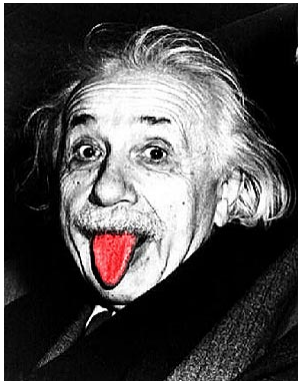


Hören

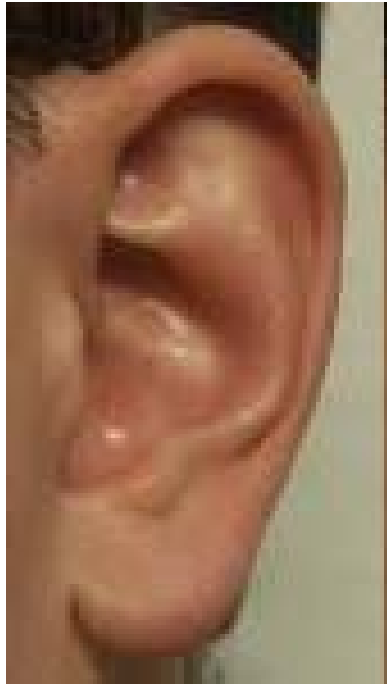
(und andere Sinne)

Hören

Chemie



Mechanik



„Optik“



Hörbereich



10 – 3.000 Hz



1000 – 10.000 Hz



20 – 16.000 Hz



20 – 35.000 Hz



10 – 100.000 Hz



1000 – 100.000 Hz

Hörbereich

Menschliches Ohr:

Wahrnehmbarer Frequenzbereich 16 Hz – 20.000 Hz

Entspricht ca. 10 Oktaven (1 Oktave = Verdopplung der Frequenz)

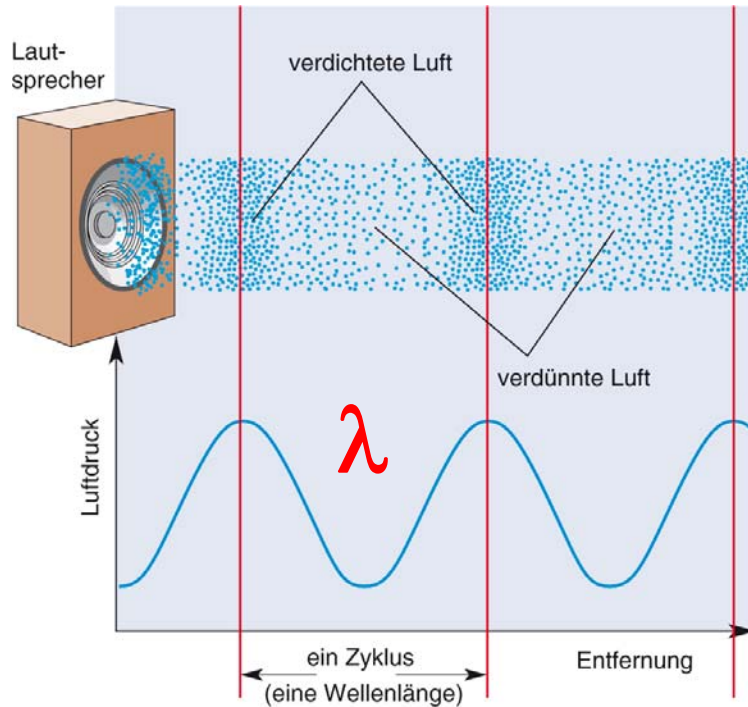
Niedrige Frequenz = tiefer Ton; hohe Frequenz = hoher Ton



Infraschall: < 16 Hz; **Ultraschall:** > 20.000 Hz

Hörschwelle: niedrigster hörbarer Schalldruck (2×10^{-5} Pa)

Schall



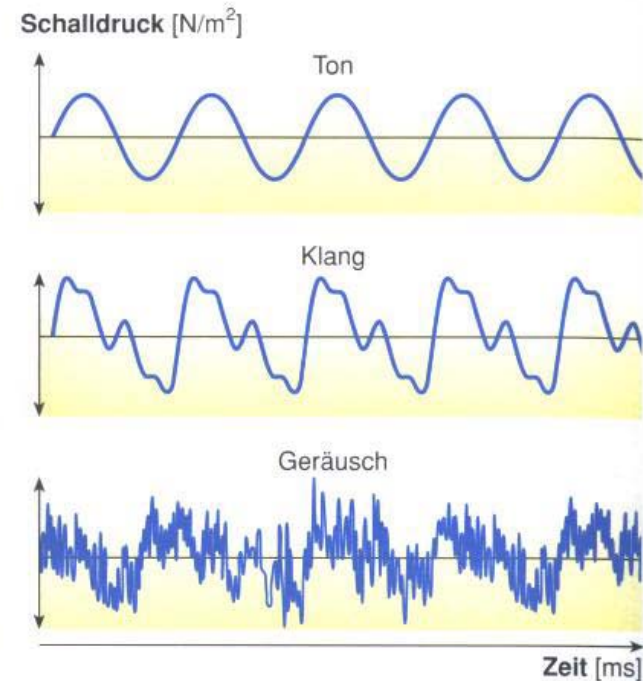
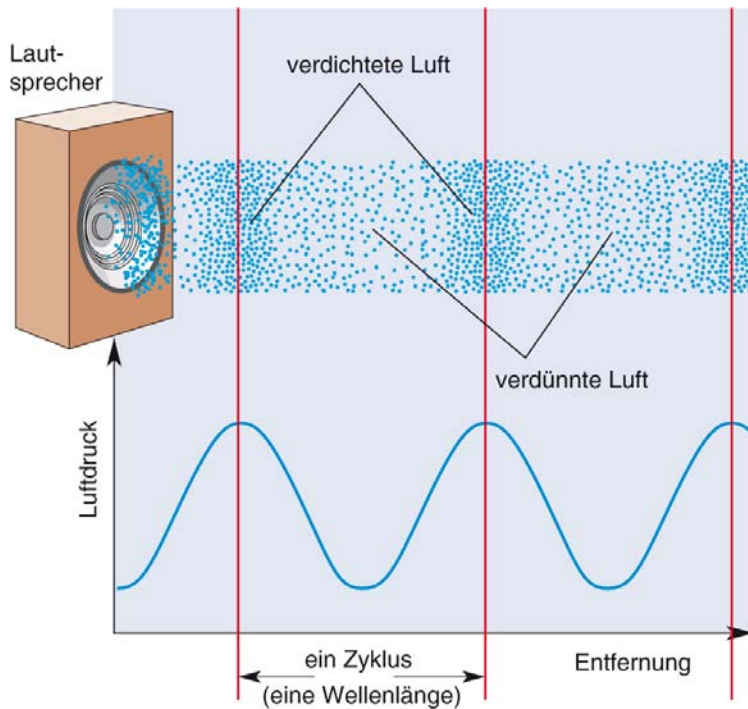
Schallwelle = „Luftdruckschwankung“

$$\lambda = c / f$$

c = Schallgeschwindigkeit
 f = Frequenz

Bsp: $340 \text{ m/s} / 10^3 \text{ s}^{-1} = 0,34 \text{ m}$

Schall



Schallwellenformen

Hörbereich

Schalldruckpegel (SPL= sound pressure level)

logarithmisches Maß für den Schalldruck

$$\begin{aligned} \text{SPL} &= 20 \times \log (\text{Schalldruck/Referenzschalldruck}) \\ &= 20 \times \log (\mathbf{P} / 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}) \end{aligned}$$

Verdoppelt sich der Schalldruck (**P**),
nimmt SPL um 6 dB zu

Verzehnfacht sich der Schalldruck (**P**),
nimmt SPL um 20 dB zu

Hörbereich

Schalldruckpegel (dB SPL)

Schallquelle

0	Absolute Stille
30	Flüstern
40	Leise Unterhaltung
60	Normale Unterhaltung
80	Autobahn (25 m Entfernung)
100	Diskotheke
120	Naher Donner, Schuss
140	Düsenjet

Lautstärke

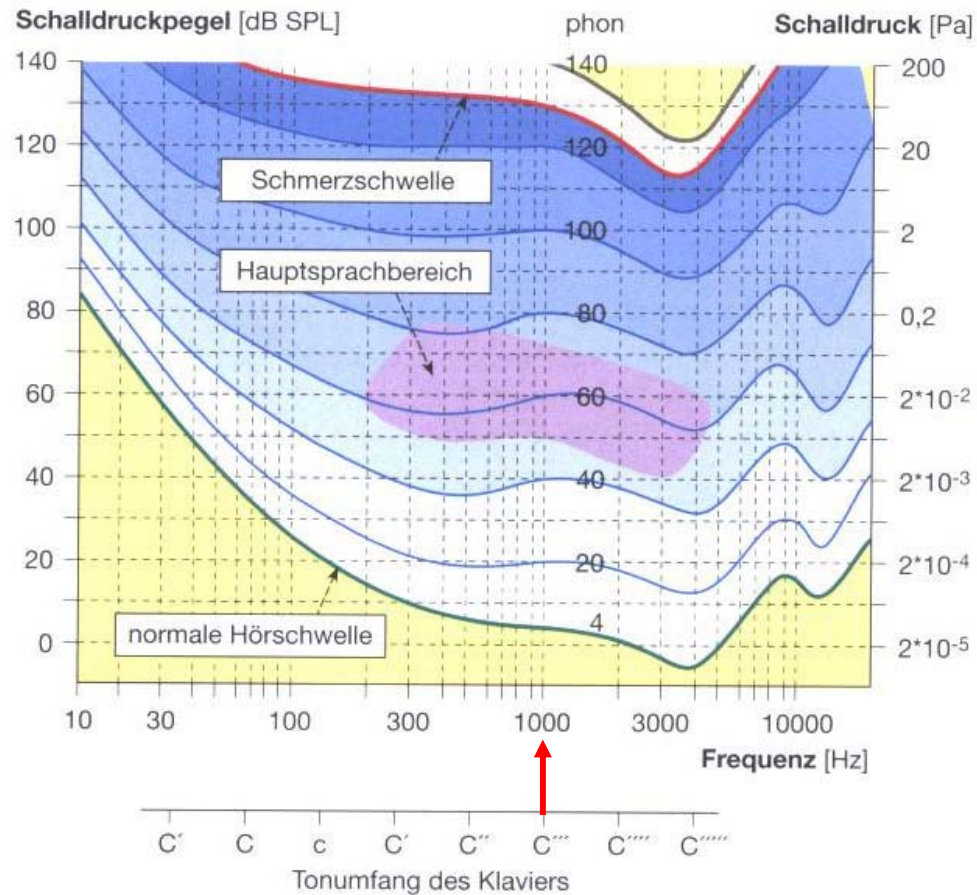
= frequenzabhängige Empfindlichkeit des Gehörs

Lautstärkepegel (phon)

Vergleich der empfundenen Lautstärke
bei unterschiedlichen Frequenzen

Gleich laut empfundene Töne besitzen
den gleichen Lautstärkepegel

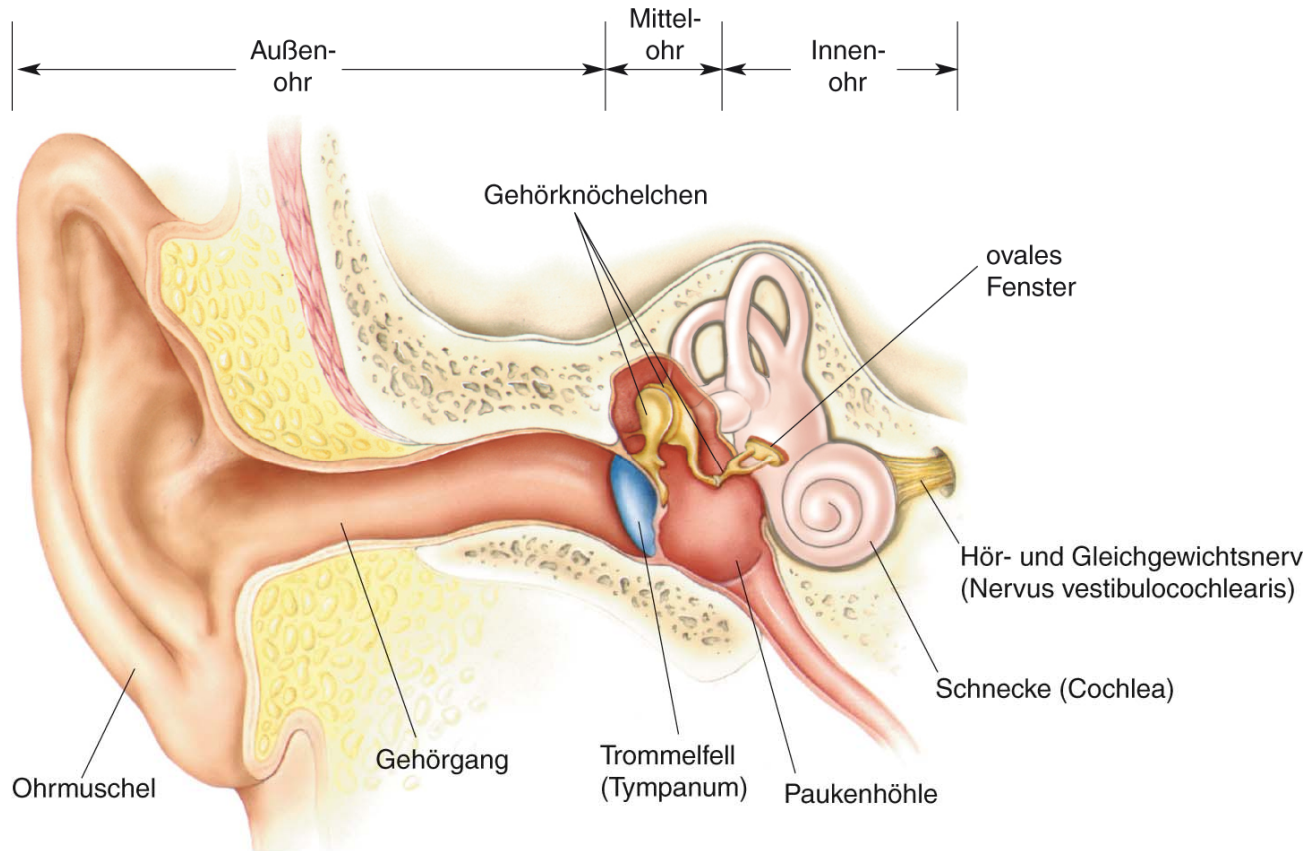
Hörbereich



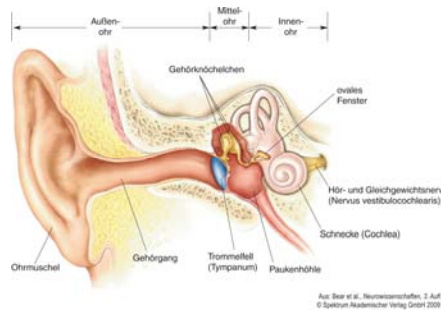
Definiton

Lautstärkepegel bei 1000 Hz = Schalldruckpegel (db)

Aufbau des Ohrs



Aufbau des Ohrs

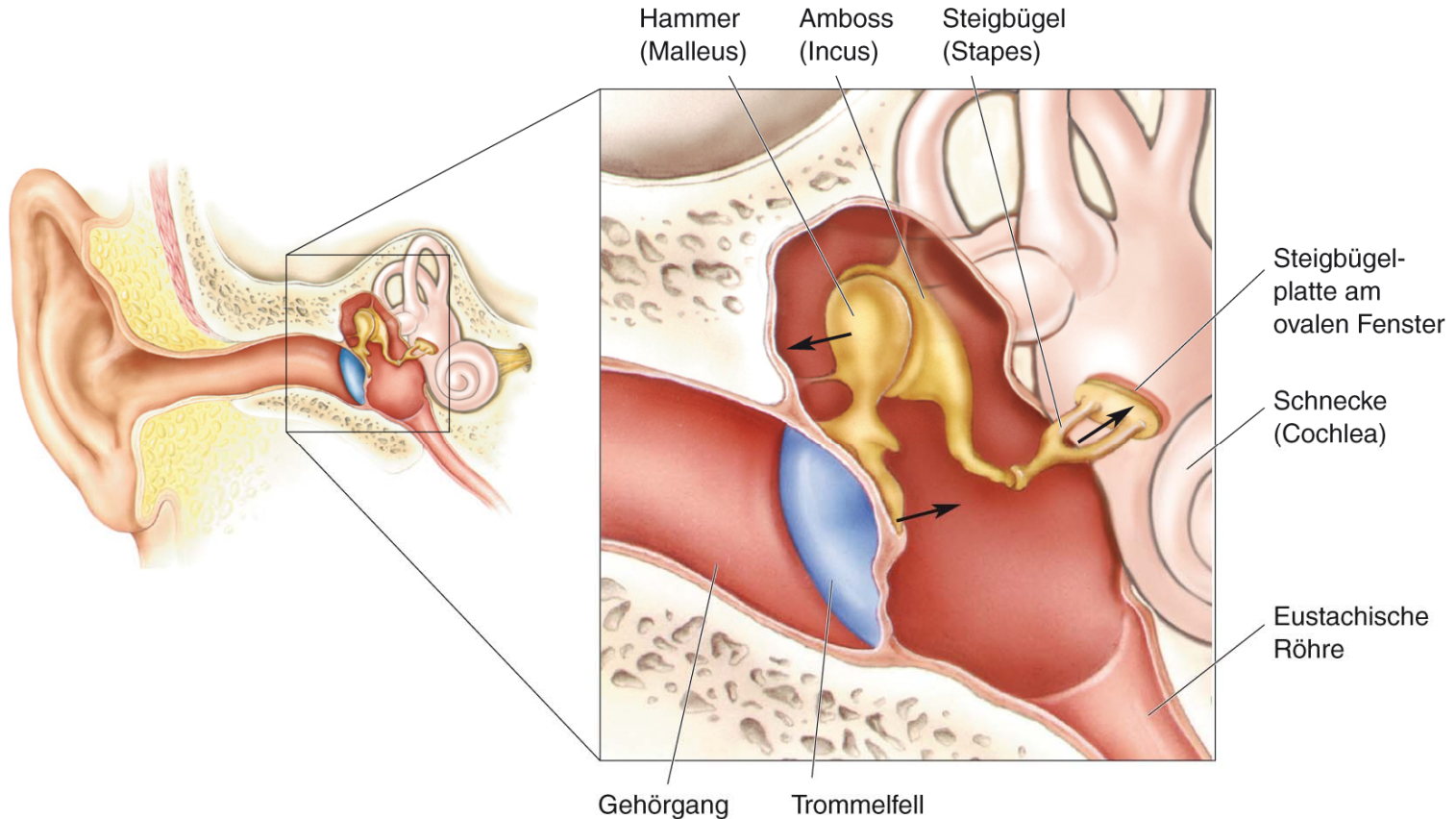


Außenohr: Auffangen und Lokalisieren des Schalls

Mittelohr: Schallweiterleitung, Impedanzanpassung durch Erhöhung der Druckamplitude auf das ovale Fenster

