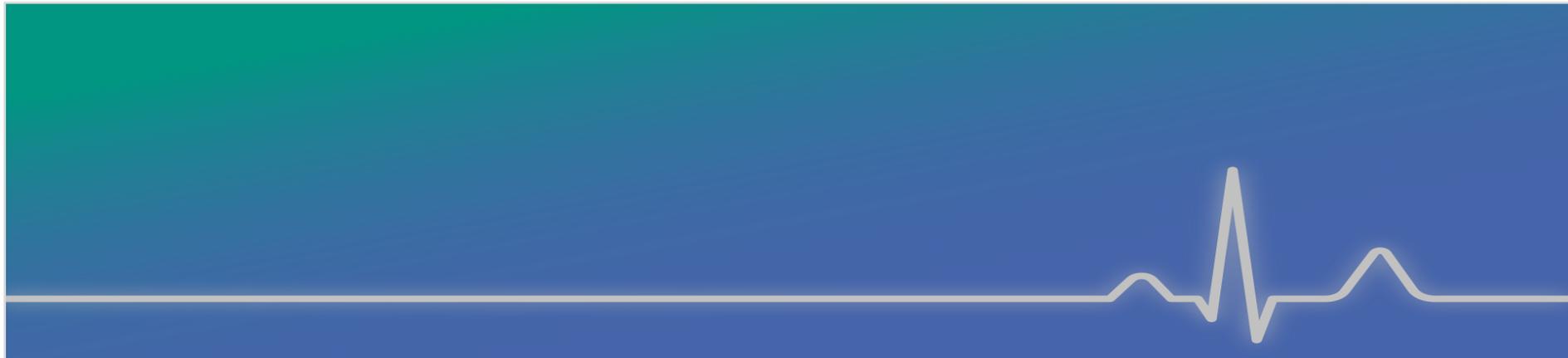


Physiologie und Anatomie I

5.2. Sinnesorgane - Ohr

Prof. Dr. Werner Nahm



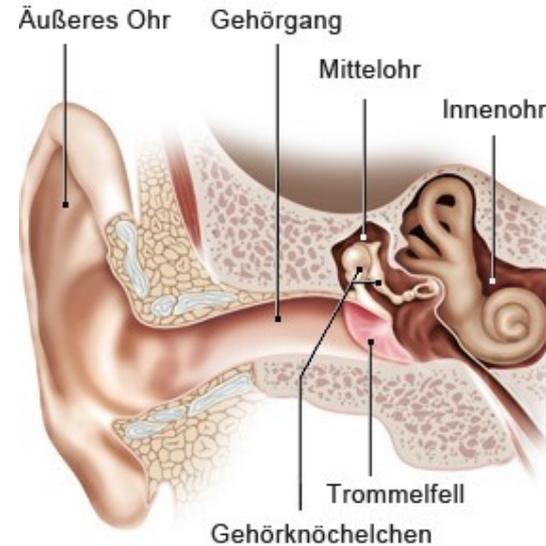
Nach dem Studium dieses Kapitels...

...sollten Sie in der Lage sein...

- Die Anatomie des menschlichen Ohrs und die Komponenten des Mittelohrs und den Innenohrs zu nennen und zu beschreiben.
- Die Funktion des Mittelohrs zu erklären (Impedanzanpassung, Verstärkung)
- Den Aufbau und die mechanischen Eigenschaften der Cochlea zu beschreiben
- Den Aufbau und die Funktion des Corti-Organs zu beschreiben
- Die Funktion der inneren und äußeren Haarzellen zu erklären
- Den aktiven Verstärkungsmechanismus der Cochlea zu erklären

