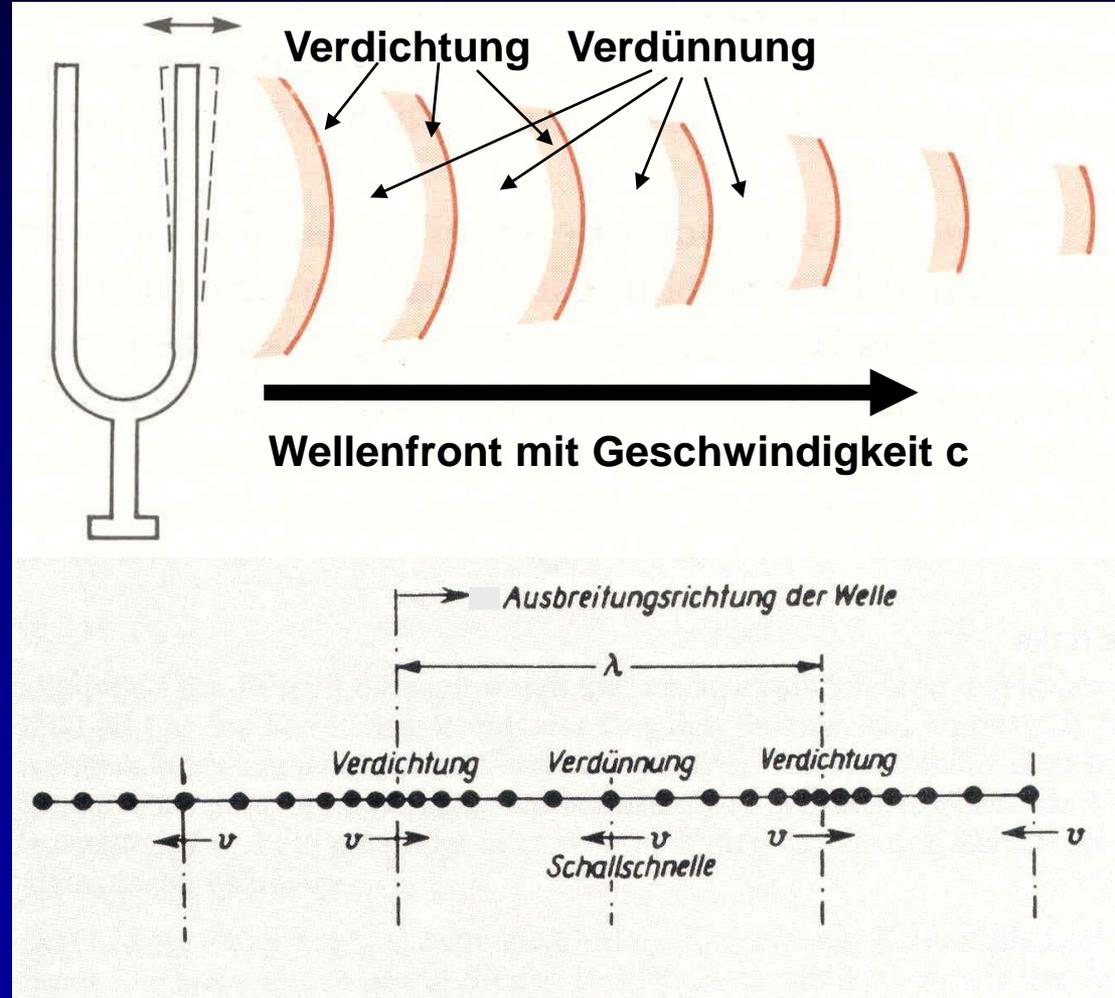


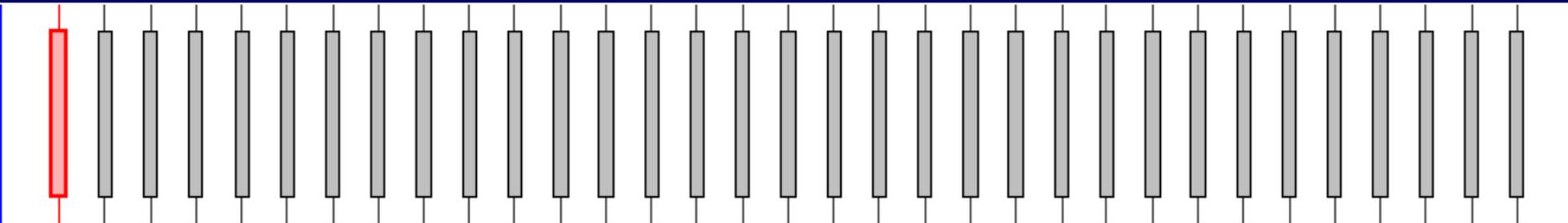
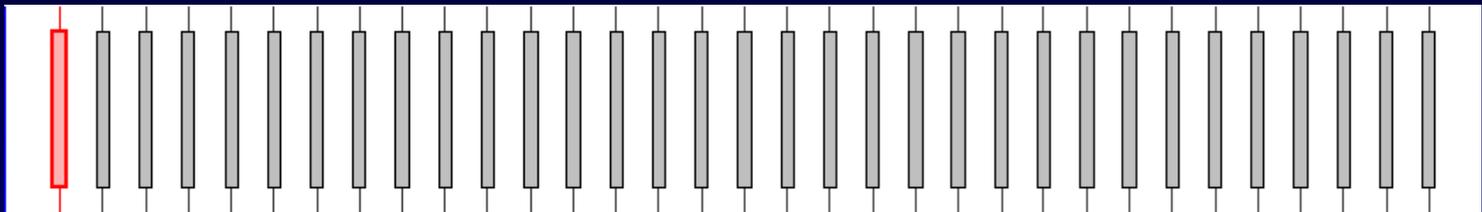
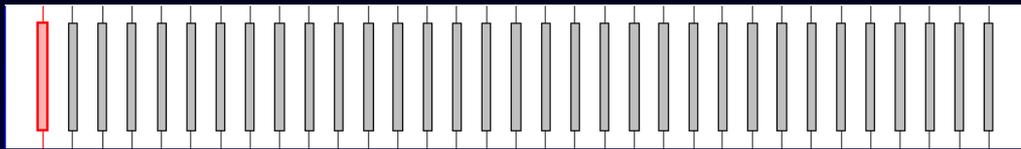
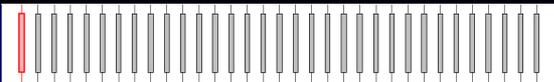
Anatomie und Funktion des Ohres

Dr. med. Dr. rer. nat. R. Rödel

Schall: Druckschwankungen in einem Medium, die sich räumlich und zeitlich ausbreiten.

In der Luft werden einzelne Luftmoleküle ausgelenkt. Die Luftmoleküle schwingen um eine gleich bleibende Ruhelage mit der Schallschnelle v . Durch Stöße mit Nachbarmolekülen wird die Auslenkung weitergegeben. Es breitet sich eine Wellenfront mit der Geschwindigkeit c aus. Es entstehen Bereiche der Verdichtung und Verdünnung. Die Wellenlänge λ bezeichnet den räumlichen Abstand zweier Verdünnungs- oder Verdichtungszone.





Druck = Kraft / Fläche, z. B. N/m^2

Schalldruck:

in einer Schallwelle auftretende periodische Druckschwankungen (Über- und Unterdruck)