Innenohr: Signalverarbeitung

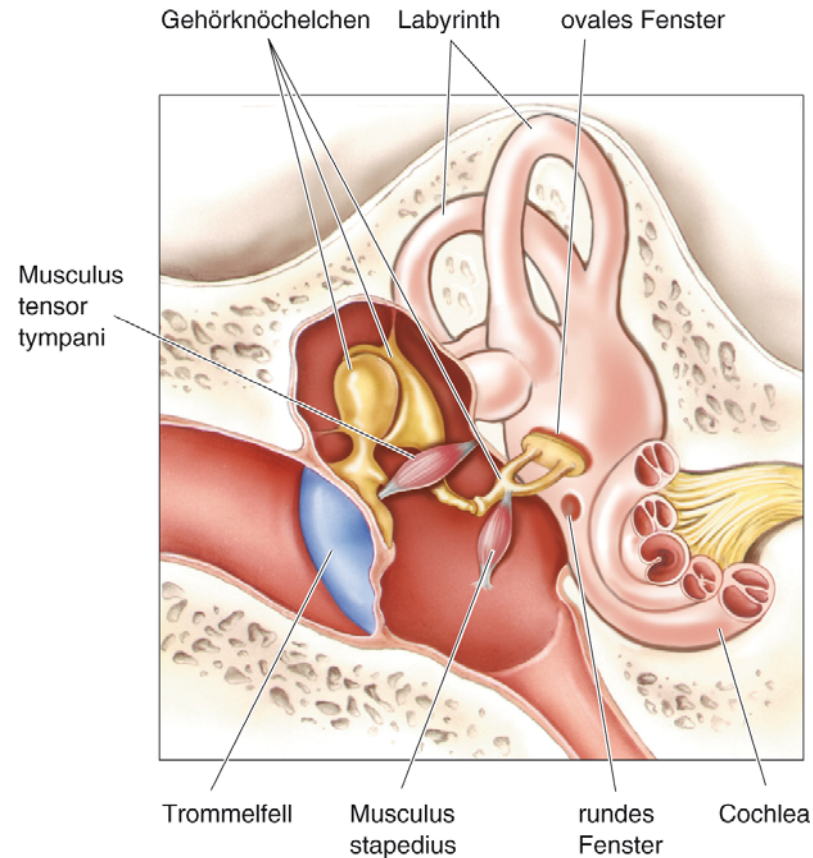
Aufbau des Ohrs



Aus: Bear et al., *Neurowissenschaften*, 3. Aufl.
© Spektrum Akademischer Verlag GmbH 2009

Impedanzanpassung: Trommelfell 90 mm^2 auf
ovales Fenster 3 mm^2 (\Rightarrow Druckerhöhung)

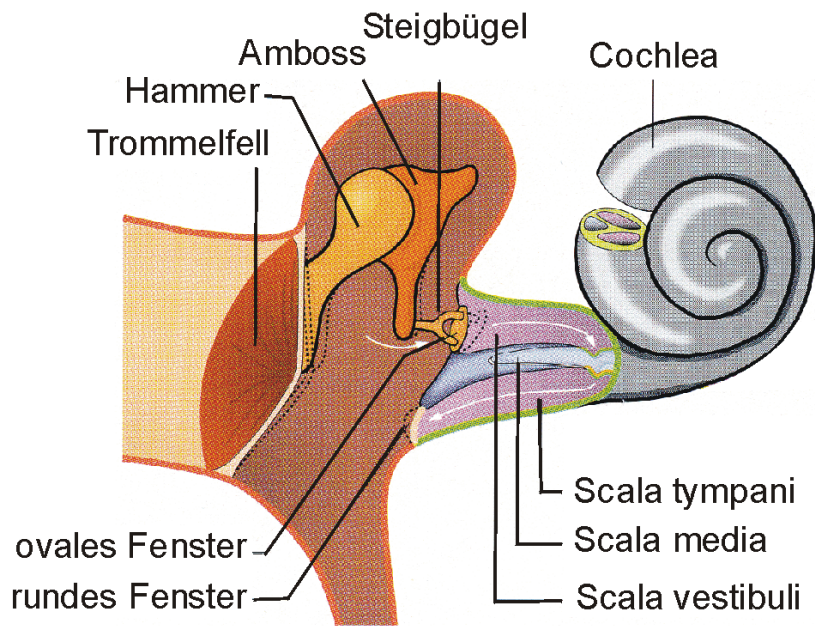
Aufbau des Ohrs



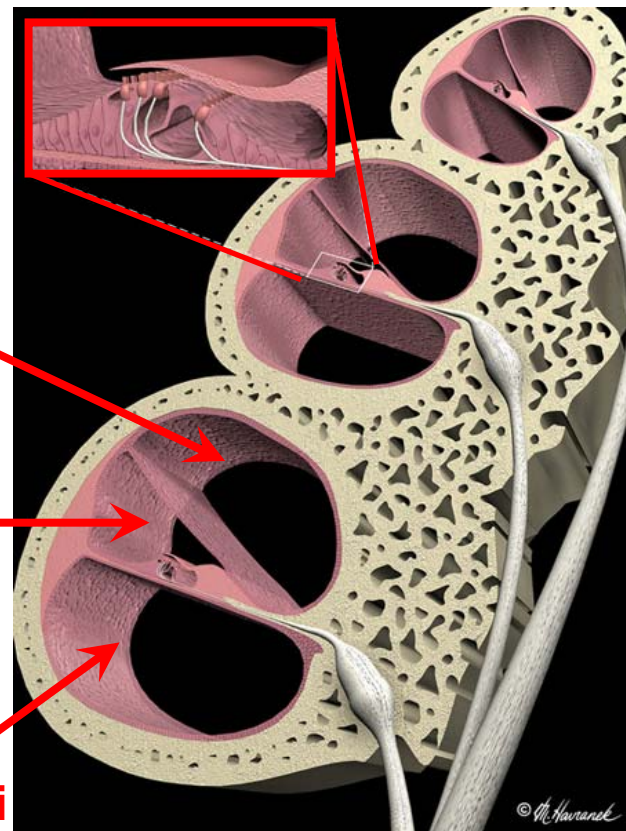
Aus: Bear et al., *Neurowissenschaften*, 3. Aufl.
© Spektrum Akademischer Verlag GmbH 2009

Mittelohrmuskeln können Schallübertragung dämpfen (bei hohen SPL)

Cochlea



Corti-Organ



Scala vestibuli und tympani:

Perilymphe

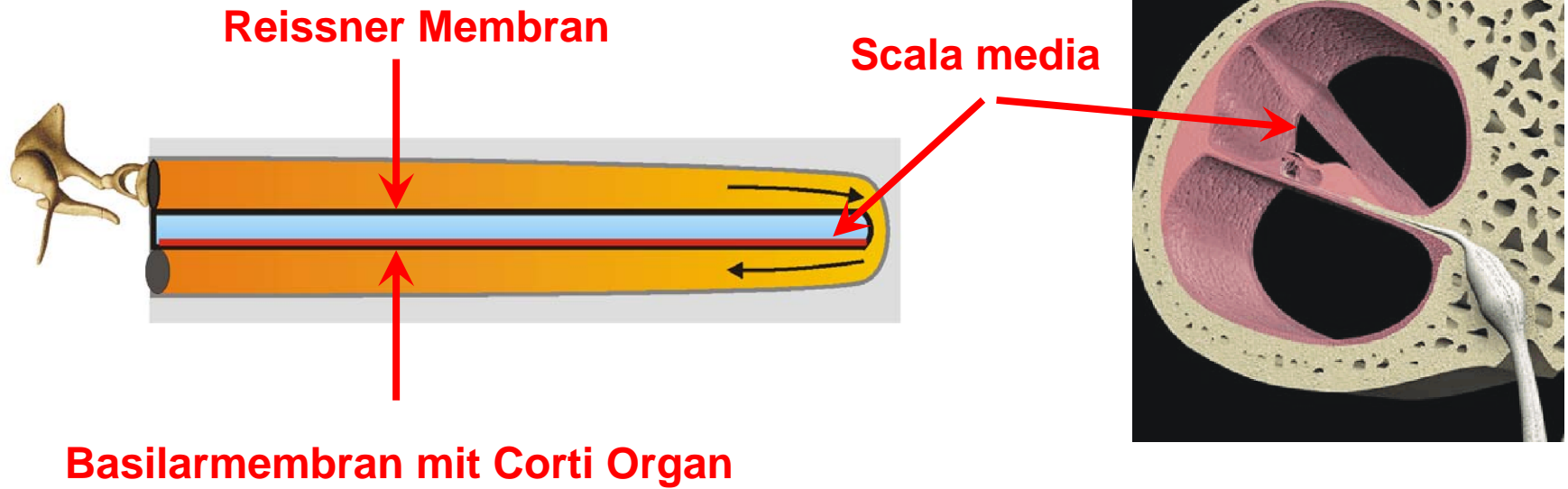
Scala media:

Endolymphe

Scala media

Scala tympani

Cochlea



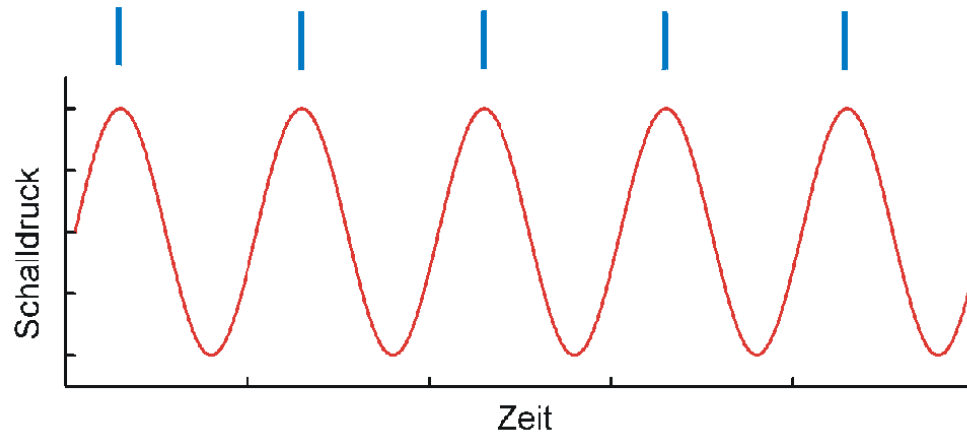
Cochlea

Aufgabe / Herausforderung:

Schnelle akustische Signale mit

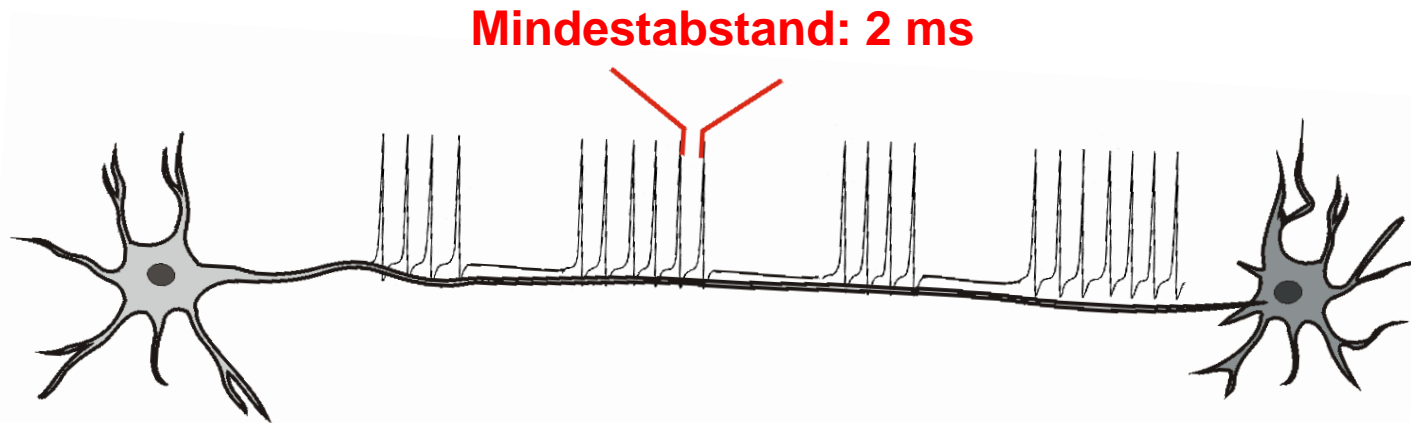
(rel.) langsamen Neuronen übertragen

Cochlea

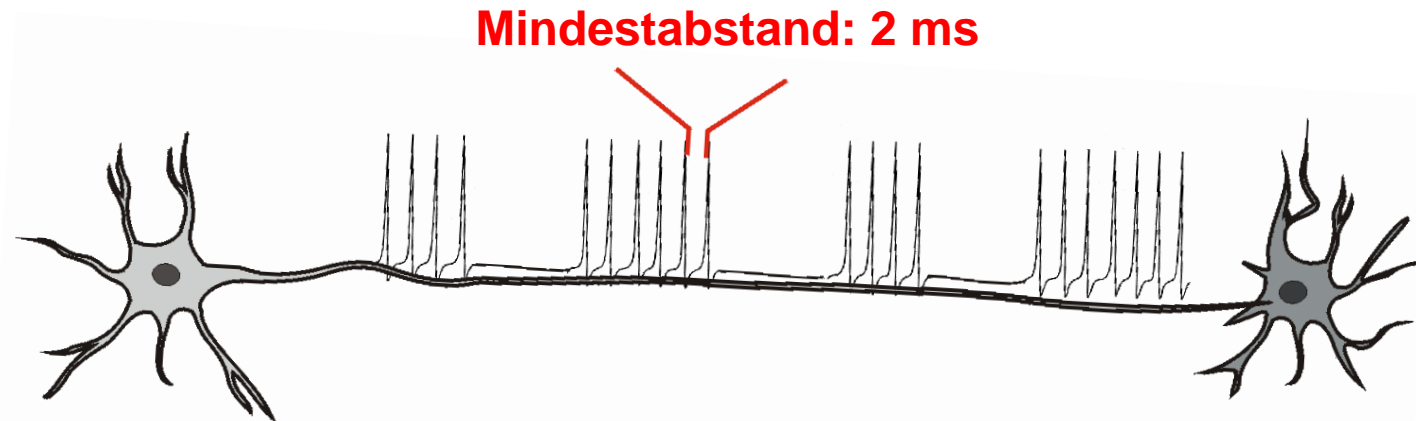
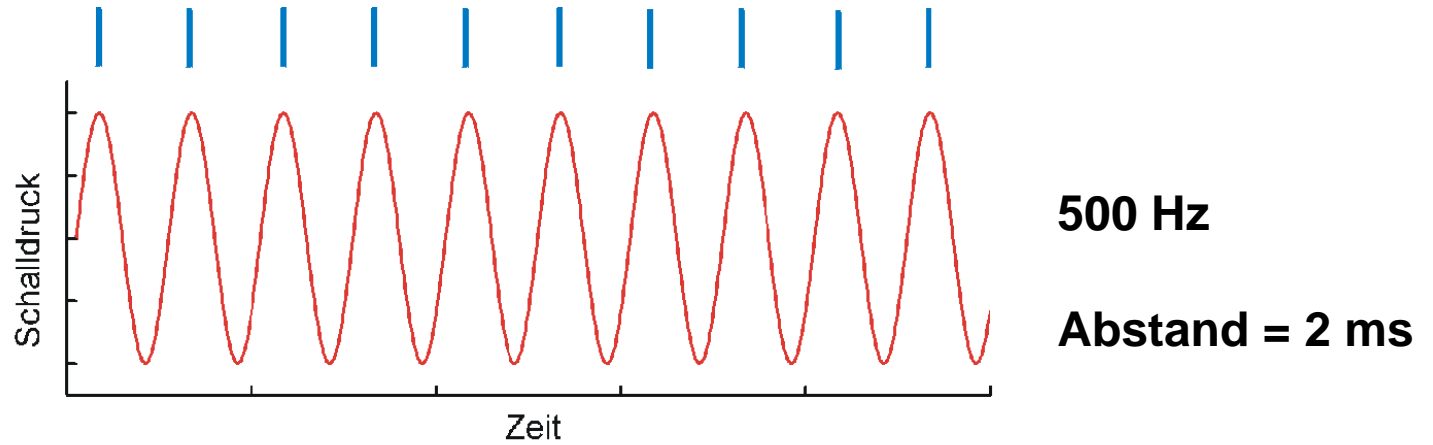


100 Hz

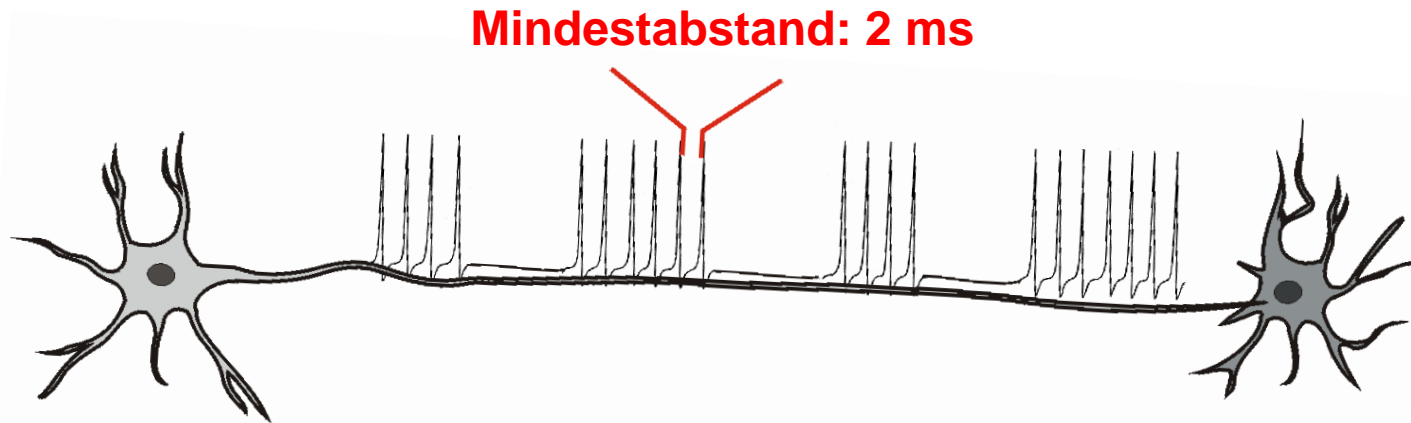
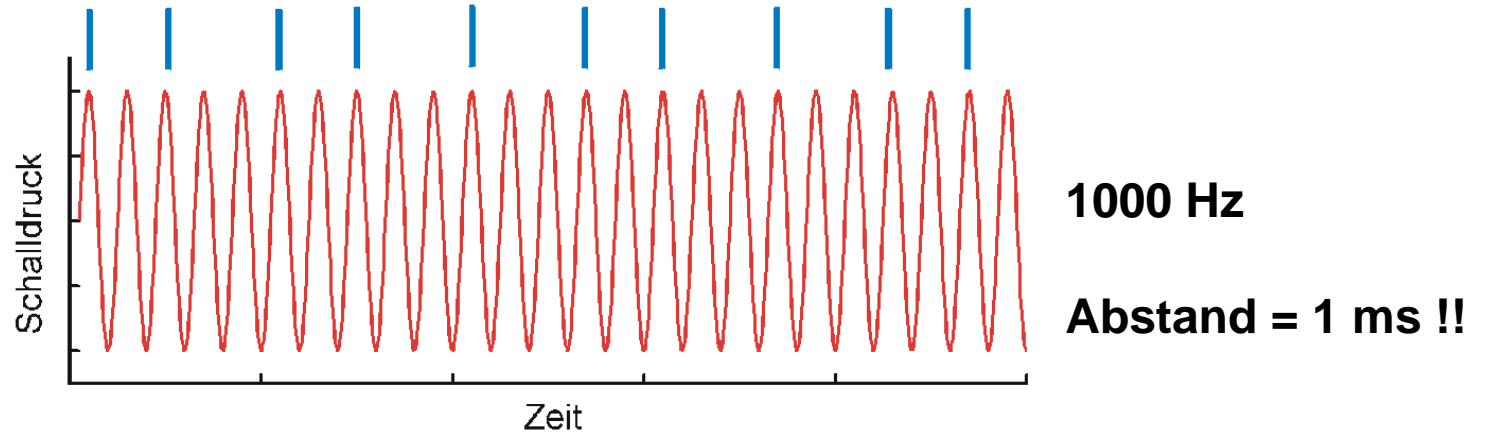
Abstand = 10 ms