Anatomie - Ohr

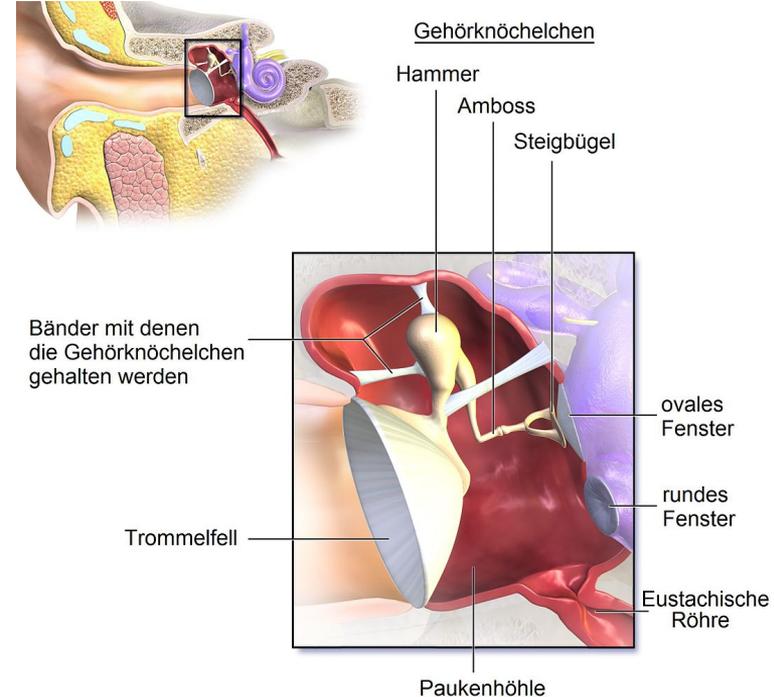
- Äußeres Ohr
 - Ohrmuschel
 - Äußerer Gehörgang
- Mittelohr
 - Trommelfell
 - Paukenhöhle mit Gehörknöchelchen
 - Eustach'sche Röhre
- Innenohr
 - Hörschnecke (Cochlea)
 - Gleichgewichtsorgan (Vestibularapparat)



Bildquelle: <https://www.gesundheitsinformation.de/wie-funktioniert-das-ohr.html>

Mittelohr - Anatomie

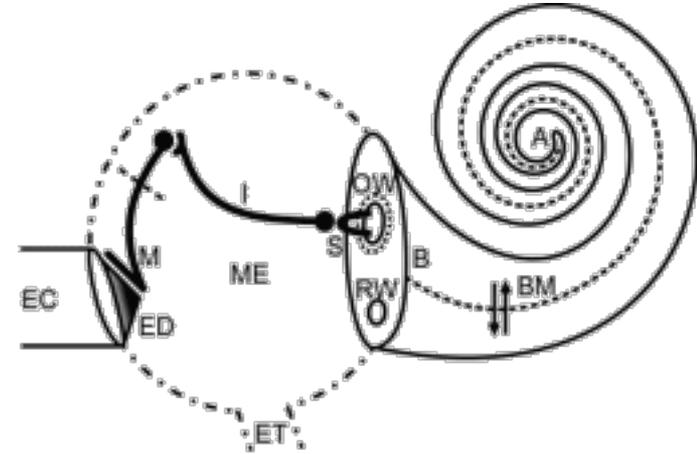
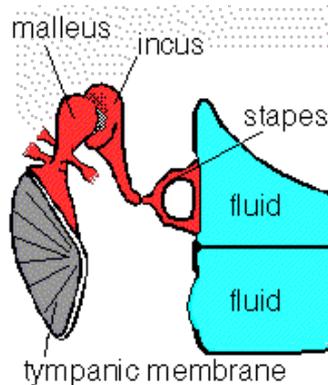
- Trommelfell (Membrana tympani)
 - Umwandlung von Luftschall zu mechanischen Schwingungen
- Paukenhöhle (luftgefüllt)
 - Gehörknöchelchen (Aufhängung über Bänder und Muskeln)
 - Hammer (Malleus)
 - Ambos (Incus)
 - Steigbügel (Stapes)
 - Eustach'sche Röhre
 - Verbindung zum Rachenraum (Druckausgleich)



Bildquelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Mittelohr#/media/Datei:Mittelohr.jpg>

Mittelohr - Funktion

Die Gehörknöchelchen wirken als Impedanzwandler (Luft - Wasser) und als Druckverstärker zwischen dem Trommelfell und dem ovalen Fenster der Cochlea.