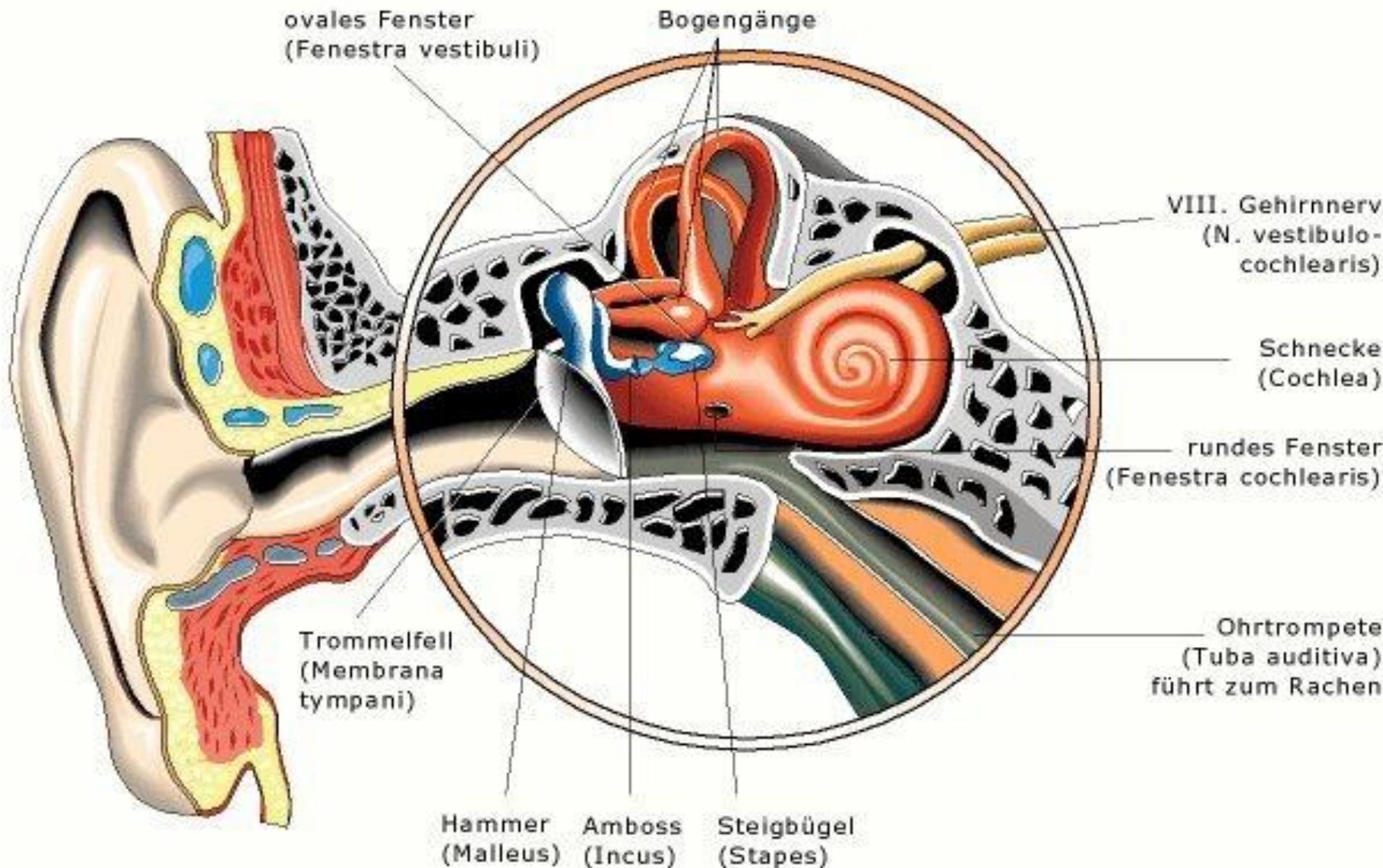
SI-Einheit: Pascal (Pa) = N/m^2

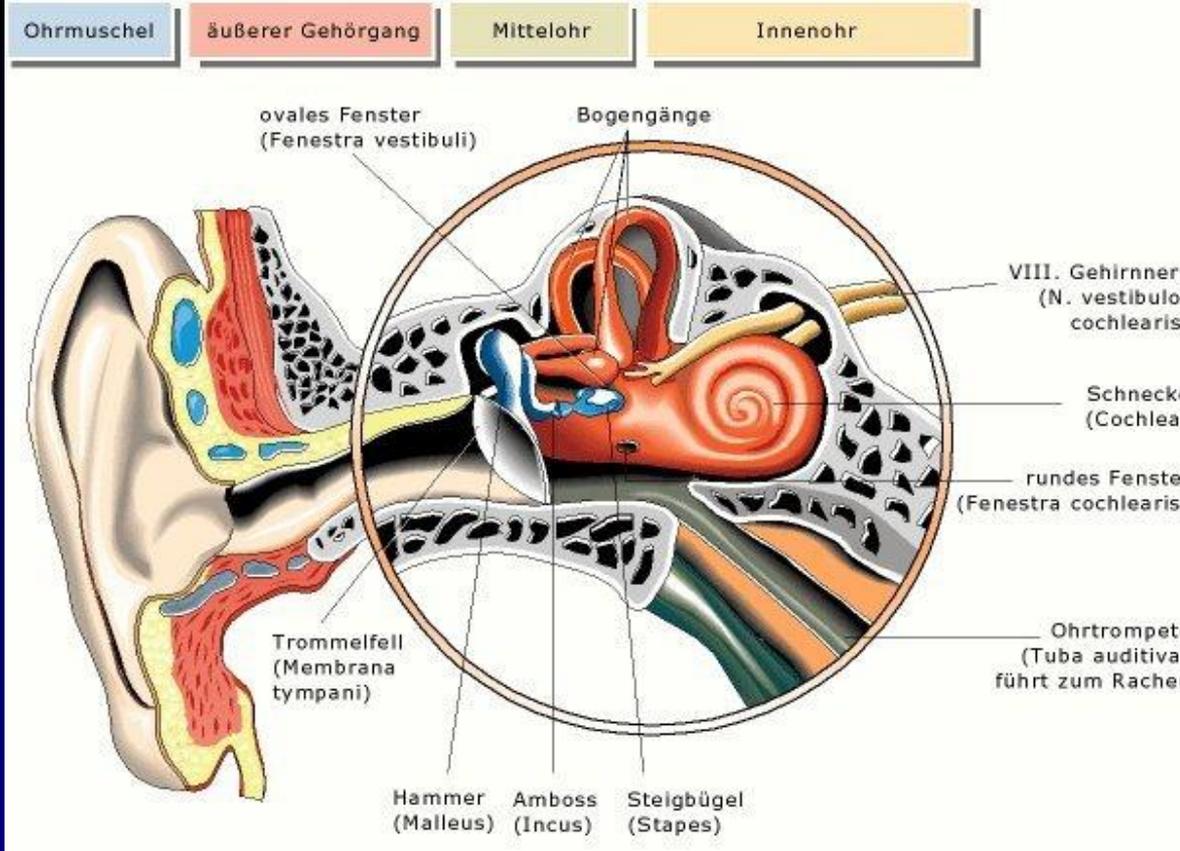
Ohrmuschel

äußerer Gehörgang

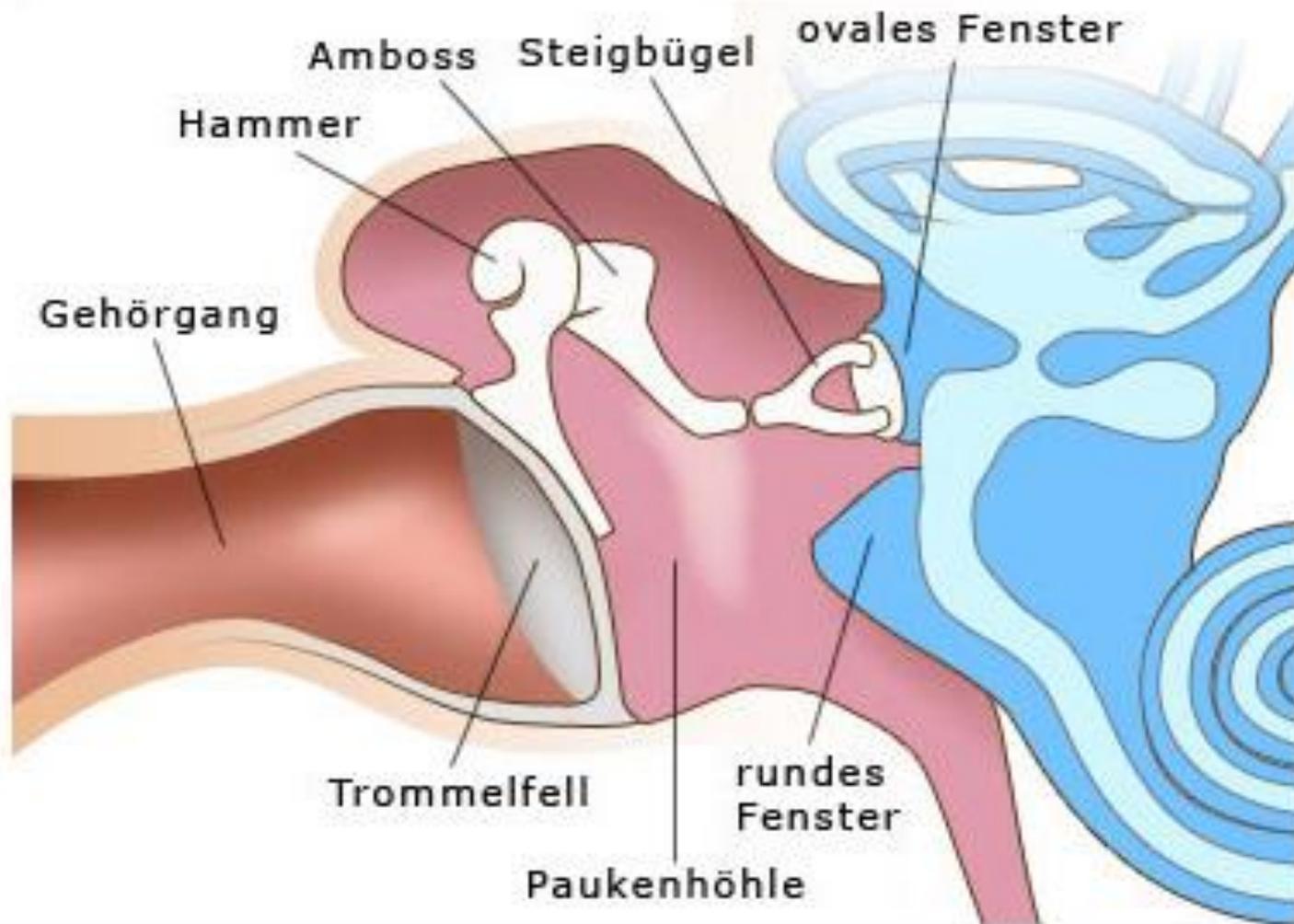
Mittelohr

Innenohr





- äußeres Ohr
 - Mittelohr
 - Innenohr
 - Hörnerv
 - zentrale Hörbahn
- Schalleitung
- Impedanzanpassung und Schalleitung
- Schalltransduktion
- Erregungsfortleitung, -rückleitung
- Informationsverarbeitung, Wahrnehmung