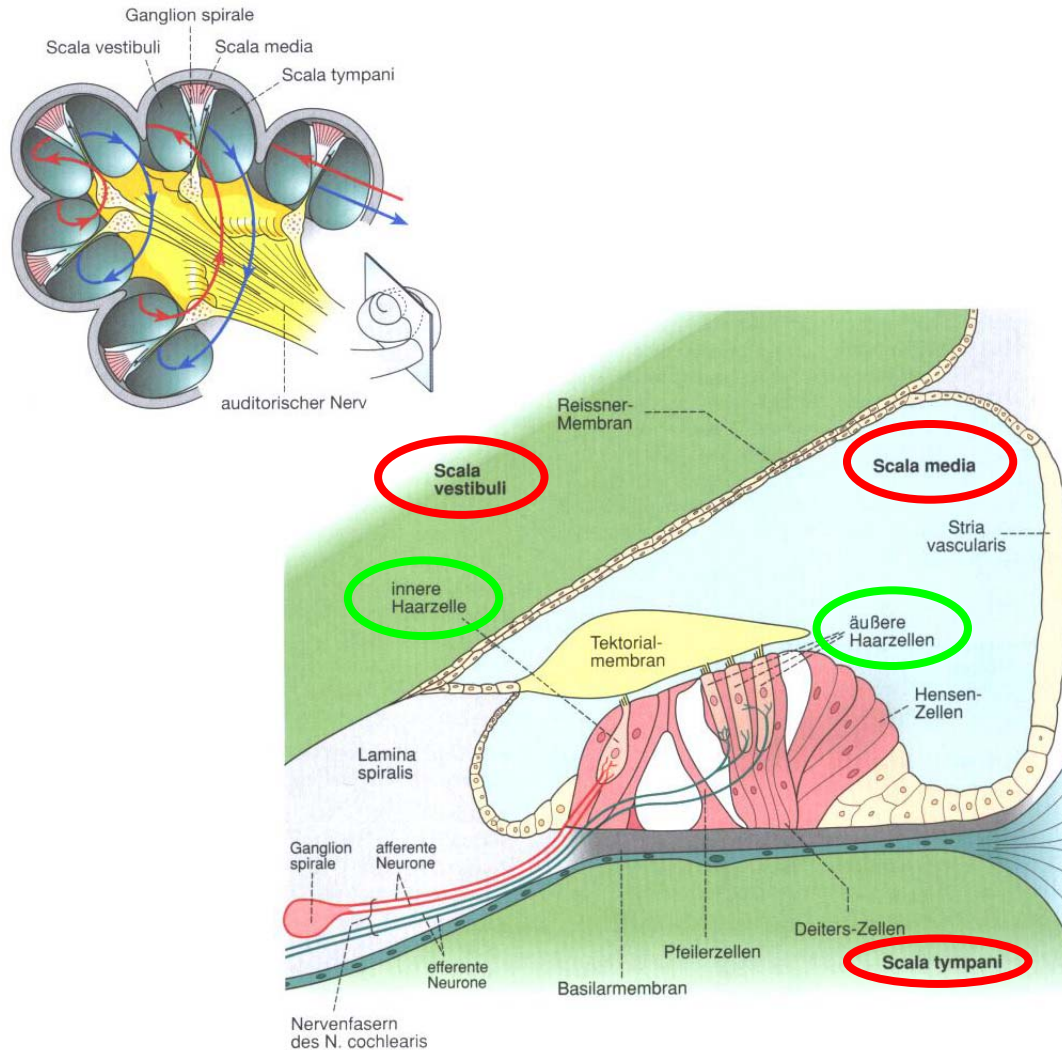
Cochlea



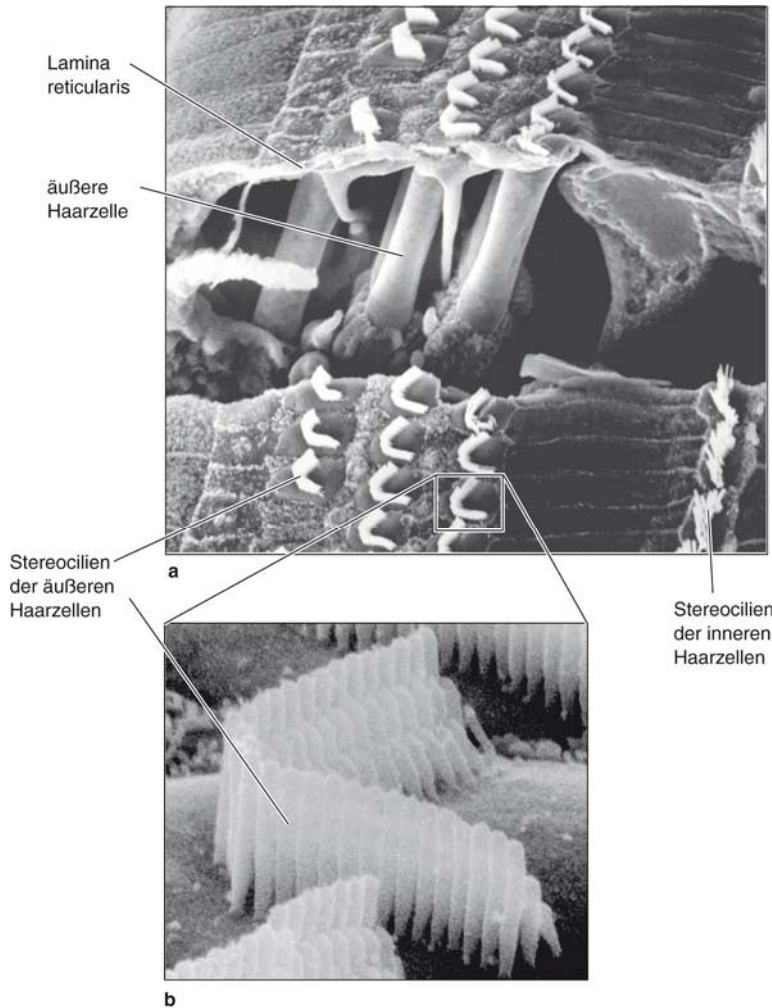
Cochlea



Cochlea



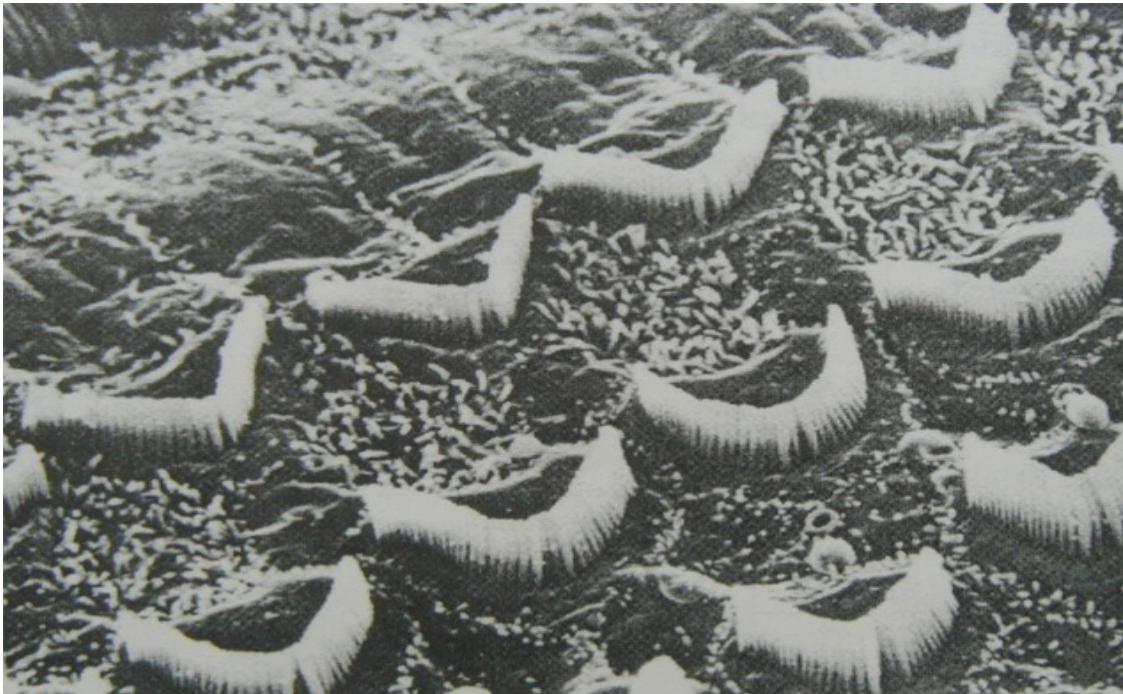
Haarzellen



Innere Haarzellen:
ca. 3.500

Äußere Haarzellen:
15.000 – 20.000

Haarzellen

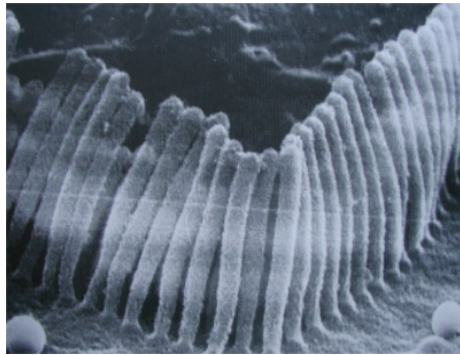


Stereocilien:
ca. 100 / Zelle
Durchmesser 0,5 μm

Leise Töne:
0,3 nm Auslenkung

Laute Töne:
20 nm Auslenkung

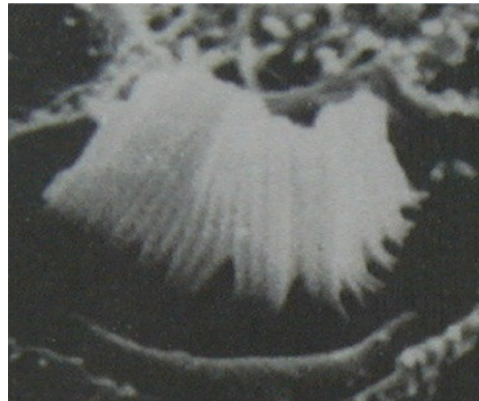
Haarzellen



normale Zilien



abgebrochene Zilien

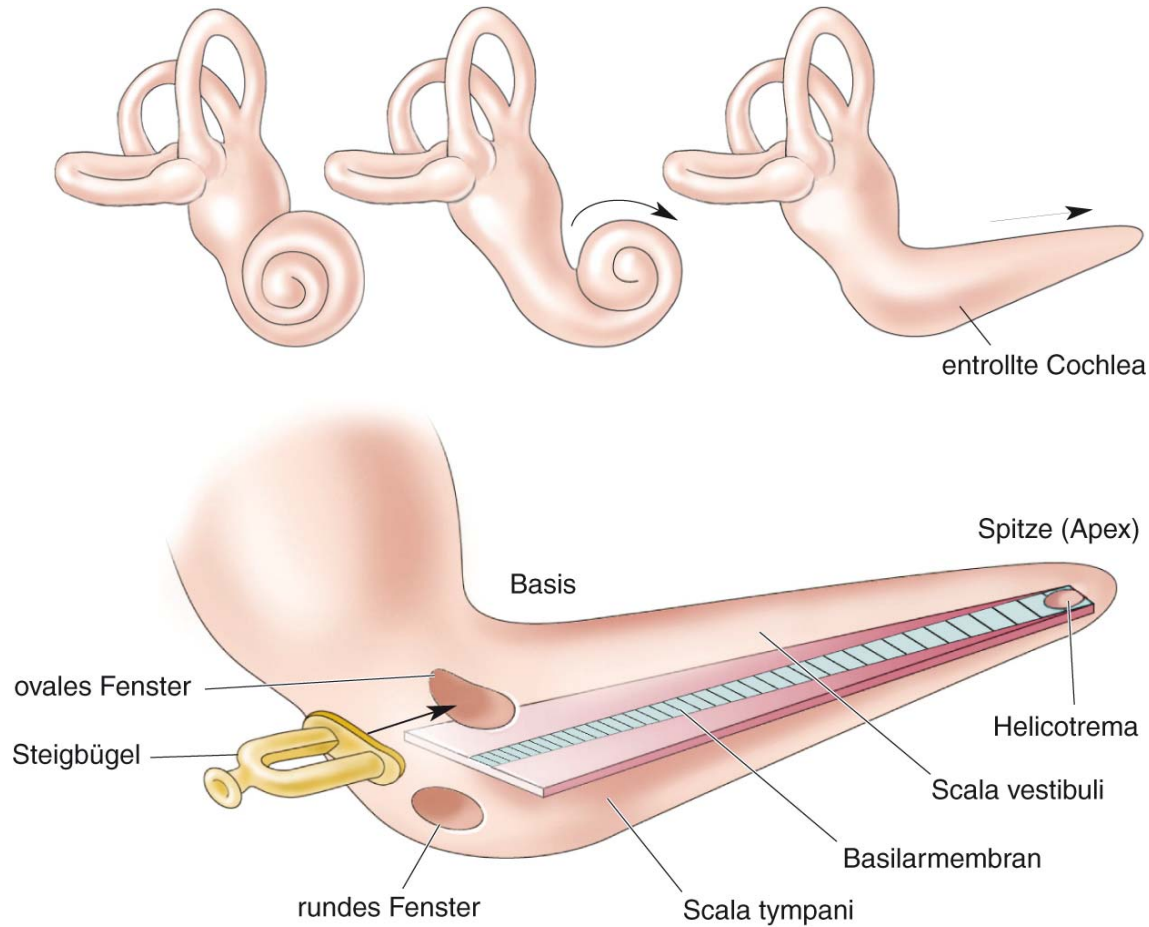


verklebte Zilien

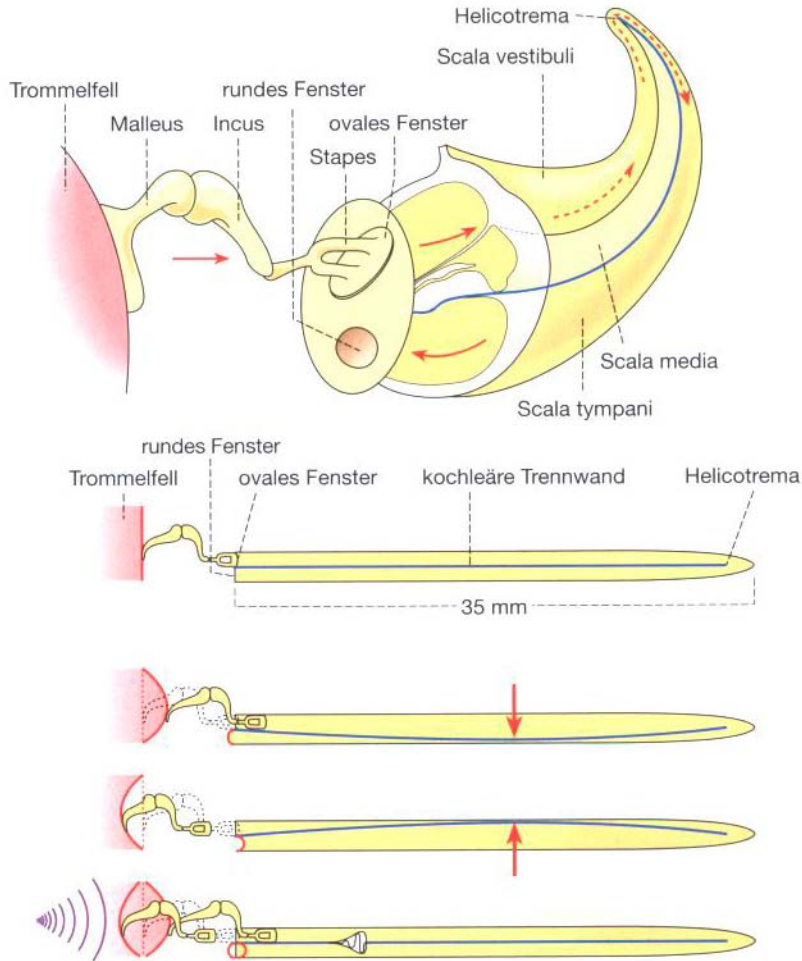


Zilien nach Steifeverlust

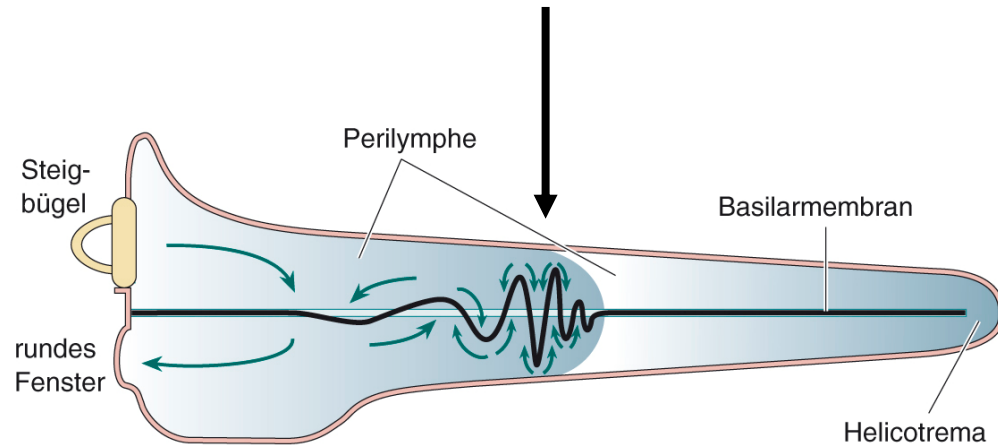
Cochlea



Cochlea



Wanderwelle



Schallanalyse in der Cochlea

Membran des ovalen Fensters bewegt sich abwechselnd nach innen und außen.

Perilymphe verschiebt sich in Richtung des runden Fensters.

Volumenverschiebungen induzieren Schwingungen der Basilarmembran (Corti Organ).

Schallanalyse in der Cochlea

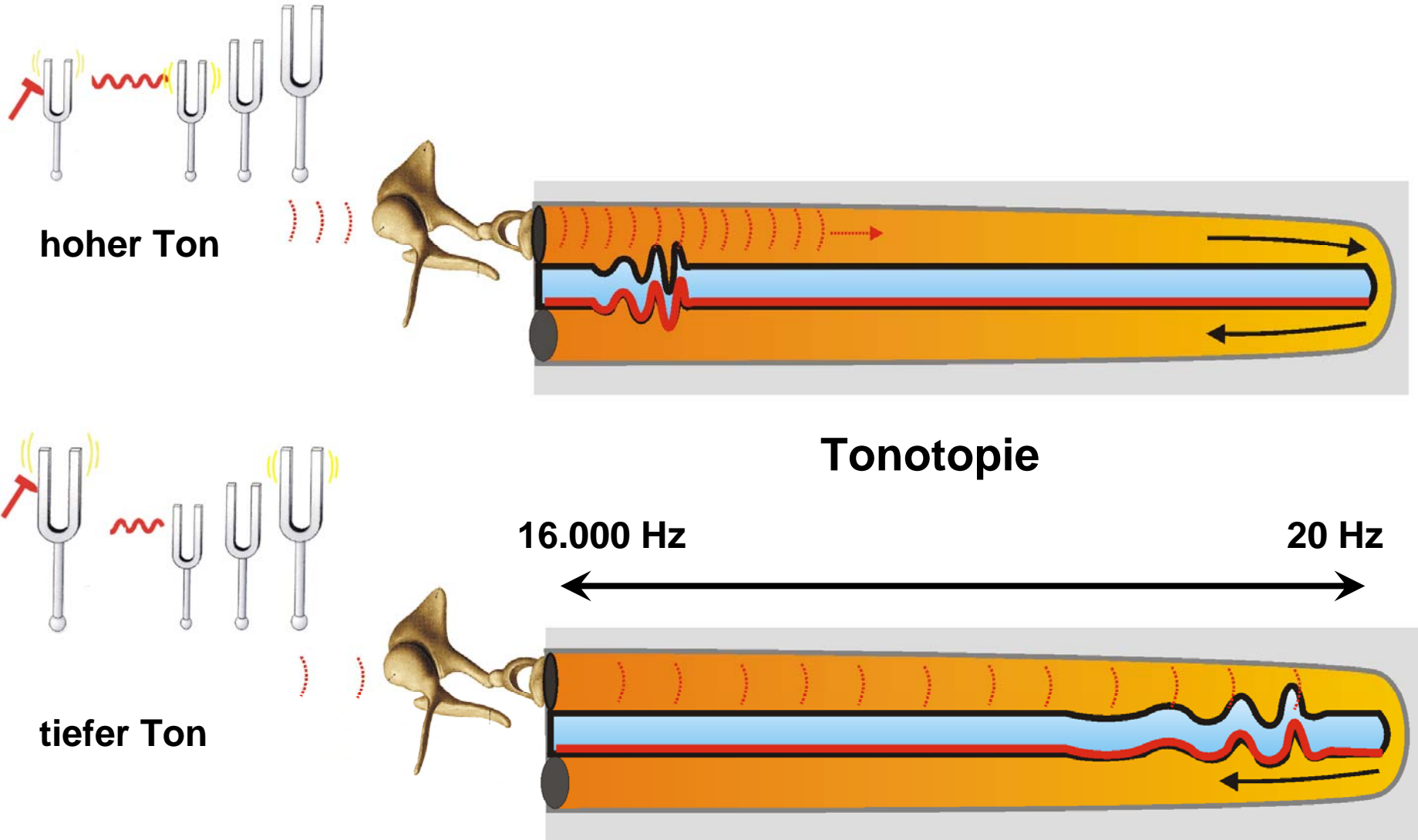
Mechanische Eigenschaften ändern sich von der Basis der Cochlea zum Apex: Breite nimmt zu, Masse nimmt von basal nach apikal zu, Dicke (und Steifigkeit) nimmt ab.