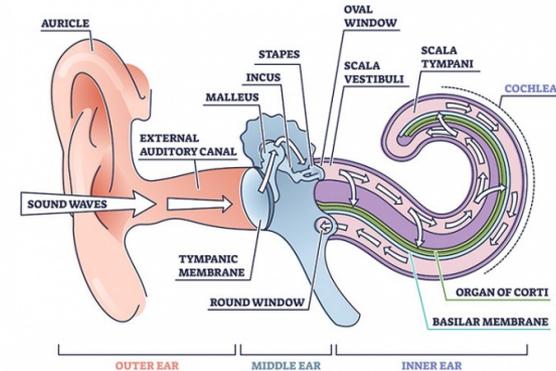
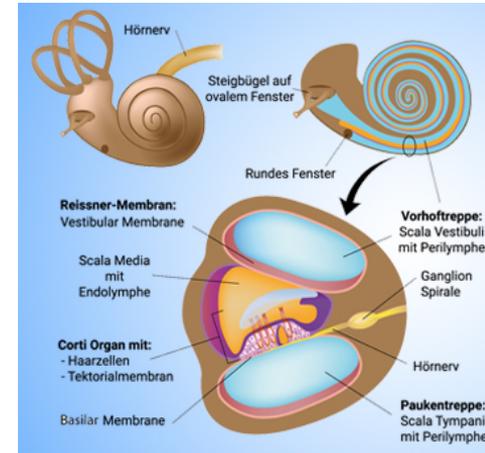


Schallübertragung über das Mittelohr ME:

- M: malleus (Hammer)
- I: incus (Ambos)
- S: stapes (Steigbügel)
- OW: oval window (Ovales Fenster)
- RW: round window (Rundes Fenster)
- BM: basiliar Membrane (Basiliarmembran)

Cochlea - Anatomie

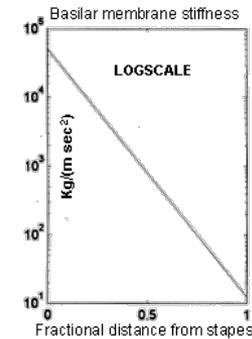
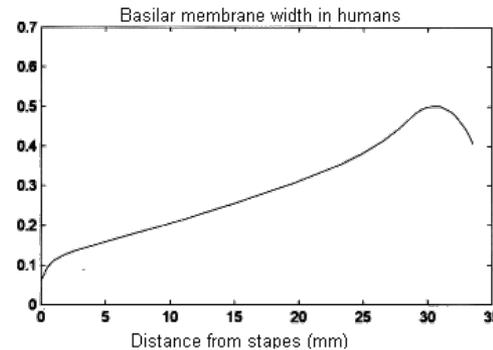
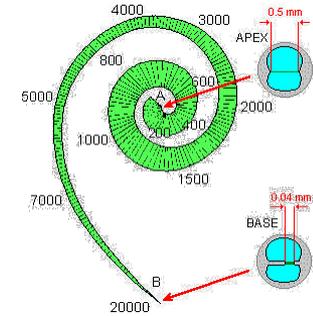
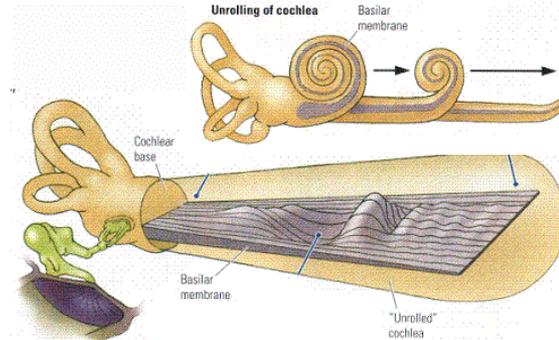
- Die Cochlea (Hörschnecke) erbsengroßer, schneckenförmig gewundener, flüssigkeitsgefüllter Hohlraum.
- Sie ist über zwei durch zwei Membrane (Fenster) Zum Mittelohr abgeschlossen
- Der Hohlraum ist der Länge nach in drei flüssigkeitsgefüllte Gänge (Scalae) aufgeteilt:
 - Vorhoftreppe (Scala vestibuli),
 - Schneckengang (Scala media)
 - Paukentreppe (Scala tympani)
- Zwischen der Scala Tympani und der Scala Media befindet sich das **Corti-Organ** (Sitz des Gehörsinns) bestehend aus:
 - Basiliarmembran
 - Tektorialmembran
 - Innere und äussere Haarzellen
 - Neuronen des Nervensystems (Axone)



