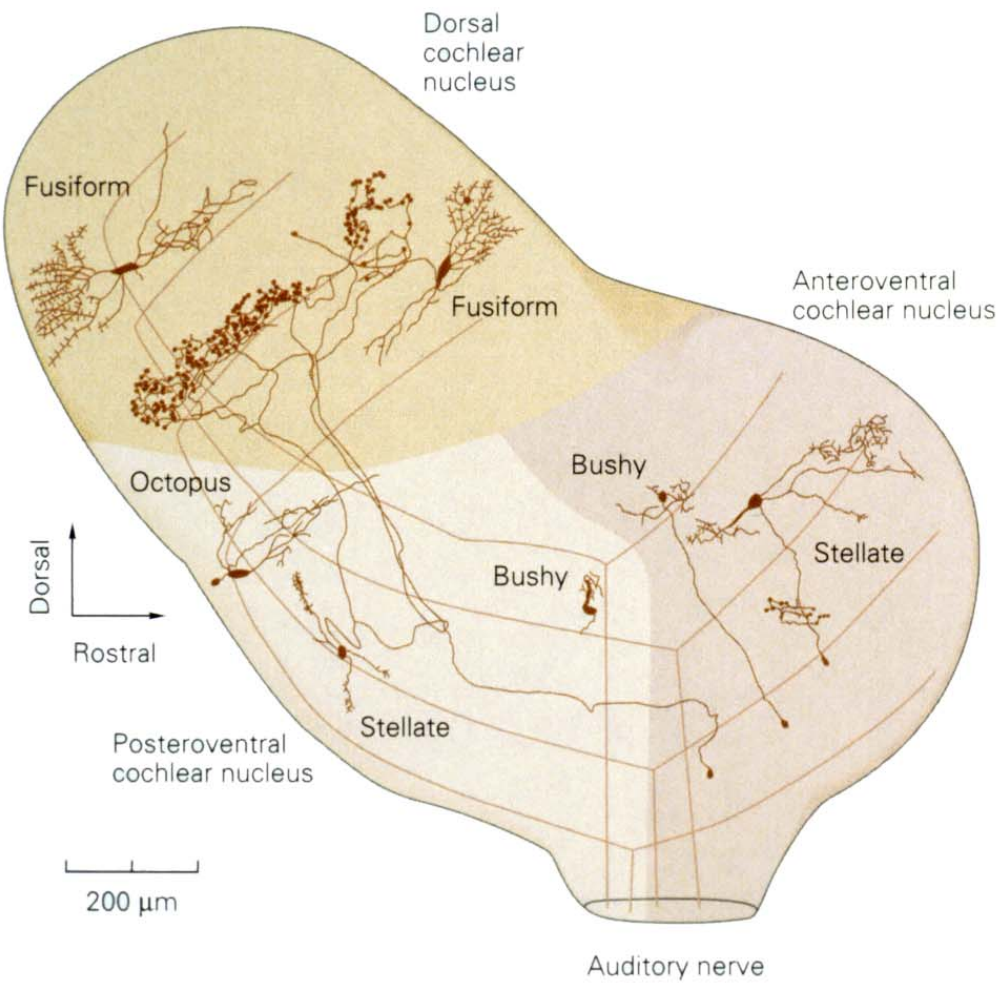
Duration of tone at characteristic frequency



Cochleäre Nervenfasern

- sind frequenz-spezifisch (V-förmige ‚Tuning‘-Kurve)
- lineares Verhältnis von Schalldruck-Niveau (SPL) (= Logarithmus des Schalldrucks; dB) zu Entladungsfrequenz der Axone im Nerven
- empfindlichste Neurone haben hohe Spontanaktivität und gehen bei ca. 40 dB in Sättigung; weniger empfindliche saturieren erst bei ca. 100 dB (deshalb multiple Innervation der inneren Haarzellen wenig redundant -> parallele Kanäle)
- sowohl phasische als auch tonische Fasern
- 1 Spike pro Periodenlänge des Tones für Töne bis ca. 1 kHz, auch danach ‚phasen-spezifisch‘ aber nicht jede Periode beantwortet
- Phasen-Spezifität der Antwort erhöht stark die Frequenz-Spezifität der neuronalen Antwort: Frequenzkode zusätzlich zu Platz-Kode





Verarbeitung von Schallinformation im Nucleus cochlearis

- Axone aus Cochlea verlaufen im N. VIII zum Hirnstamm ->
- Nucleus-cochlearis-Komplex am Übergang Medulla/Pons
 - dorsaler Nucleus cochlearis (Fusiforme & Oktopus-Zellen)
 - anteroventraler Nucleus cochlearis (Stern- & Busch-Zellen)
 - posterioventraler Nucleus cochlearis (Stern- & Busch-Zellen)
 - alle sind tonotop organisiert
 - durch Aufzweigung von Afferenzen: teilweise Parallel-Erregung
- Busch-Zellen bilden nur den Reiz*beginn* genau ab -> Lokalisation im Raum
- Stern-Zellen bilden die Tonfrequenz sehr genau ab
- Fusiforme Zellen haben komplexe Frequenz-Selektivität -> vertikale Lokalisation?

Lokalisation von Schallquellen

- insgesamt komplexes Projektionsmuster ab N. cochlearis Komplex (z. B. trapezförmiger Kern, oberer Olivenkern, Colliculus inferior, Corpus geniculatum mediale)
- Verarbeitung in parallelen Kanälen, spezialisiert auf unterschiedliche Aufgaben, mit massiver Interaktion zwischen beiden Hirnhälften (bei einseitigen Defekten sind beide Ohren betroffen)
- mediale obere Olive trägt zur Schall-Lokalisation bei; die maximale Laufzeitdifferenz von 0,7 ms. wird ausgewertet; Differenz-Schwelle: ca. 10 μ s
- ‚festverdrahteter‘ Berechnungs-Algorithmus in Olive: Koinzidenz-Detektor mit variabler Verzögerung = Raum-Repräsentation
- laterale superiore Olive verwendet Intensitäts-Hinweise zur Raumlokalisierung (wichtig insbesondere für hohe Tonfrequenzen)
- im Colliculus inferior Kombination von akustischer und somatosensorischer Information (Tonotopie nur noch nach Schichten): ebenfalls an Schall-Lokalisation beteiligt (z. B. Eule)