Wanderwelle: Amplitudenmaximum ist frequenzspezifisch.

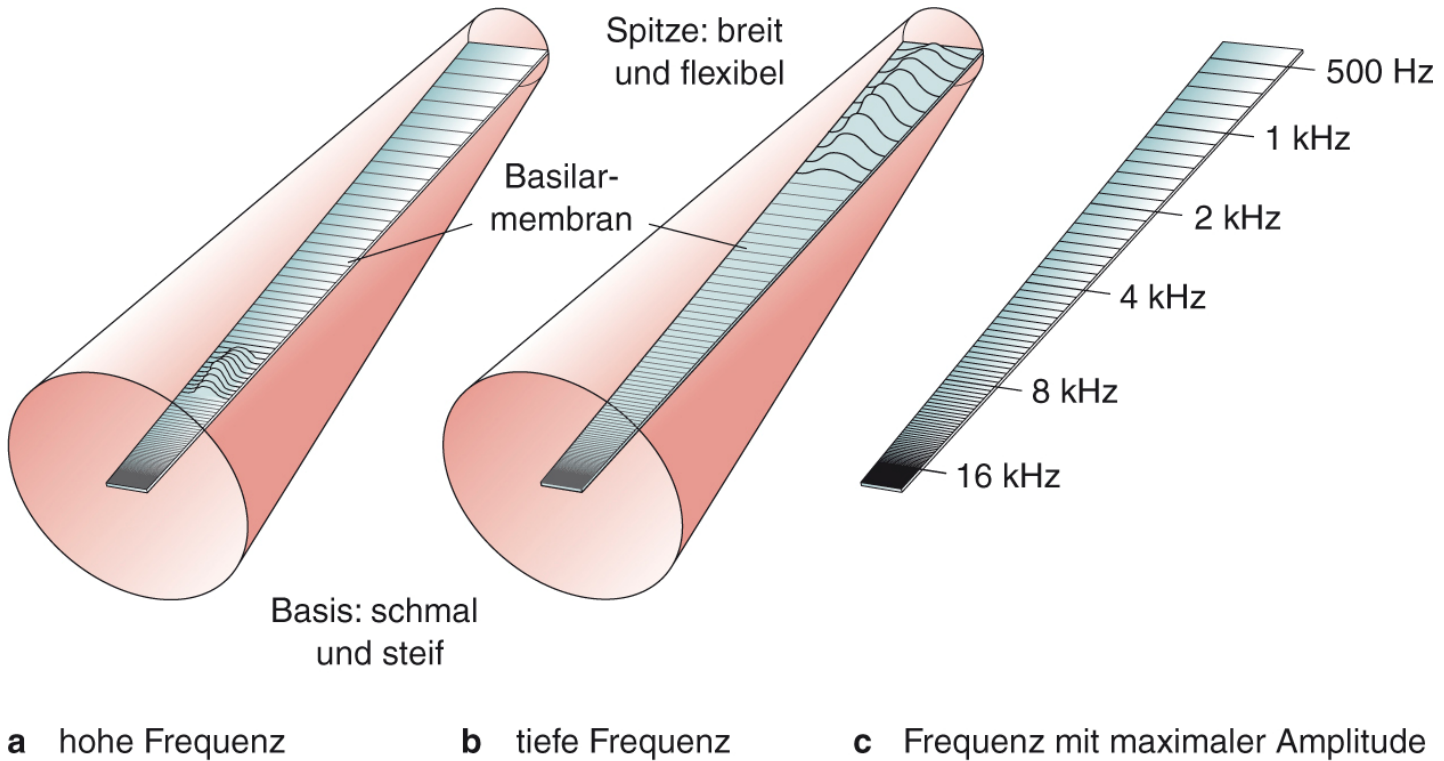
Frequenzdispersion: jeder Ort entlang der Basilarmembran von spezifischer Frequenz stimuliert = Tonotopie

Haarzellen besitzen „charakteristische Frequenz“
entsprechend ihrer Position entlang der Basilarmembran.

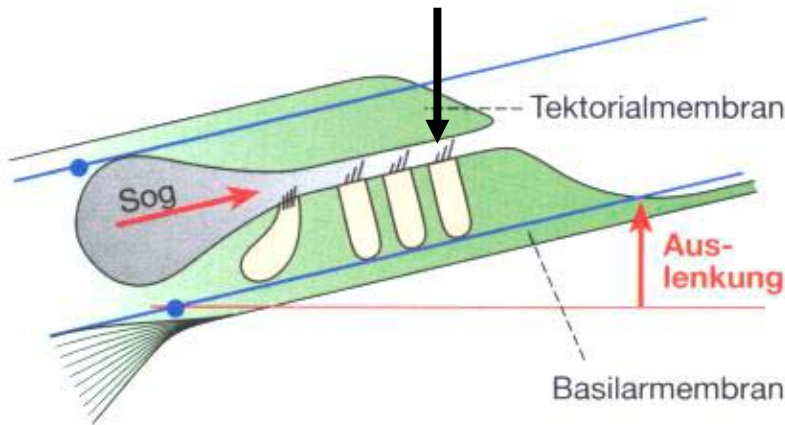
Resonanz in der Cochlea



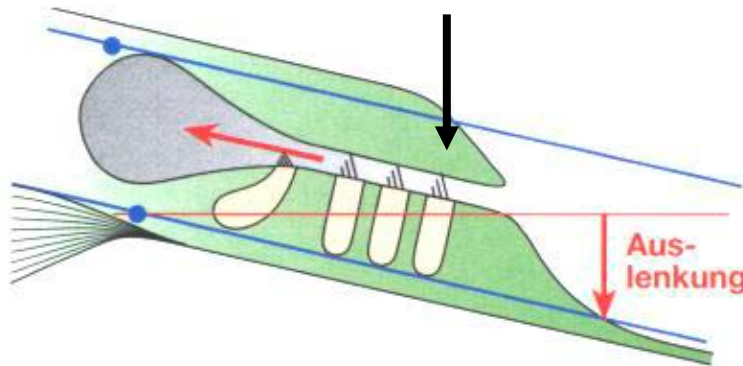
Schallanalyse in der Cochlea



Signalentstehung

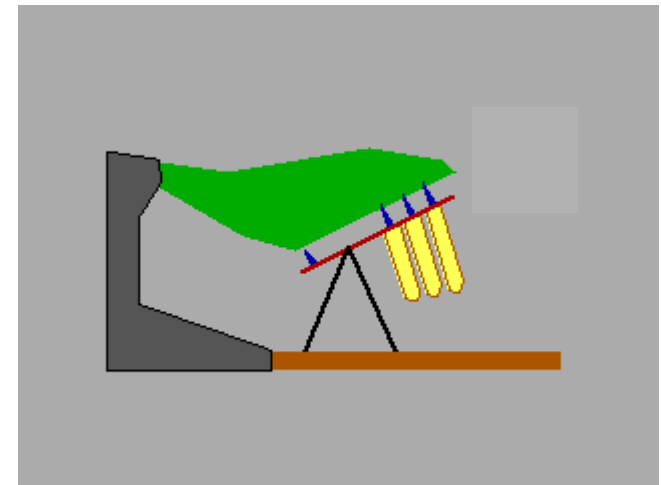
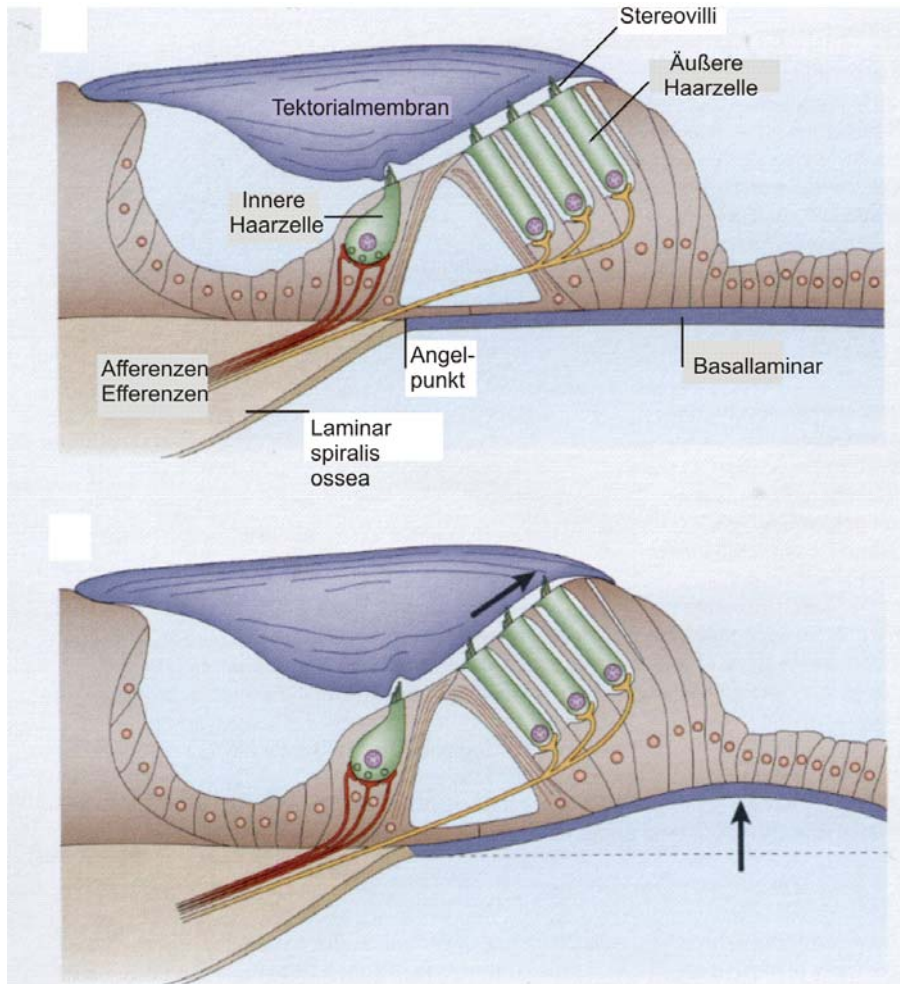


Stereocilien der äußeren Haarzellen stehen mit Tektorialmembran in Kontakt.



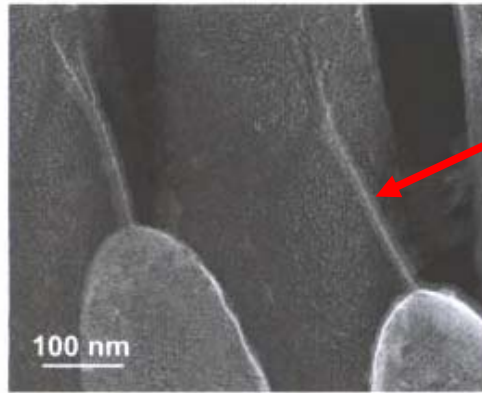
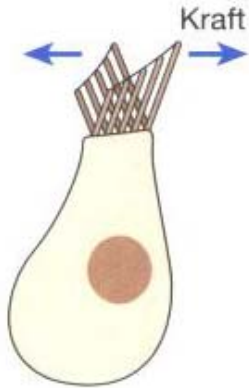
Auslenkung der Basilarmembran
⇒ **Deflektion** der Cilien

Signalentstehung



Mechanik des Corti Organs

Signalentstehung

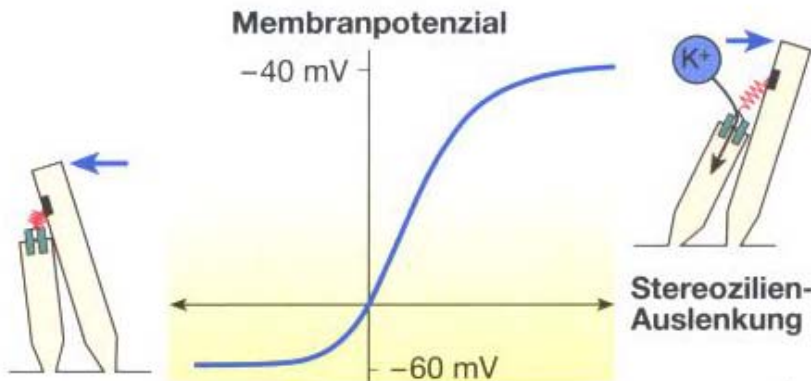


„Tip links“ verbinden Stereocilien.

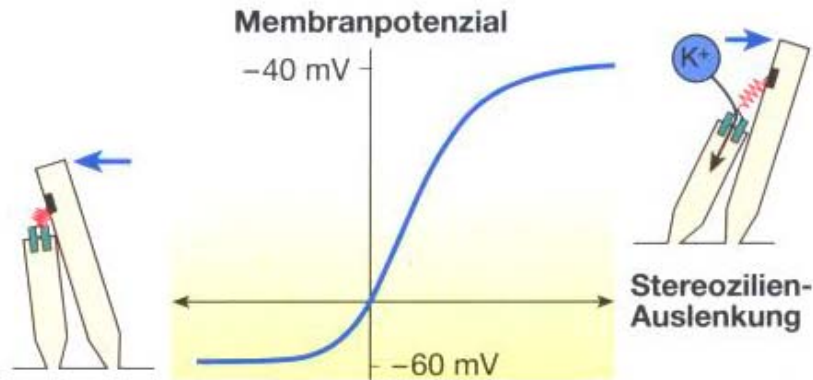
Auslenkung in Richtung der längsten Stereocilien.

Dehnung der Tip Links \Rightarrow exzitatorisch.

Auslenkung in Gegenrichtung \Rightarrow inhibitorisch

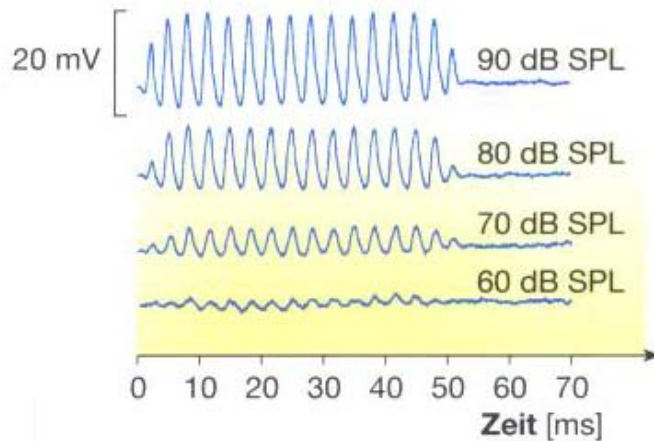


Signalentstehung



Rezeptorpotentiale einer inneren Haarsinneszelle

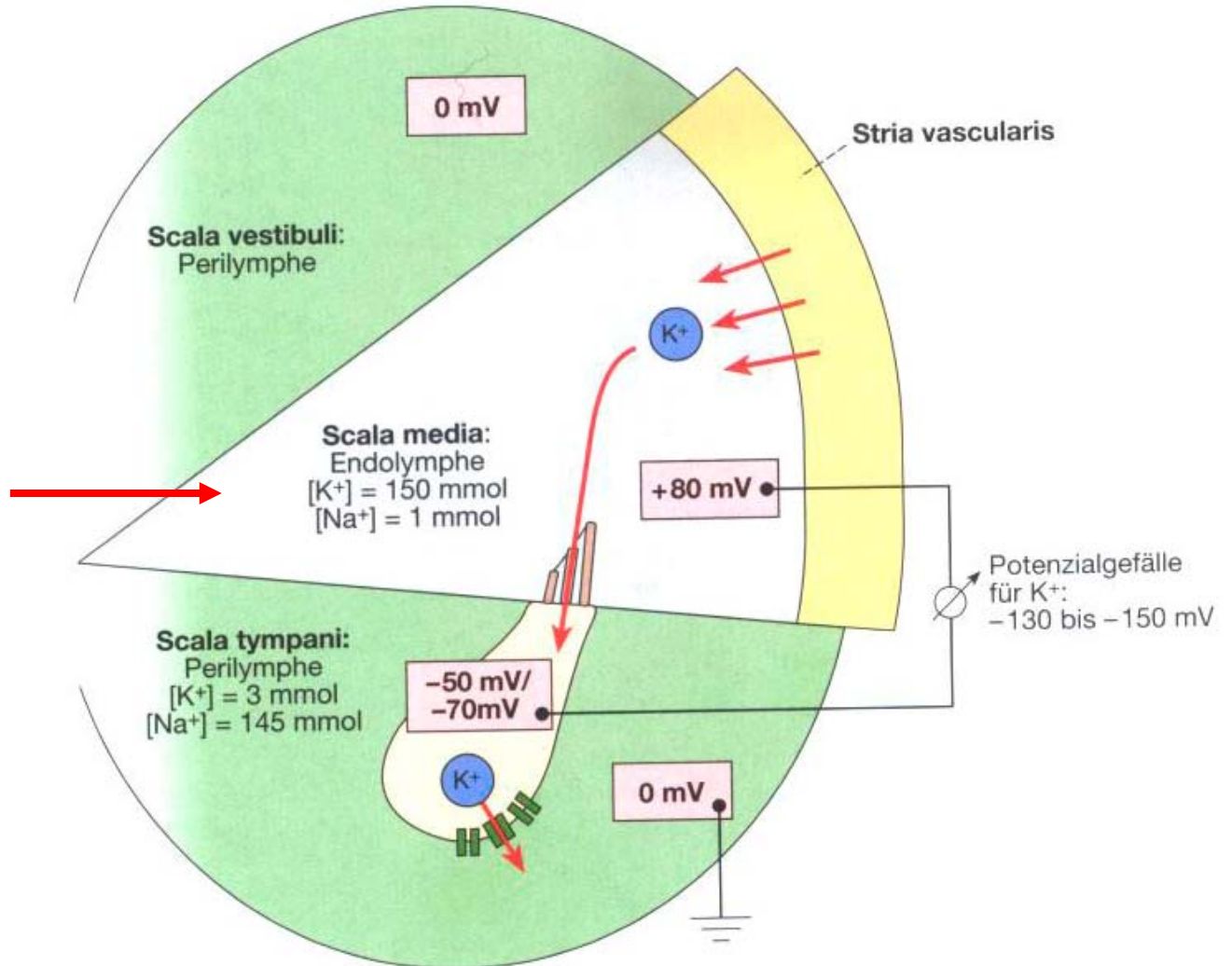
Beschallung mit 300 Hz



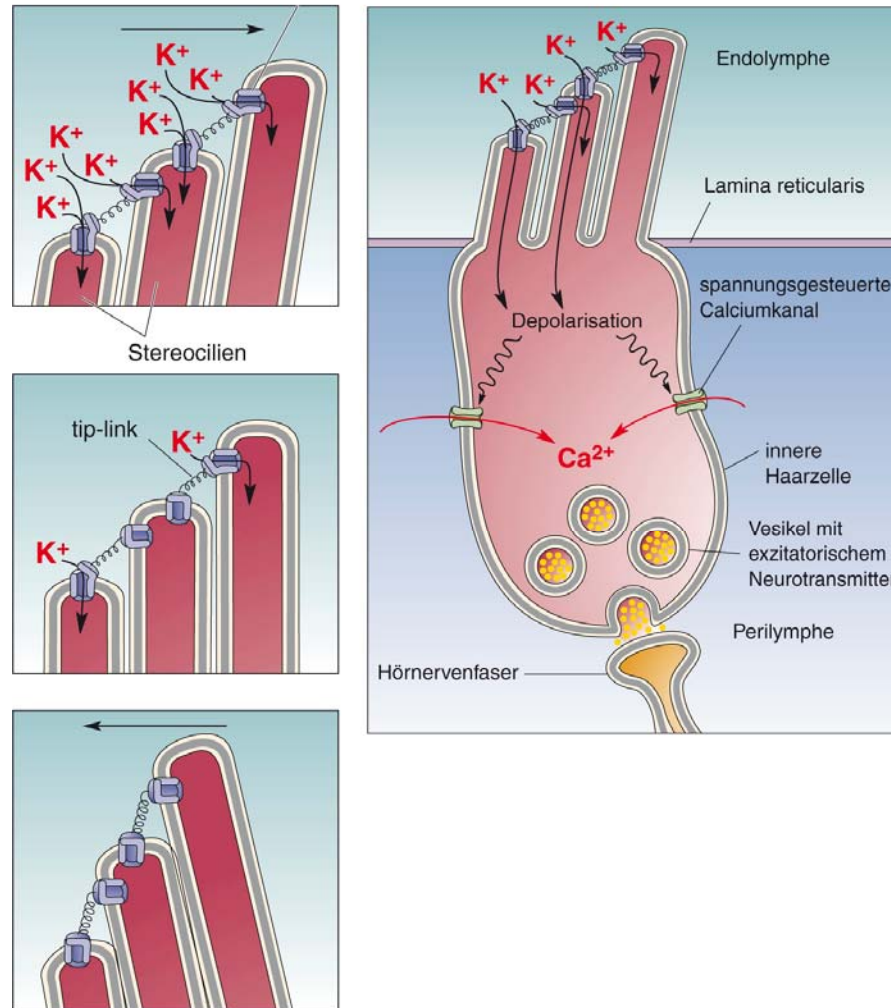
Amplitude des Rezeptorpotentials steigt mit zunehmendem Schalldruckpegel (SPL).