Schalleitung vom Außenohr zum Innenohr

Basiliarmembran - Geometrie und Funktion

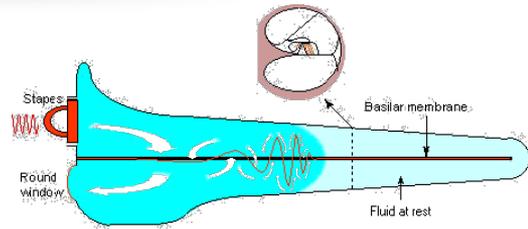
- Zunehmende Breite und abnehmende Dicke der BM
- Zunehmende Nachgiebigkeit der Basiliarmembran von der Basis bis zur Apsis
- Sensitivität für hohe Frequenzen an der Basis, tiefe Frequenzen an der Apsis.



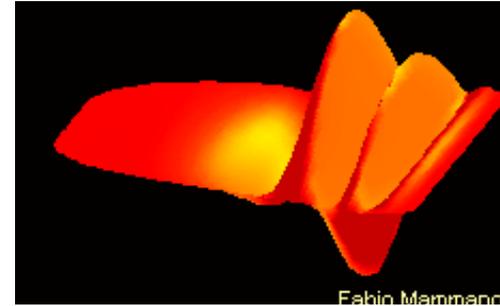
Basiliarmembran - Geometrie und Funktion

Aktueller Wissenstand:

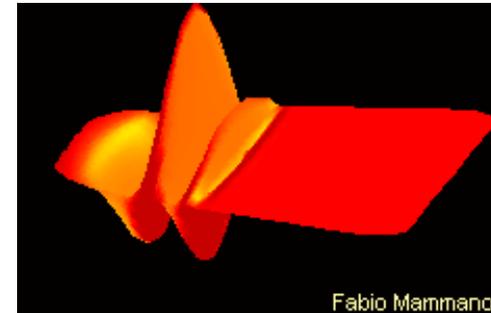
- Schallausbreitung über Wanderwellen
- Laufzeitunterschiede für hohe und tiefe Frequenzen
- Aktiver, nichtlinearer Verstärkungsmechanismus für niedrige Schallpegel.



Schematische Darstellung der Flüssigkeitsoszillationen über der Wanderwelle auf der BM



Auslenkung der BM für tiefe Frequenzen



Auslenkung der BM für hohe Frequenzen

Corti-Organ - Aufbau und Funktion

1851: Alfonso Corti

Recherches sur l'organe de l'ouïe des mammifères.

„Beschreibung des sensorischen Epitels auf der Basiliarmembran“

1863: Hermann von Helmholtz

„Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik“

1943: Georg von Békésy, Nobelpreis 1962

Erste Veröffentlichung über Wanderwellen in der menschlichen Cochlea

Aber: Widerspruch zwischen der experimentell messbaren Leistungsfähigkeit des Gehörs:

- Frequenzauflösung
- Dynamikbereich

und den experimentell messbaren mechanischen Eigenschaften des eigentlichen Sinnesorgans.