Signalentstehung

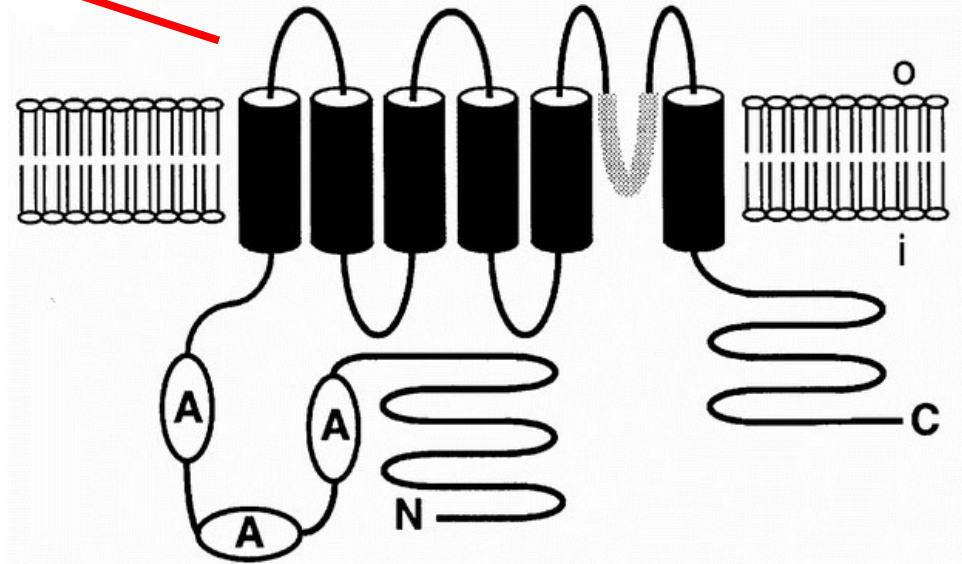
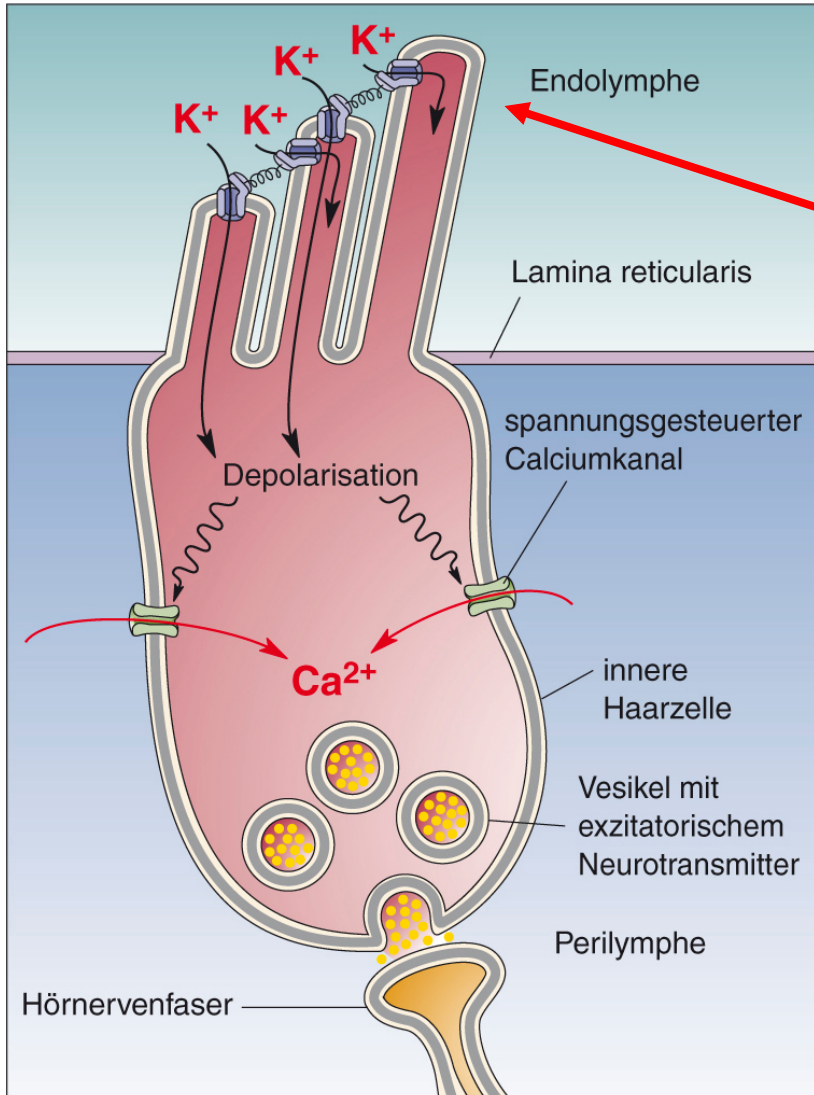
ungewöhnliche K^+ - Verteilung



Signalentstehung

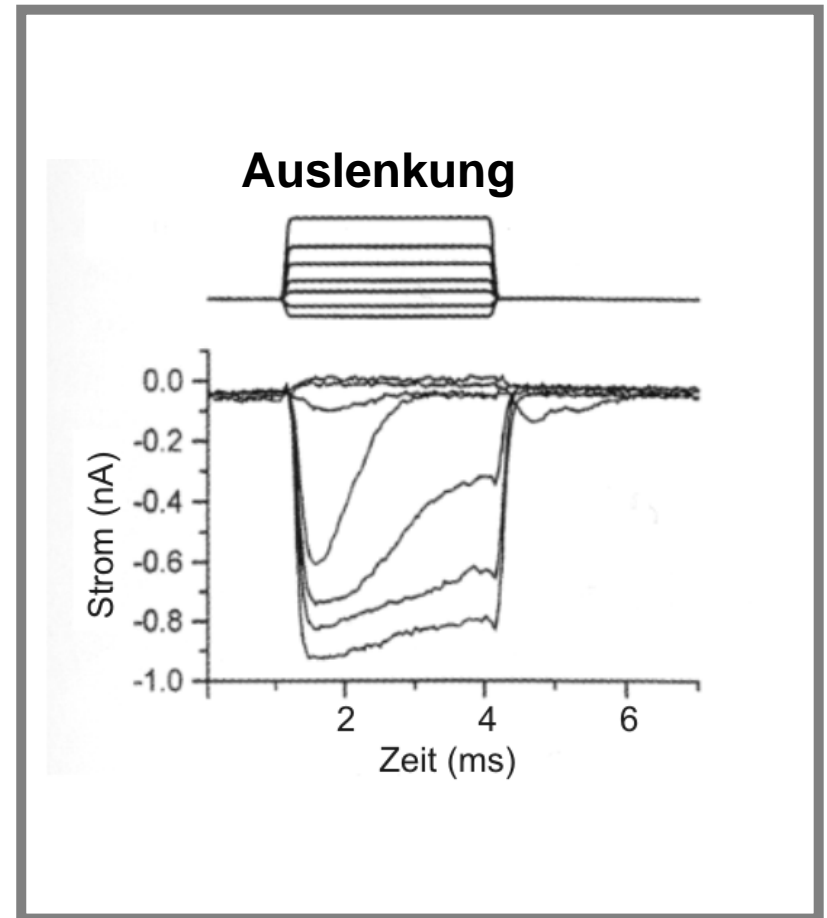
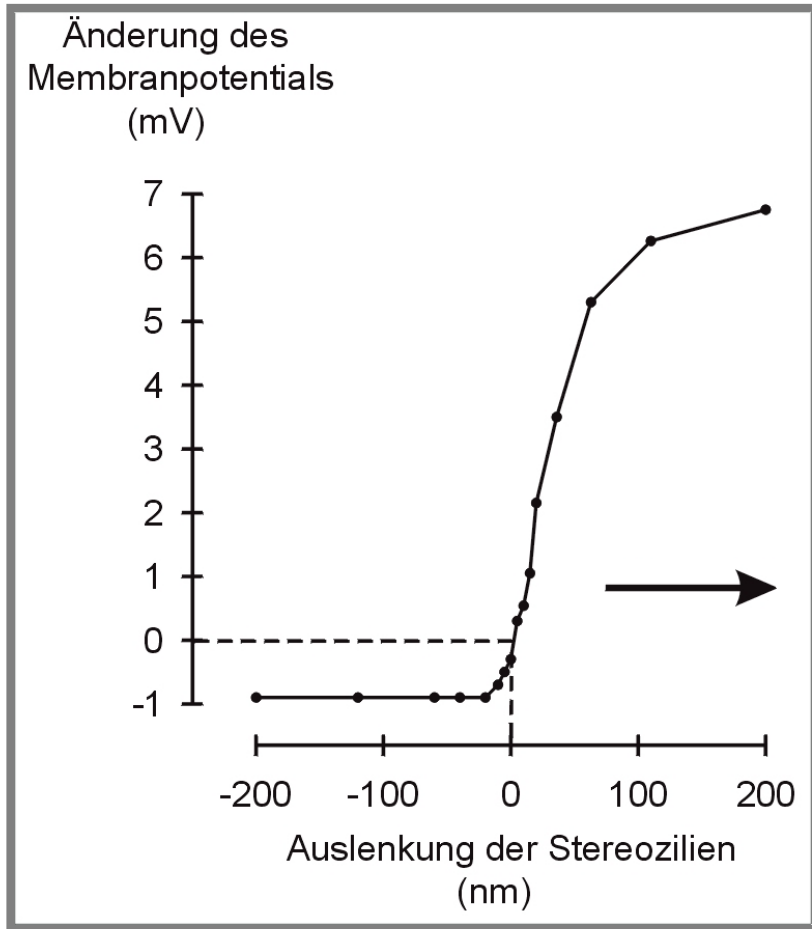


Signalentstehung

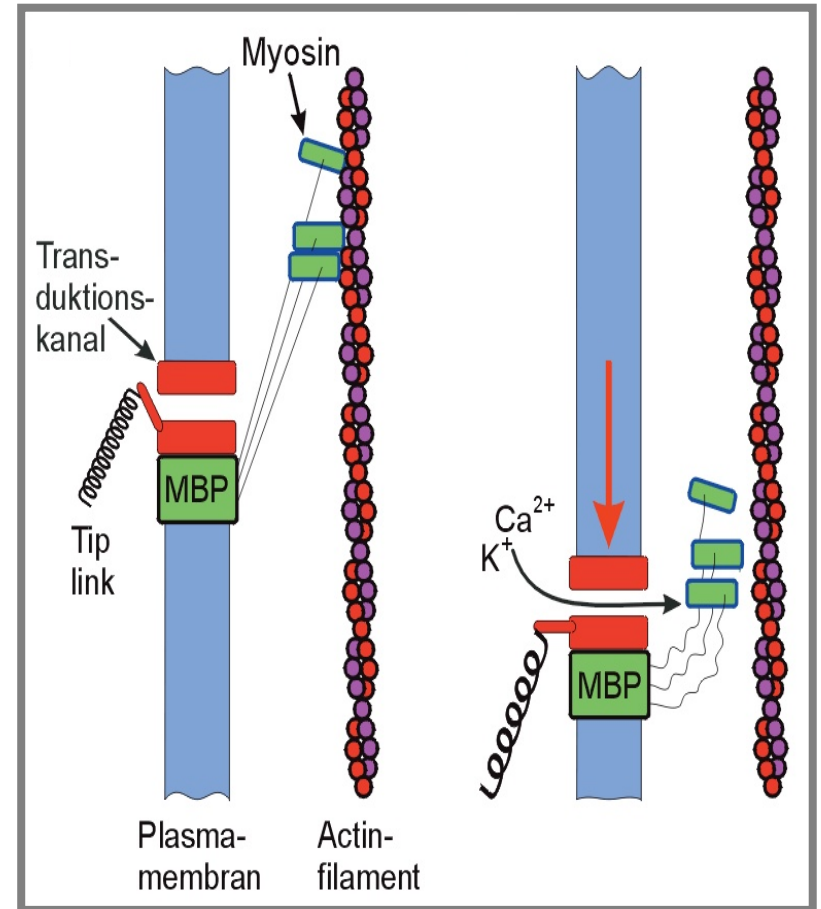
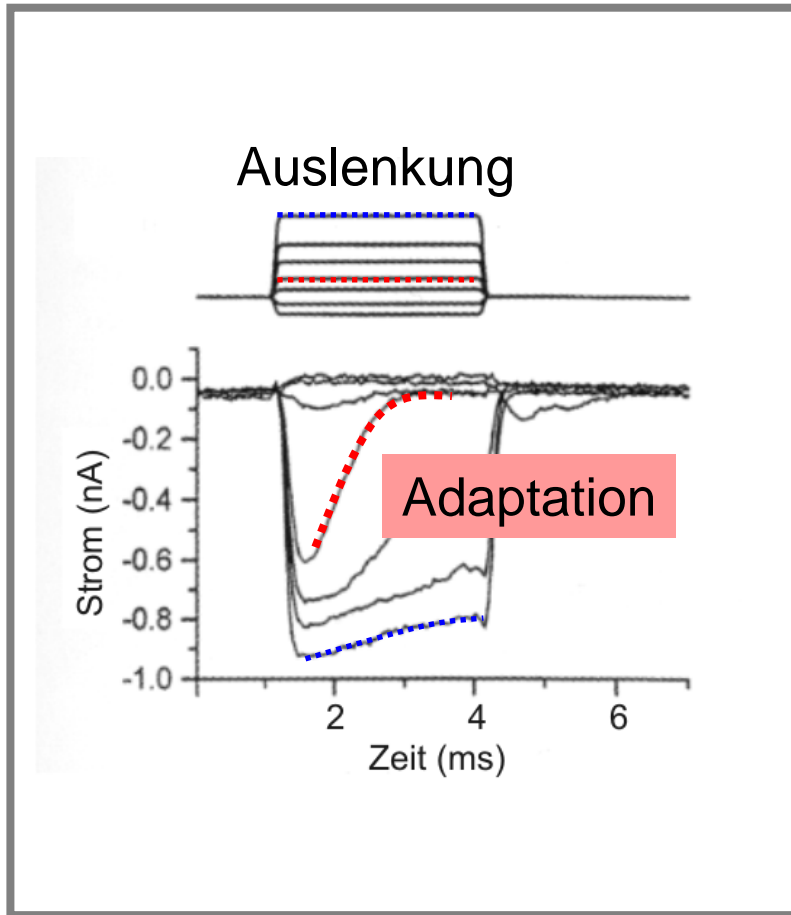


TRP(A1)-Kanal

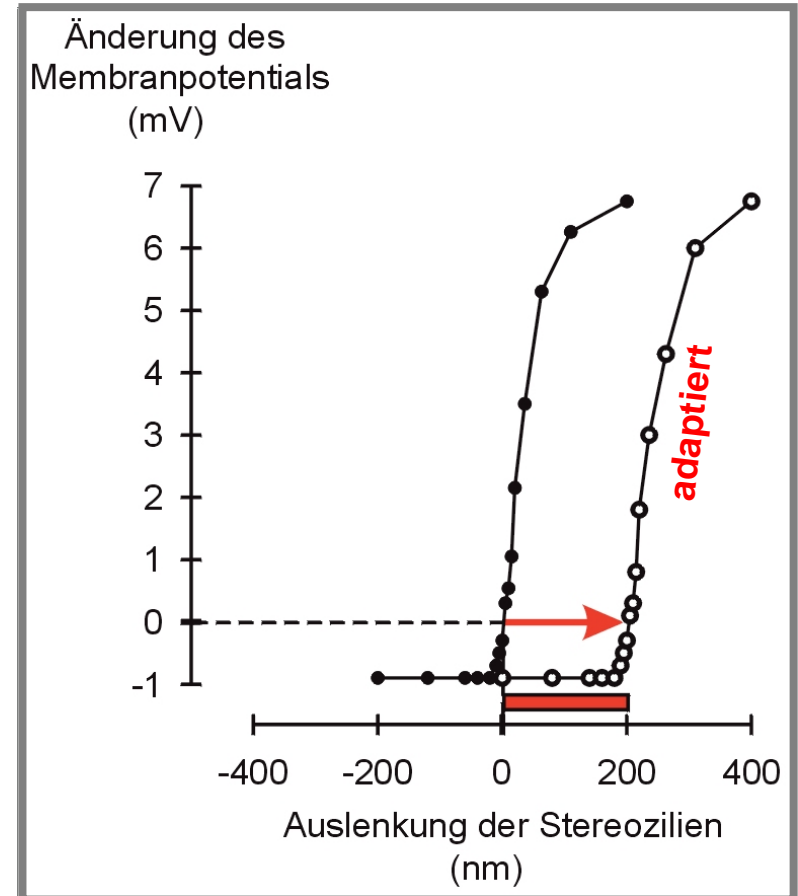
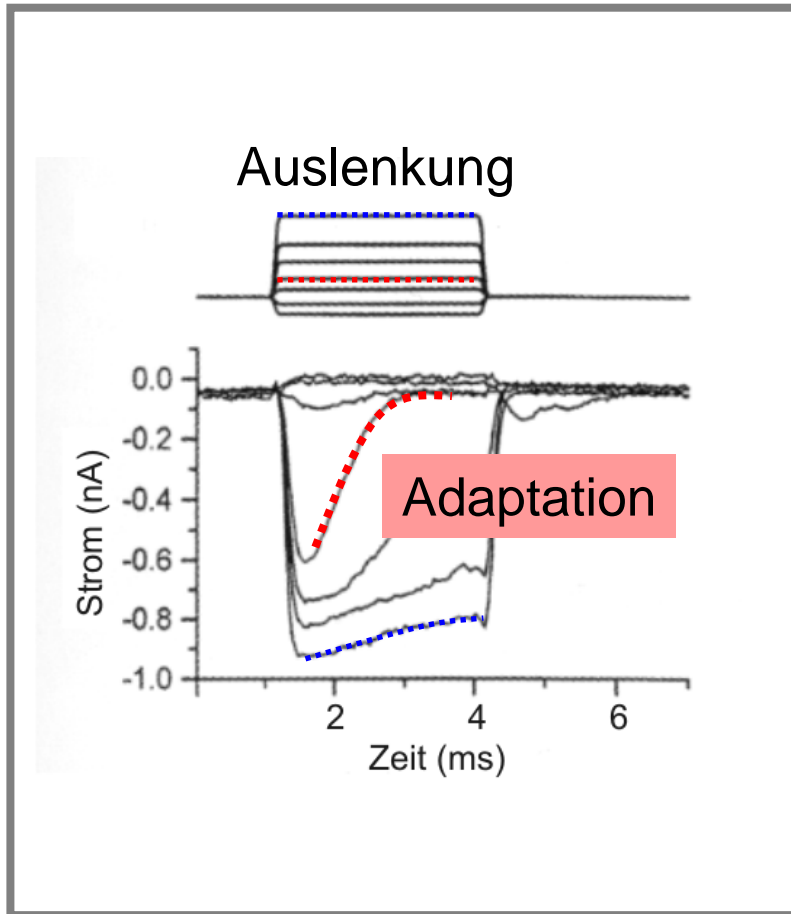
Signalentstehung



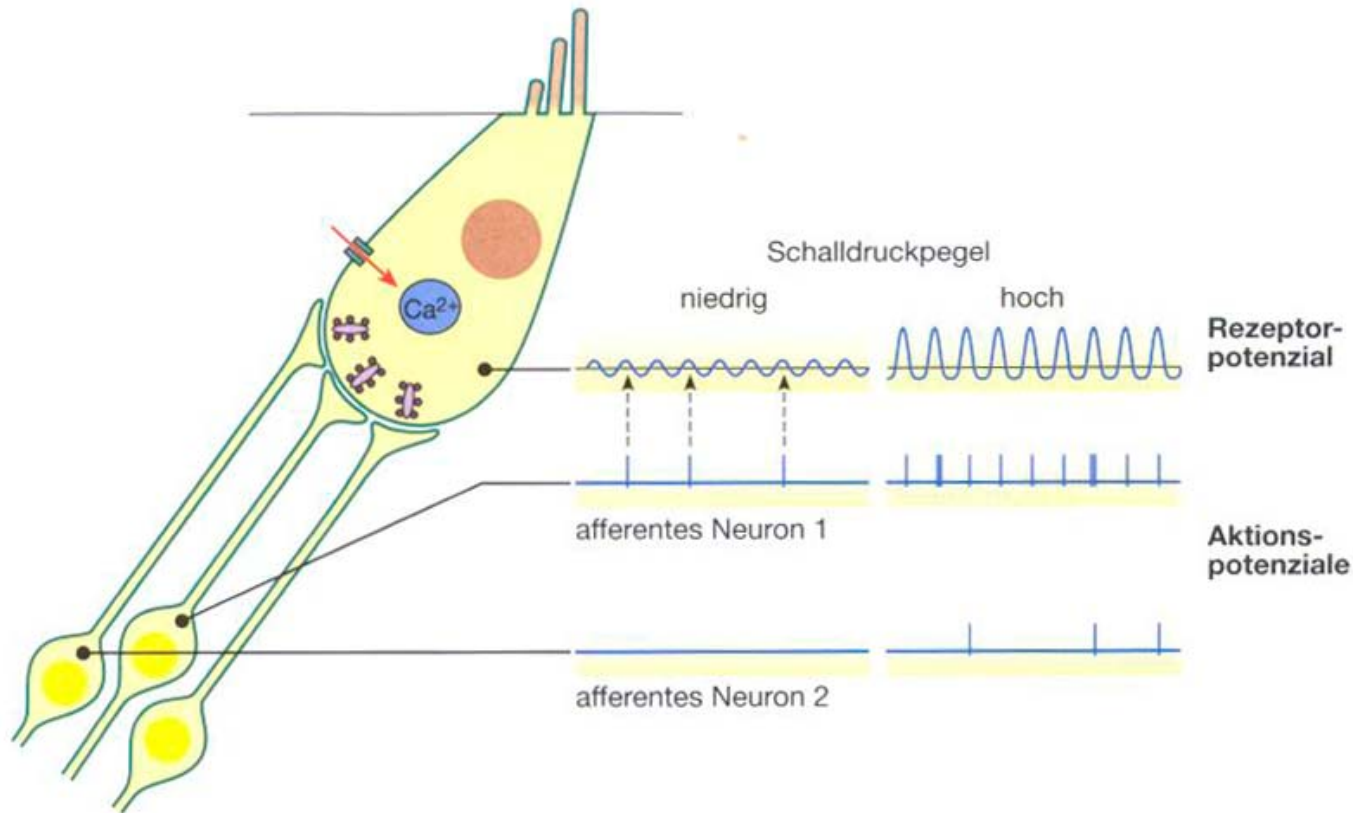
Signalentstehung



Signalentstehung

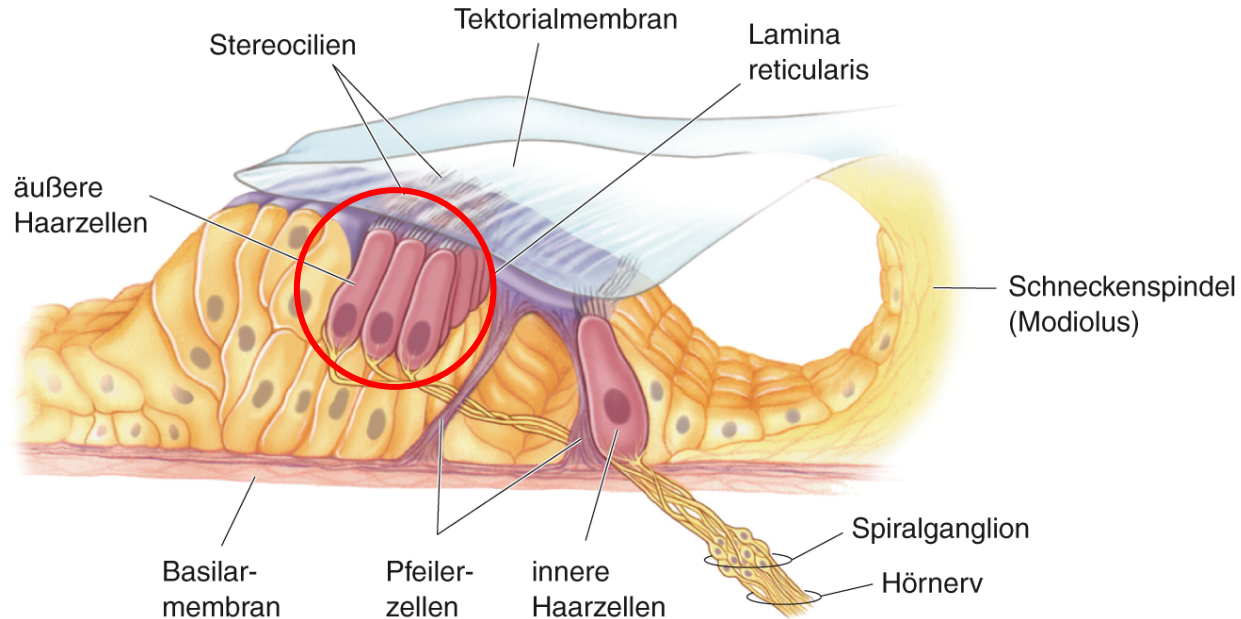


Signalübertragung



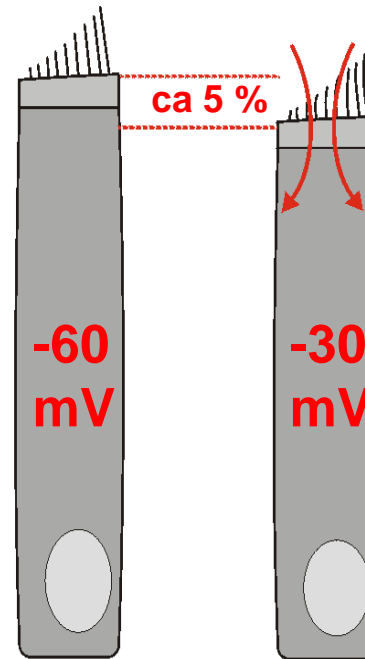
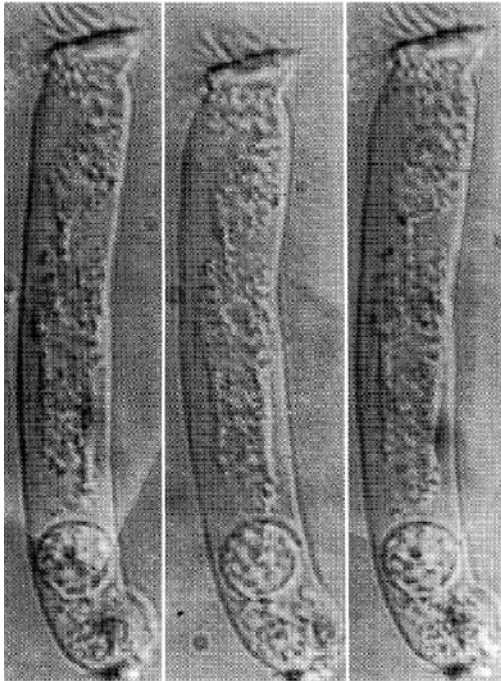
Erregung afferenter Neurone durch **innere** Haarzellen:
⇒ phasengekoppelte Aktionspotenziale (bis 4kHz)

Signalentstehung



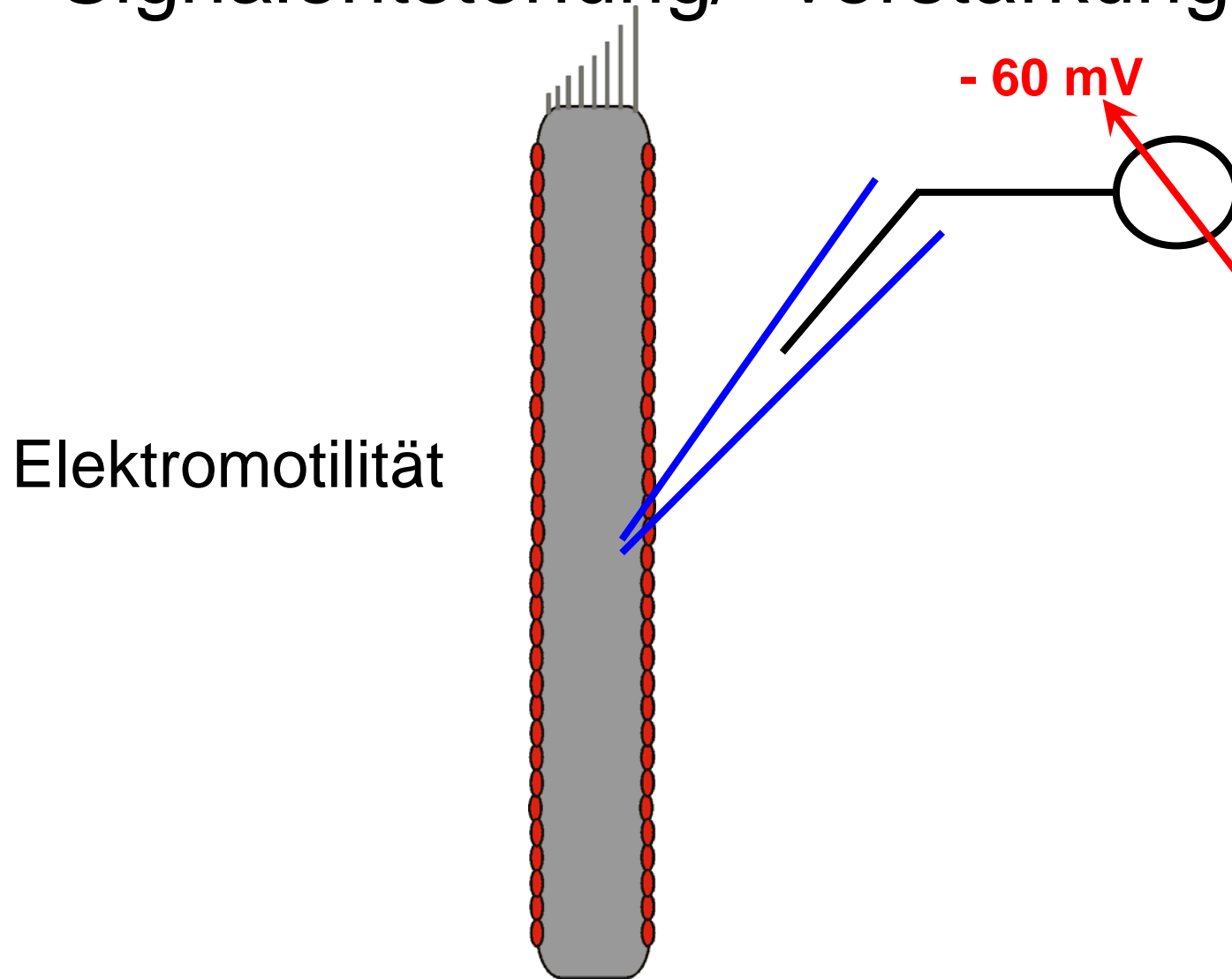
Äußere Haarzellen:
ein außergewöhnlicher Verstärkungsmechanismus

Signalentstehung/ -verstärkung



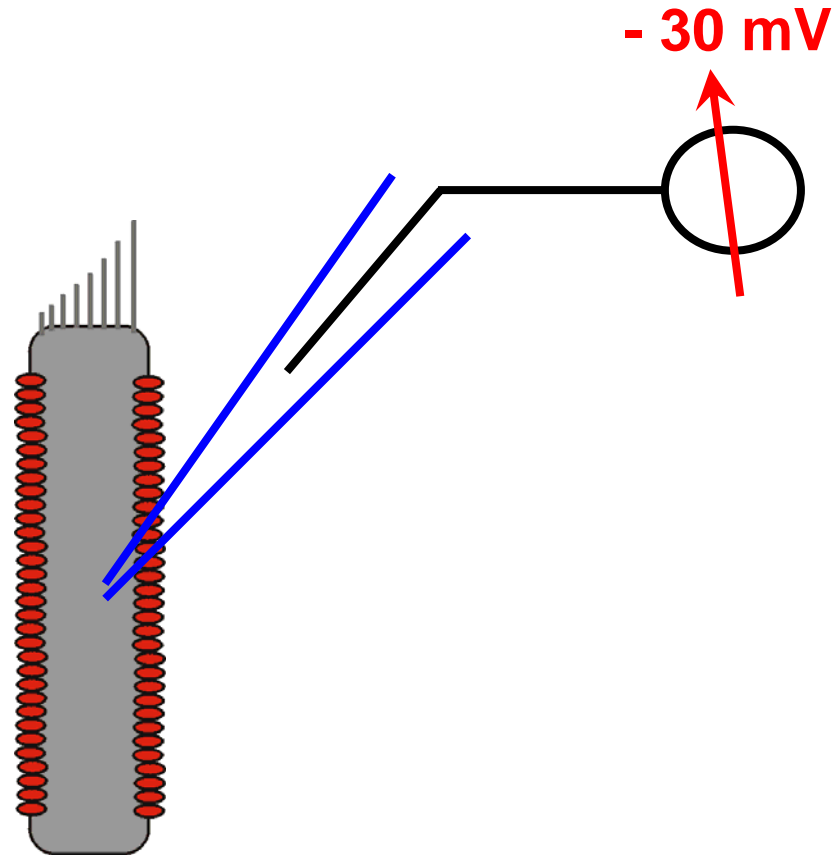
Die **äußeren** Haarzellen können ihre Länge verändern