-> Problem: Untersuchungen erfolgten an toten Hörorganen

1983: Hallowell Davis

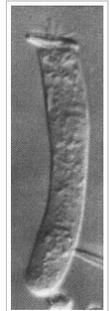
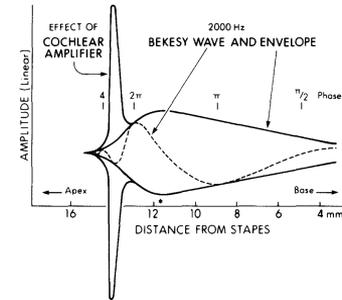
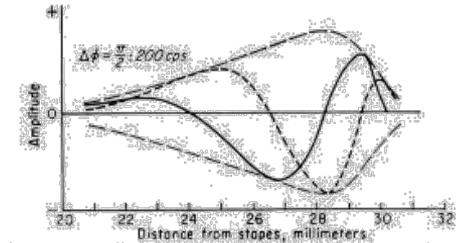
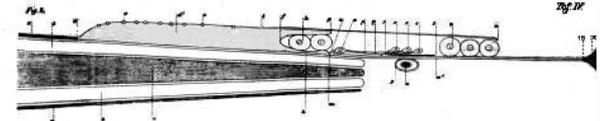
„An active process in cochlear mechanics“

Hypothese: Bei niedrigen Schallpegeln wirkt die Cochlea als scharf abgestimmter Verstärker

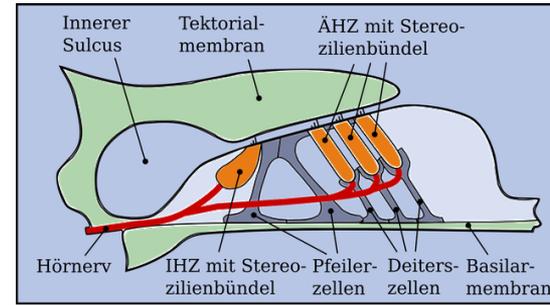
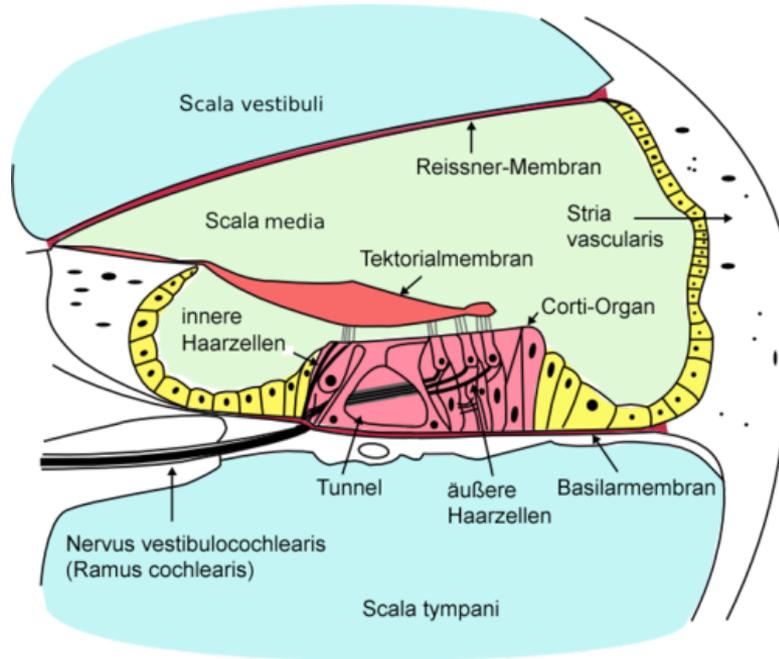
1984 - 1985:

Arbeiten von **Flock, Brownell, Zenner und Ashmore**

- Beweis der biomechanische Aktivität der äußeren Haarzellen (kontraktile Motilität)