Signalentstehung/ -verstärkung

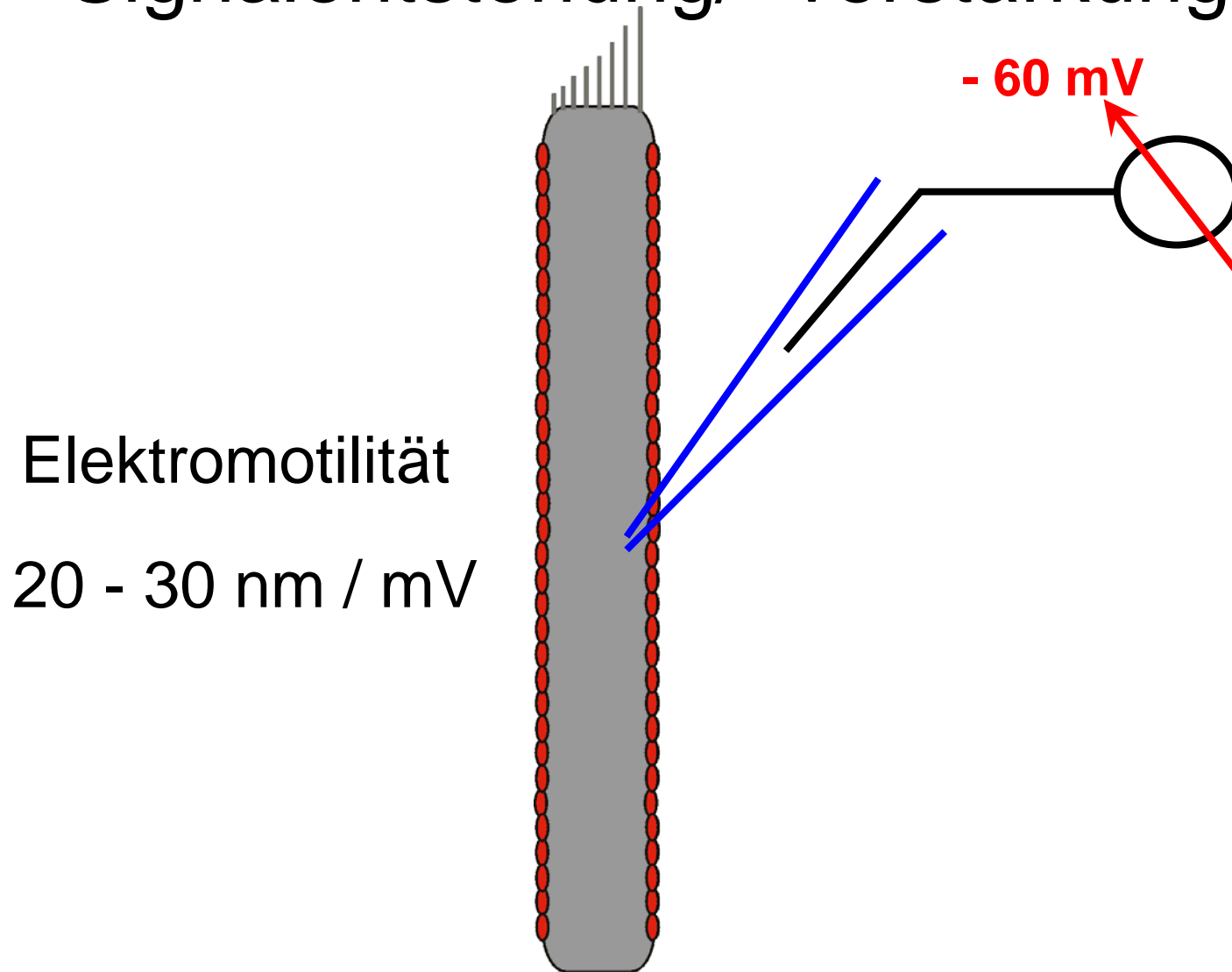


Signalentstehung/ -verstärkung

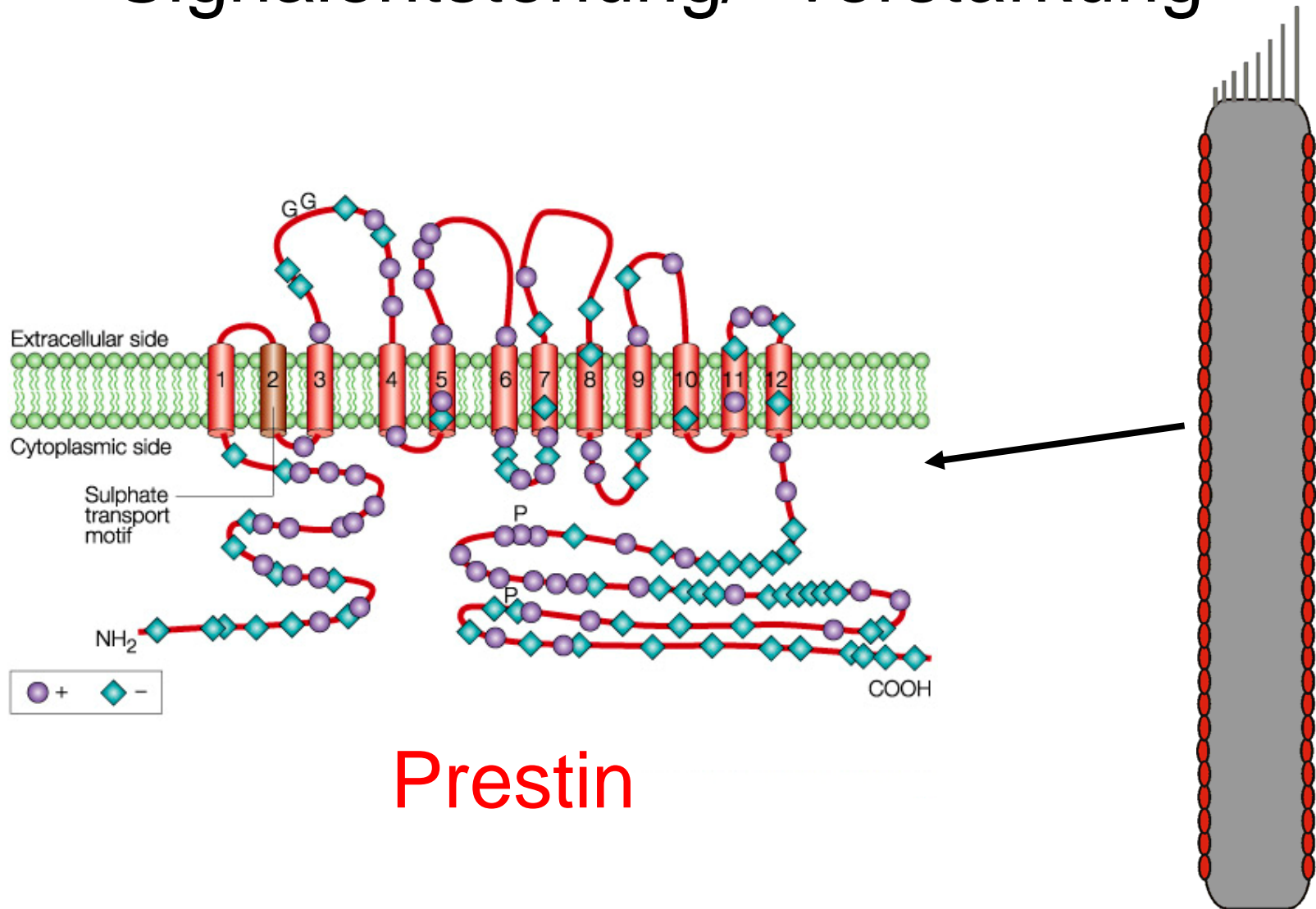
Elektromotilität



Signalentstehung/ -verstärkung

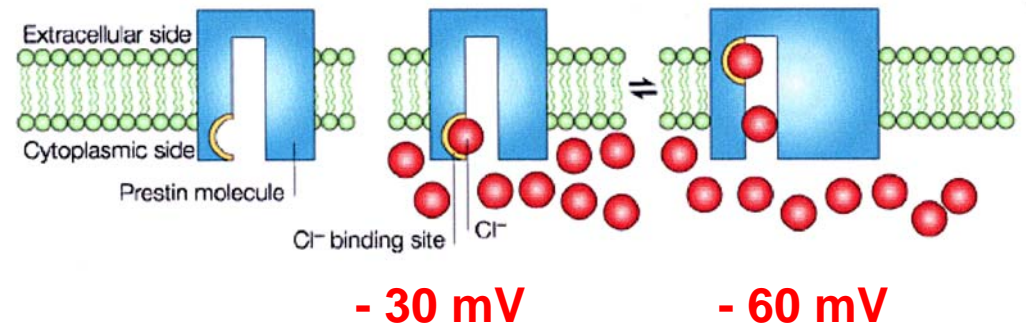
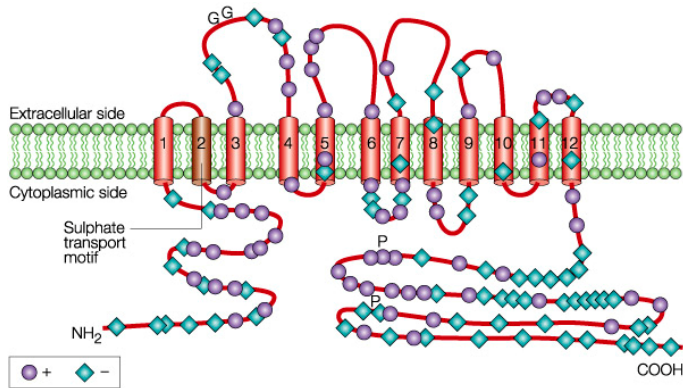


Signalentstehung/ -verstärkung



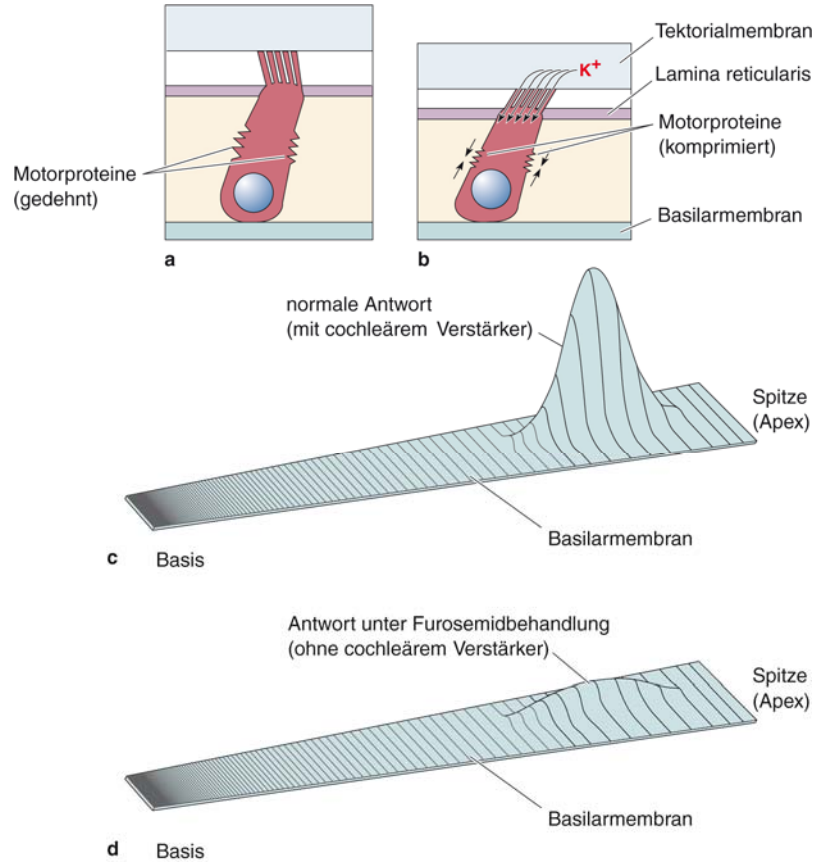
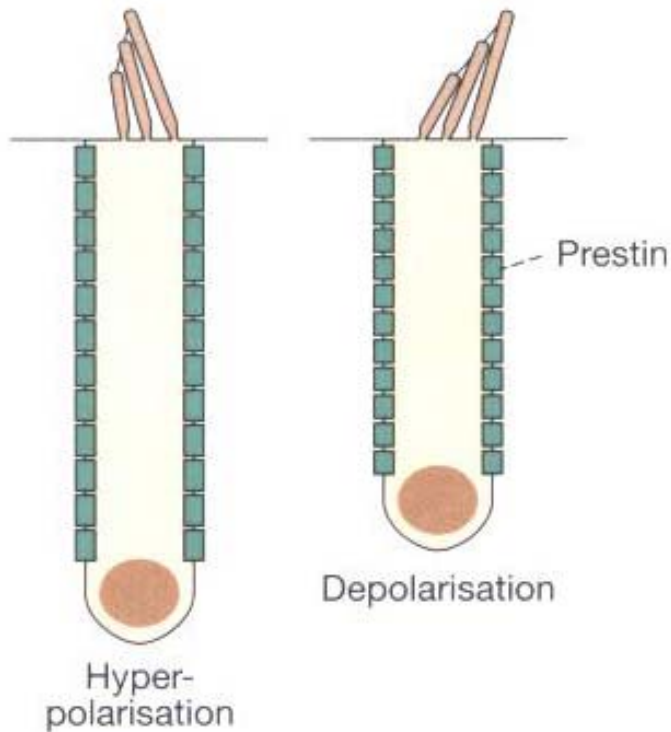
Prestin

Signalentstehung/ -verstärkung



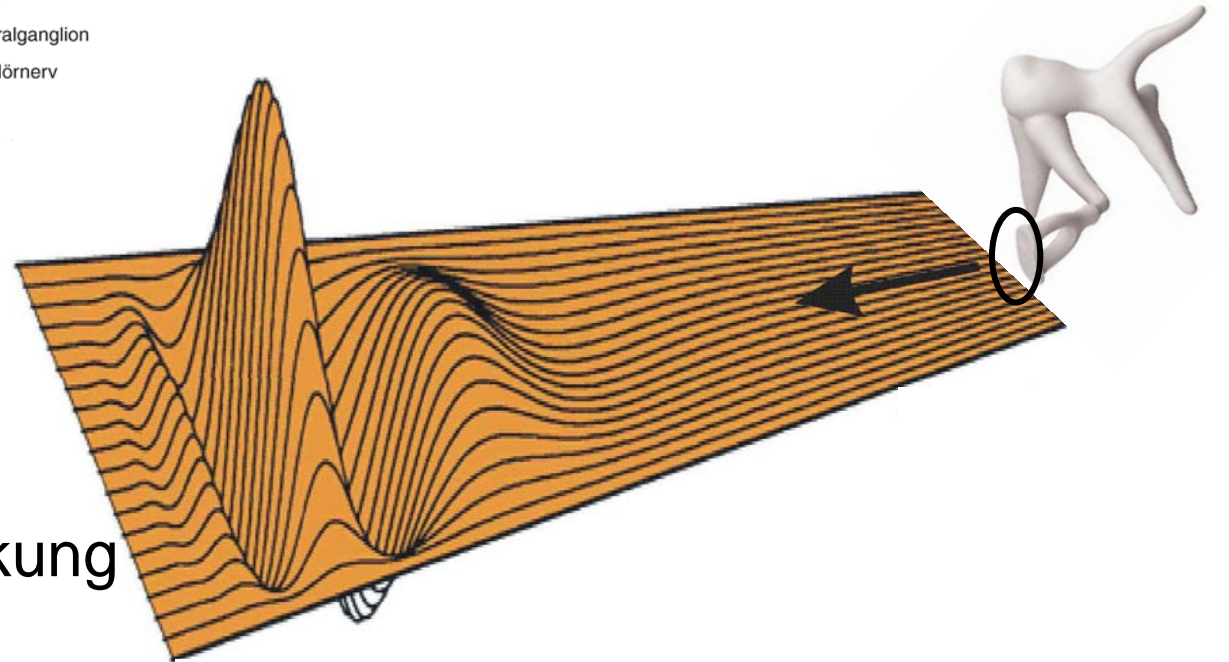
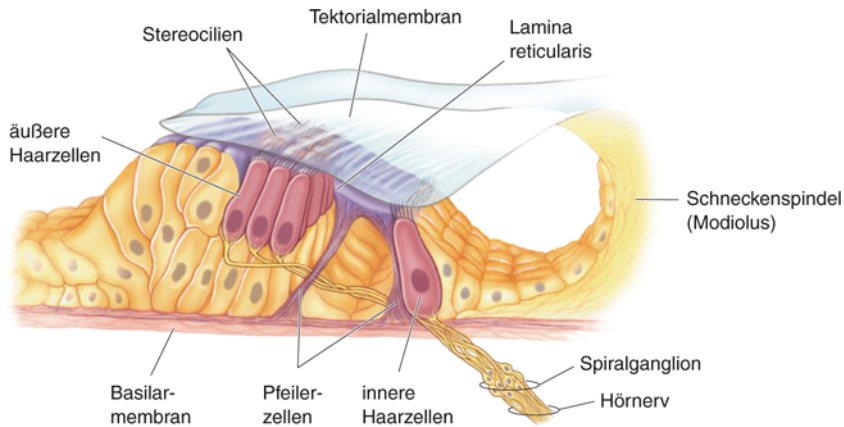
Prestin – schnelle, spannungsabhängige Änderung der Zelllänge

Signalentstehung/ -verstärkung



Aus: Bear et al., *Neurowissenschaften*, 3. Aufl.
© Spektrum Akademischer Verlag GmbH 2009

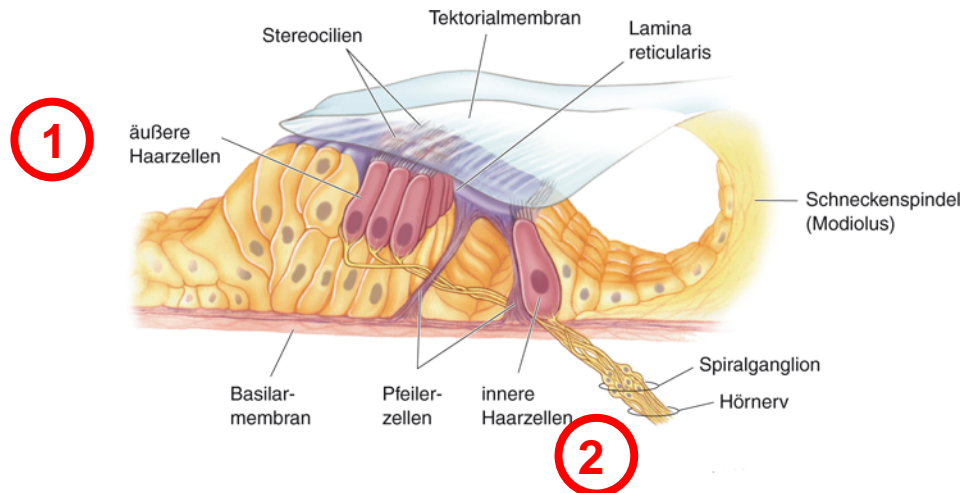
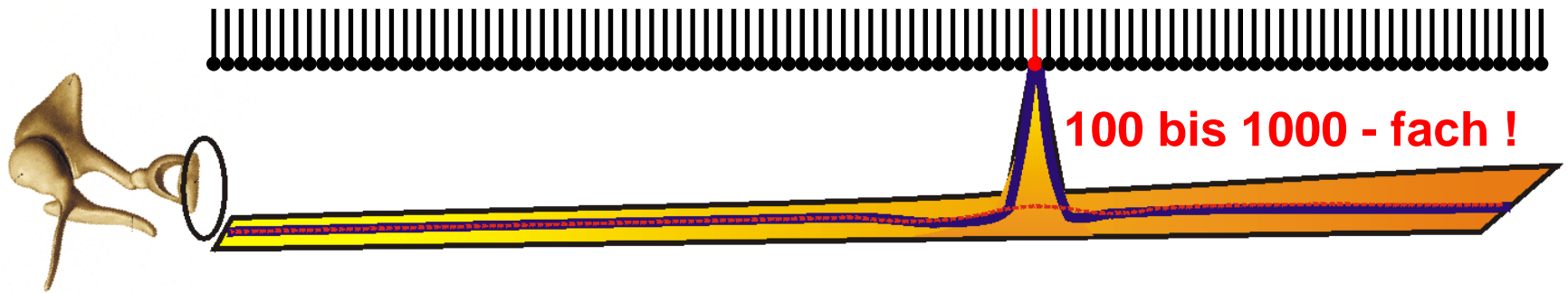
Signalverstärkung



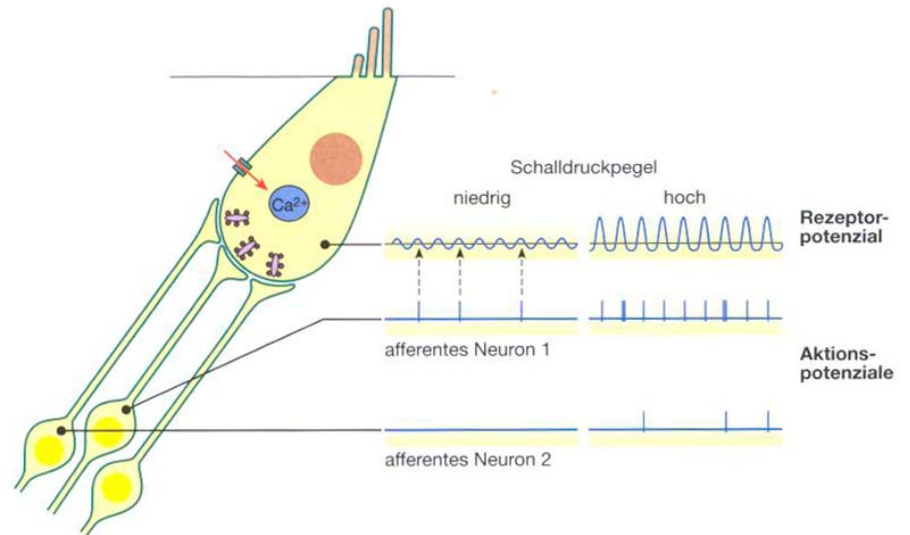
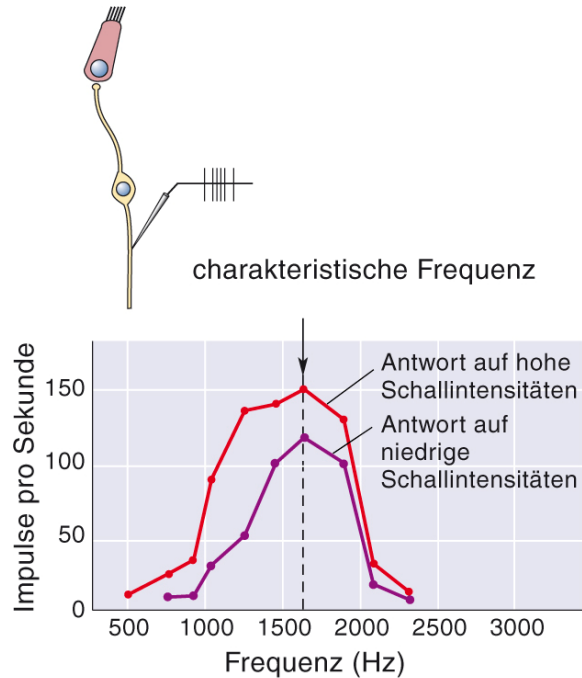
Punktgenaue Verstärkung
an **einer** Stelle

Signalverstärkung

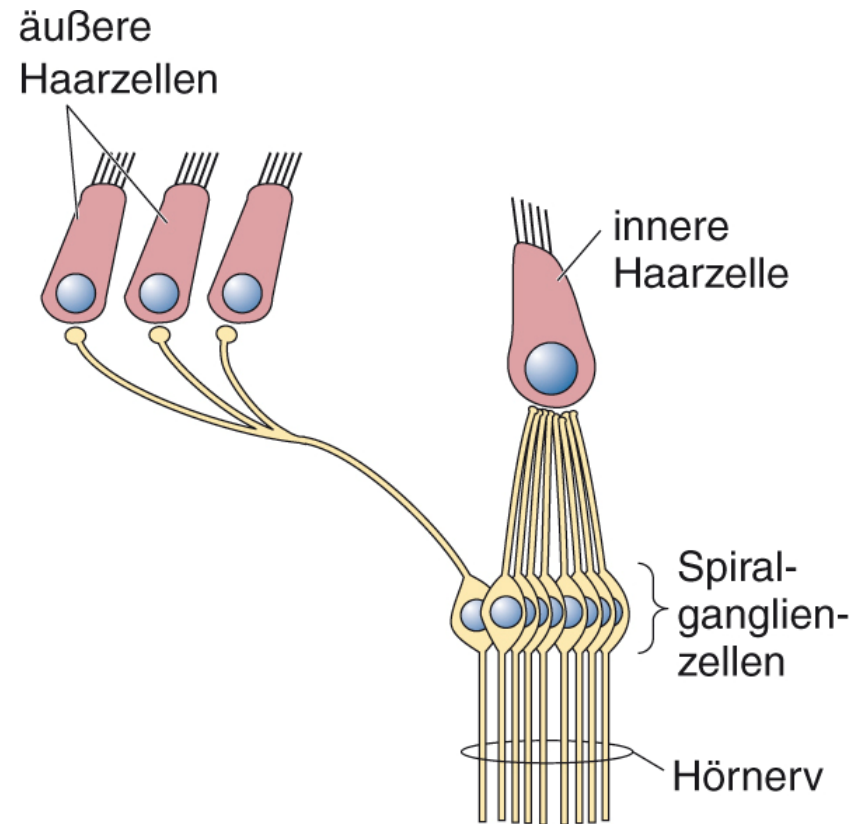
1. Verstärkung der Resonanz an nur einem Punkt, dem Maximum
2. Vibrationsmessung an 3000 – 4000 Punkten entlang der Basilarmembran



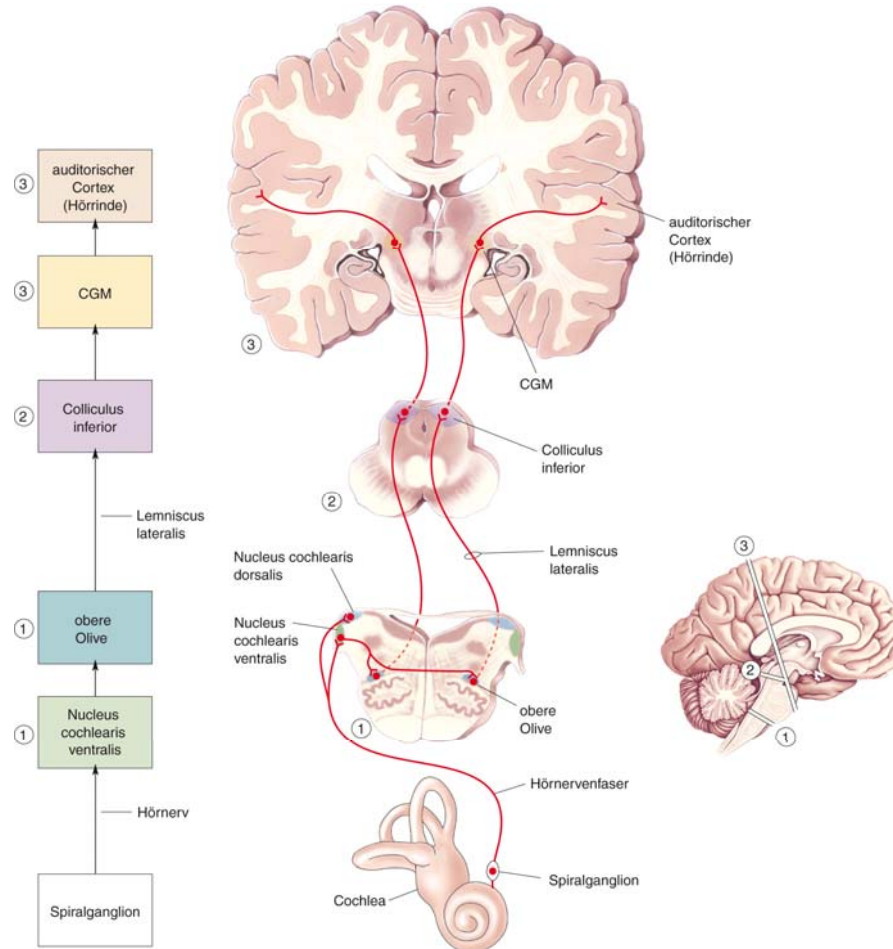
Signalübertragung



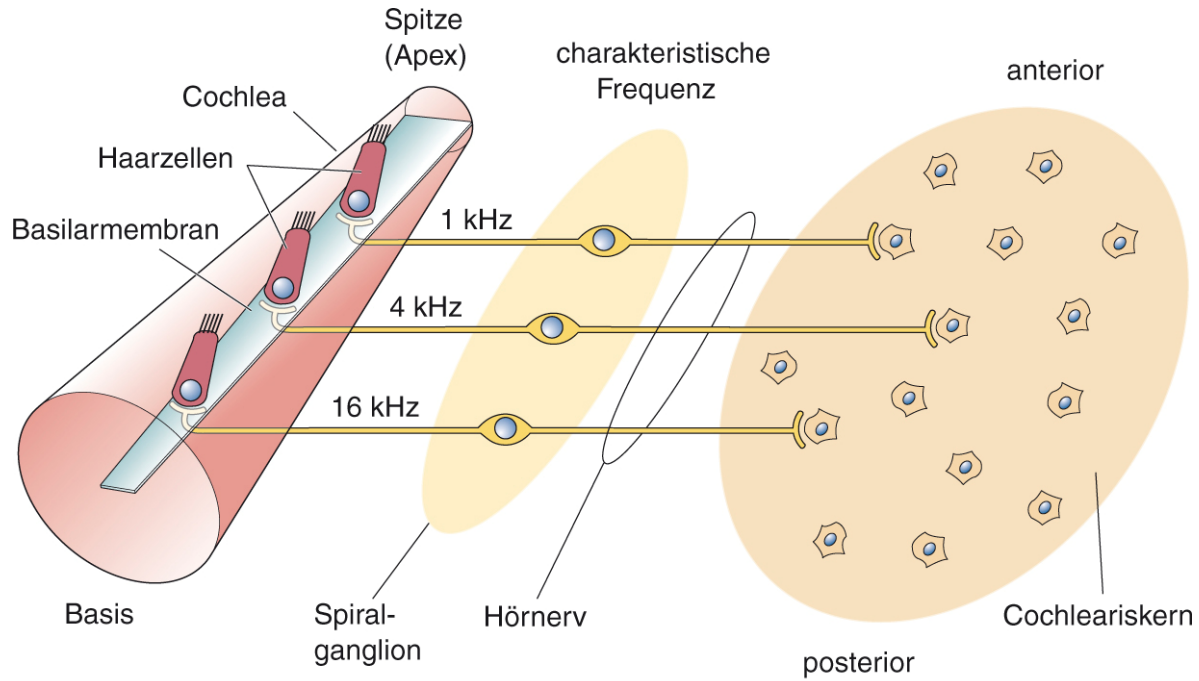
Signalweiterleitung



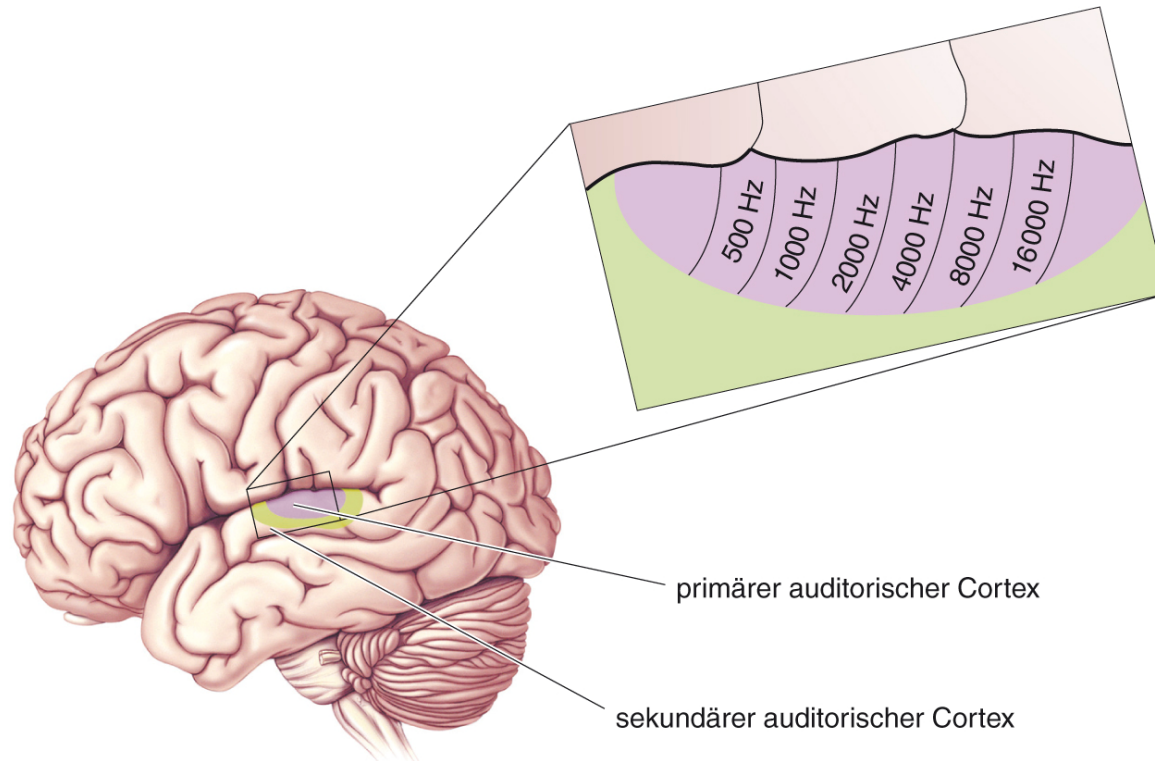
Signalweiterleitung



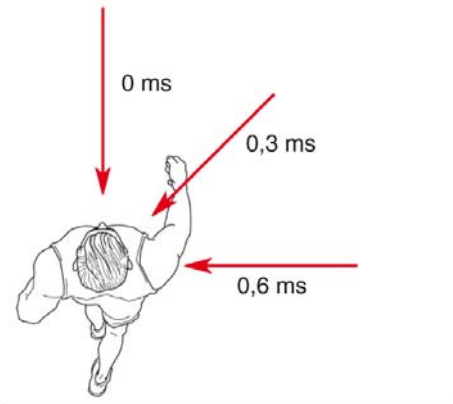
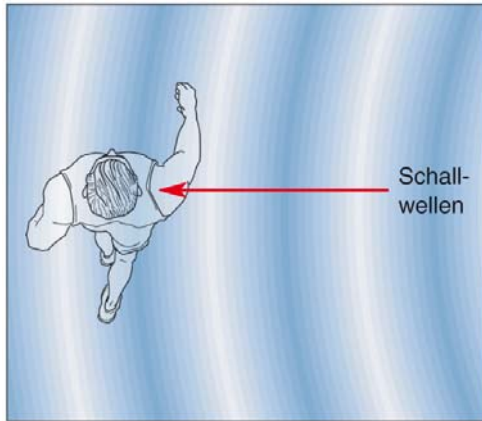
Signalverarbeitung



Signalverarbeitung



Richtungshören

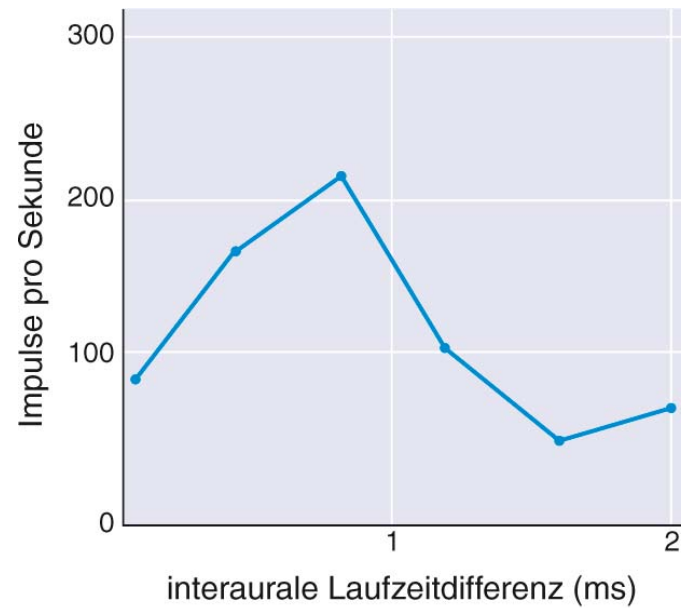
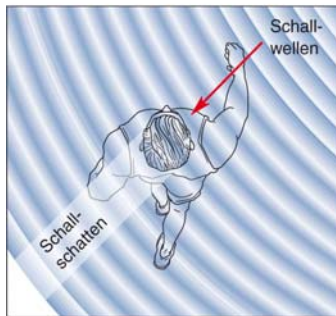
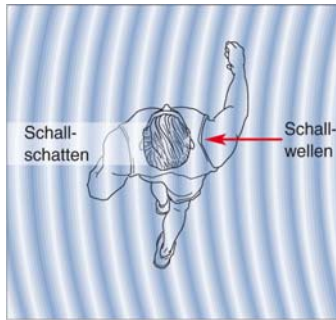


Laufzeitdifferenz der Schallwahrnehmung

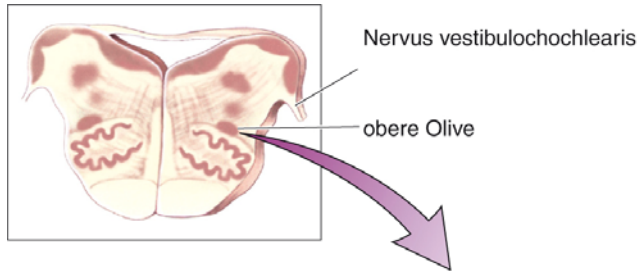
Schall von „rechts“ Wahrnehmung links

0,6 ms zeitverzögert

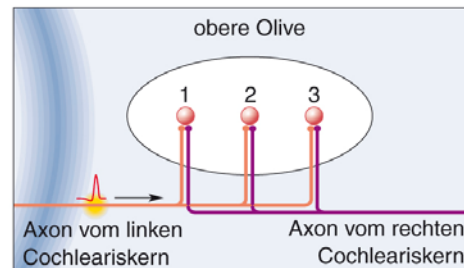
Richtungshören



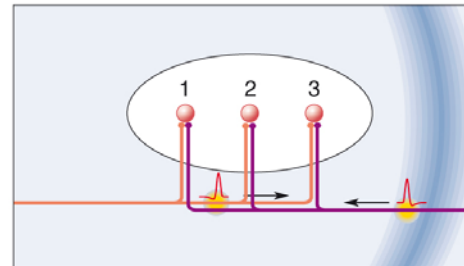
Richtungshören



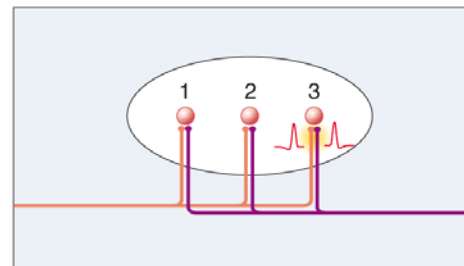
Schall von links löst Aktivität im linken Cochleariskern aus. Die Aktivität wird an die obere Olive weitergeleitet.



Sehr bald erreicht der Schall das rechte Ohr und löst Aktivität im rechten Cochleariskern aus. Unterdessen ist der erste Impuls längs des Axons weitergewandert.

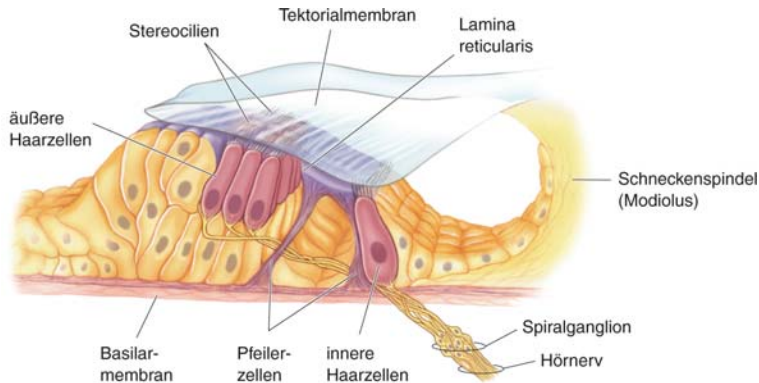


Beide Impulse erreichen das Olivenneuron 3 zur selben Zeit. Die Summierung der synaptischen Potenziale löst ein Aktionspotenzial aus.



Koinzidenzdetektion

Zusammenfassung



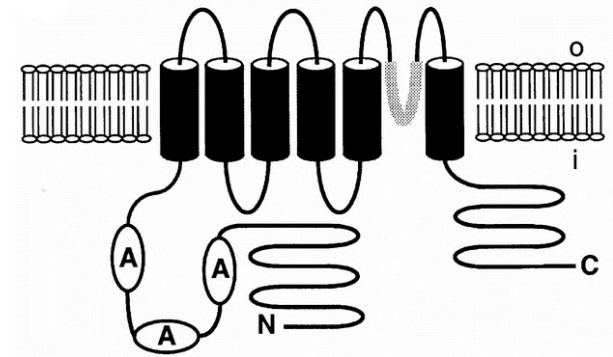
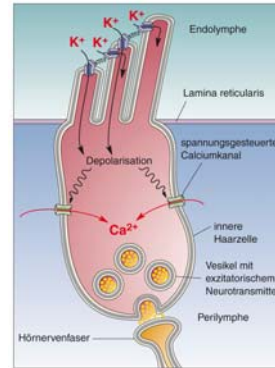
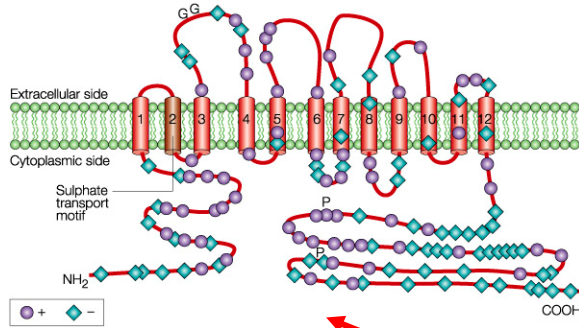
Das Corti-Organ in der Cochlea des Innenohrs analysiert Schall.

Strömung von Endolymphe zwischen Tektorial- und Basilarmembran aktiviert die inneren Haarzellen.

Ein Ton einer bestimmten Frequenz erzeugt Resonanz an einer bestimmten Stelle der Basilarmembran.

Resonanz wird durch die äußeren Haarzellen 1000-fach verstärkt.

Zusammenfassung



“Verstärkung” durch **Prestin**: spannungsabhängige Längenänderung der äußeren Haarzellen

Gehirn erhält die Frequenzinformation über die Position einer aktivierten **inneren** Haarzelle auf der Basilarmembran: **Tonotopie**.

Der Rezeptorstrom der Haarzellen = K⁺-Strom. Er fließt durch die Transduktionskanäle aus der Endolymphe der Scala media in die Stereozilien.