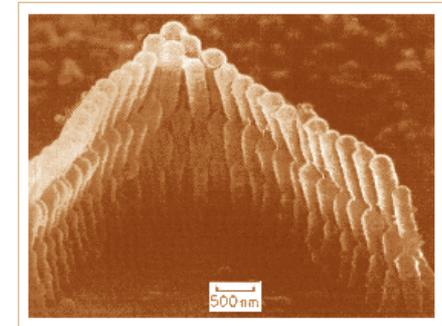
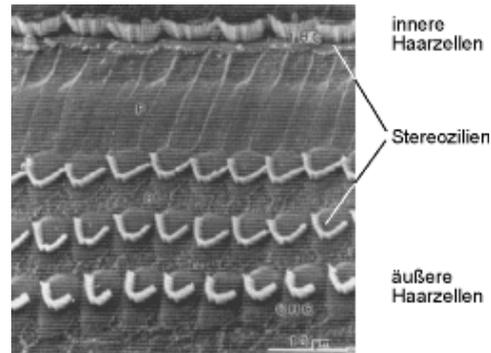
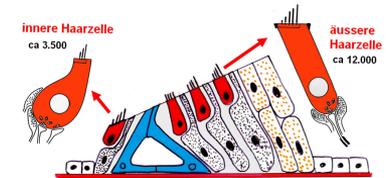
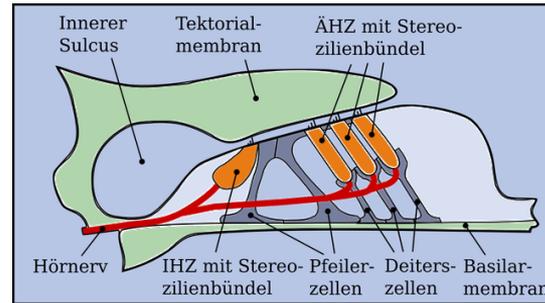
Corti-Organ - Aufbau und Funktion



Corti-Organ - Aufbau und Funktion

Anordnung der Haarzellen im Corti-Organ

- 3-reihige Anordnung der äußeren Haarzellen (OHC)
- Stereozilienbündel der OHC sind mechanisch mit der Tektorialmembran (TM) verbunden
- 1-reihige Anordnung der inneren Haarzellen (IHC)
- Stereozilienbündel der IHC sind **nicht** mit der TM verbunden
- Die Stereozilien einer Haarzelle sind V-förmig und in 3 Reihen unterschiedlicher Länge geordnet.

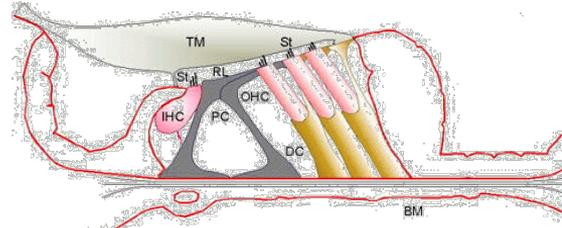


Corti-Organ - Verstärkungsmechanismus

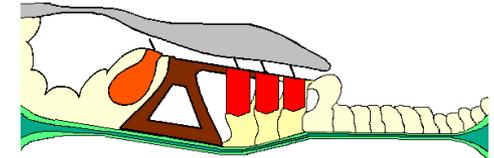
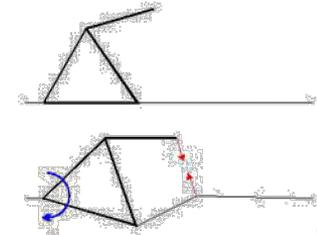
Mechanische Rückkopplung und Verstärkung der

BM-Auslenkung

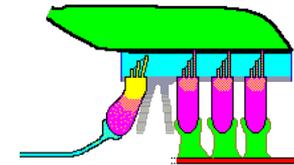
- Die Abschnitte des Corti-Organs können als eine Oszillatorbank betrachtet werden, die von der Basiliarmembran über eine viskoelastische Kopplung (Deiter-Zellen) angetrieben werden.
- Eine (passive) Auslenkung der Basiliarmembran erzeugt über das relativ steife Gerüst der Pfeilerzellen eine parallele Verschiebung des Spaltes zwischen der Lamina reticularis und Tektorialmembran und somit zu einer Auslenkung der Stereozilien.
- Die äußeren Haarzellen reagieren auf die Auslenkung mit einer Kontraktion ihrer Zellkörper.
- Die Kontraktion der OHC führt zu einer Verkipfung des Pfeilerskeletts und damit zu einer zusätzlichen (aktiven) Auslenkung der Basiliarmembran.
- Die inneren Haarzellen registrieren passiv die Bewegung und geben ihre Erregung über efferente Fasern an den Hörnerv weiter.



Anatomisch-mechanischer Aufbau des Corti-Organs.
Basiliarmembran BM, Lamina reticularis RL, Deiter-Zellen DC, Pfeilerzellen PC, Tektorialmembran TM



reaktive Auslenkung der Basiliarmembran durch Verkipfung der Pfeilerstruktur

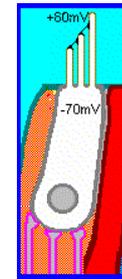
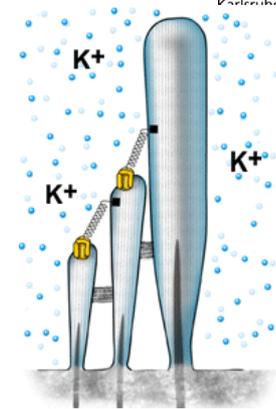
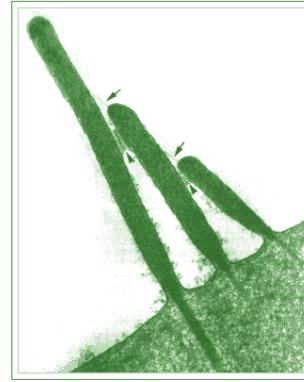


Darstellung der viskoelastischen Kopplung zwischen dem BM-Oszillator und dem TM-Oszillator

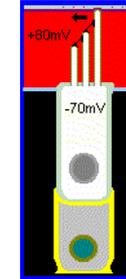
Sensorische Funktion der Haarzellen

Mechanisch transduzierte Depolarisation der Haarzellen

- Die hintereinanderliegenden Stereozilien sind über Filamente verbunden.
- Bei einer Auslenkung der Zilien kommt es zu mechanischen Scherspannungen an den Filamenten
- Abhängig von der mechanischen Spannung öffnen sich Ionenkanäle auf der Ziliarmembran.
- In der Scala media / innerer sulcus befindet sich eine hohe Kaliumkonzentration (Endolymphe), wodurch gegenüber der Perilymphe (Scala tympani / Ductus cochlea) ein endocochleäres Potenzial von + 80mV aufgebaut wird.
- Bei Öffnung der Ionenkanäle strömt K^+ in die Zelle -> Depolarisation!
- Kaskadenartig öffnen sich Kalziumkanäle
-> Ca-Einstrom und schließen der K-Kanäle
-> Freisetzung von Glutamat (Neurotransmitter) an der Basis
- IHC: Aktivierung des Bewegungsproteins Prestin in der Ziliarmembran und Wiederaufrichtung der Stereozilien
- OHC: zusätzlich Aktivierung von Prestin in der Zellmembran -> Kontraktion!

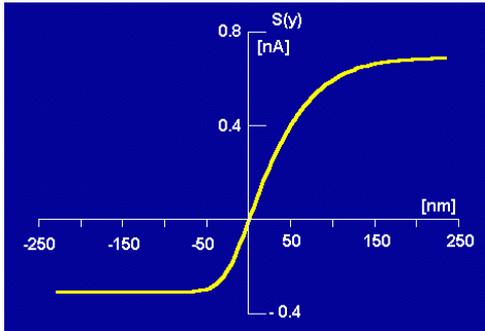


IHC



OHC

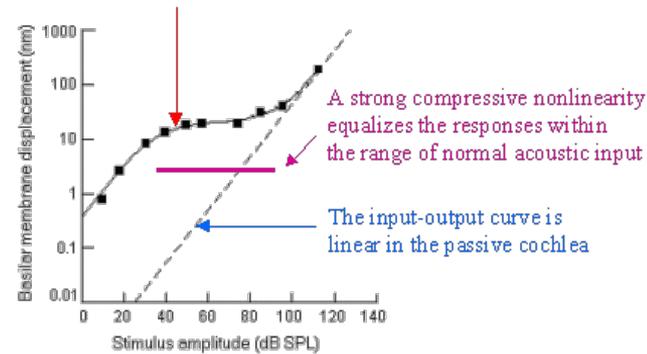
Äußere Haarzellen - Nichtlineare Kennlinie



Abhängigkeit des Transmembranstroms der OHC in
Abhängigkeit von der Auslenkung der Stereozilien:

- Lineares Verhalten für kleine Auslenkungen um die Ruhelage.
- Sättigung bei großen Auslenkungen.

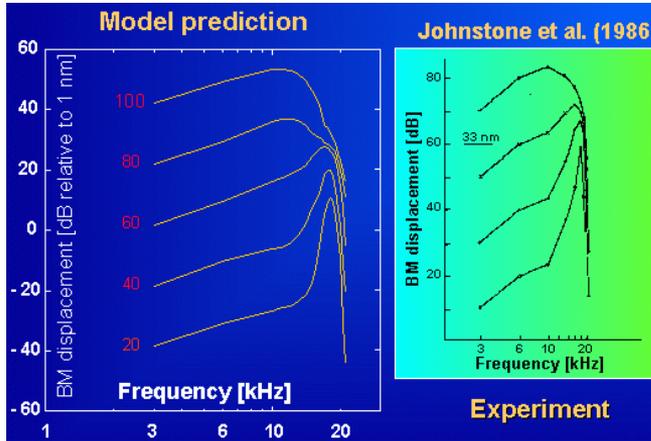
Cell motors amplify the basilar membrane motion by about
1000 times for input sound pressure levels up to 40 dB



Johnstone et al. (1986)

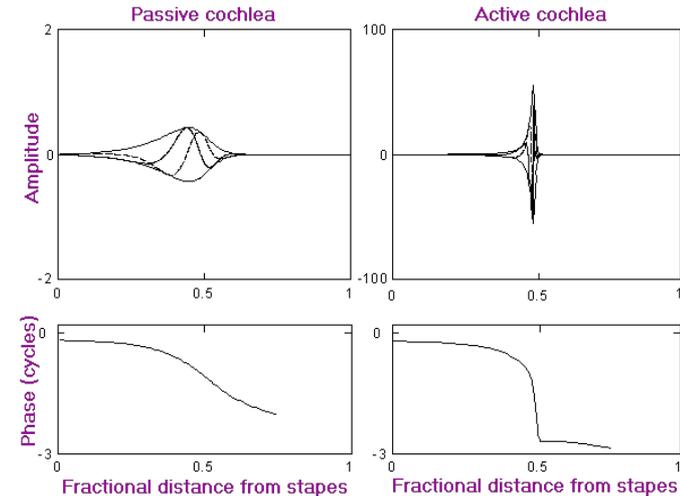
Gemessene Auslenkung der BM bei
unterschiedlichen Stimulusamplituden:

- Nichtlinearer Verlauf!
- Kleine Amplituden werden hoch verstärkt
- Bei großen Schallpegeln überwiegt das Dämpfungsverhalten der passiven Cochlea.
- Im Bereich normaler Schallpegel verläuft die Kennlinie annähernd waagrecht



Gemessene und simulierte Auslenkung der BM am 18 kHz - Ort:

- Hohe Frequenzselektivität bei kleinen Schallpegeln
- Verlust der Selektivität bei hohen Schallpegeln



Qualitativer Vergleich der Wanderwellen auf der passiven und auf der aktiven Cochlea.

- Erhöhung der Frequenzselektivität
- Erhöhung der Dynamik