- Mittelohr Impedanzanpassung und Schalleitung
Medium Luft \Rightarrow Medium Flüssigkeit
- Innenohr Schalltransduktion
mechanische Erregung \Rightarrow elektrische Erregung

Äusseres Ohr/Ohrmuschel und Gehörgang

Funktion:

- Trichterfunktion („Hörrohr“)
- Resonanzverstärkung, Richtungshören

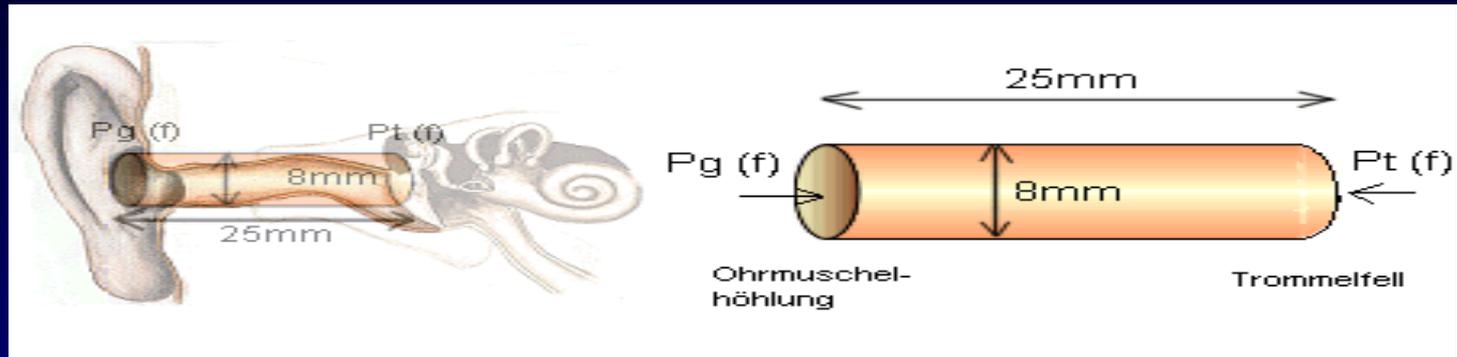
Mittelohr

Trommelfell, Oberflächenvergrößerung durch schräge Einspannung in den äußeren Gehörgang.

Paukenhöhle

Gehörknöchelchenkette: Hammer, Amboss, Steigbügel

Die Verarbeitung des Schalls durch das äußere Ohr weist eine starke Frequenzabhängigkeit auf.



Eigenfrequenz: Frequenz, mit der ein System schwingt, wenn es durch eine einmalige Anregung aus seinem Ruhezustand heraus in Schwingungen versetzt wird und dann sich selbst überlassen bleibt.

Resonanz: Wird ein System mit Eigenfrequenz durch Schwingungen angeregt, deren Frequenz gleich oder nahezu gleich der Eigenfrequenz ist, kommt es zur Schwingungsaufschaukelung.

Eigenfrequenz des äußeren Gehörgang: 2000 - 5000 Hz

Die frequenzabhängige Hörschwelle ist durch die Eigenfrequenz des äußeren Gehörgang bestimmt.

Übertragung der Schwingungsenergie des Schalls vom Trommelfell an das Innenohr

Impedanzanpassung:

Übertragung der Schallenergie von Luft auf die Flüssigkeiten des Innenohres

Die Schallwellenimpedanz in Luft ist geringer verglichen mit der der Innenohrflüssigkeiten

Gewinn an Hörvermögen von 10 - 20 dB

- Flächenverhältnis von Trommelfell zu ovalem Fenster
- Hebelwirkung der Gehörknöchelchen

Trommelfell und Steigbügelplatte

Wirksame Fläche des Trommelfells beim Menschen $A_1 = 55 \text{ mm}^2$,
Steigbügelfußplatte $A_2 = 3,2 \text{ mm}^2$.

Druck p = Kraft, die auf Fläche A (senkrecht) wirkt

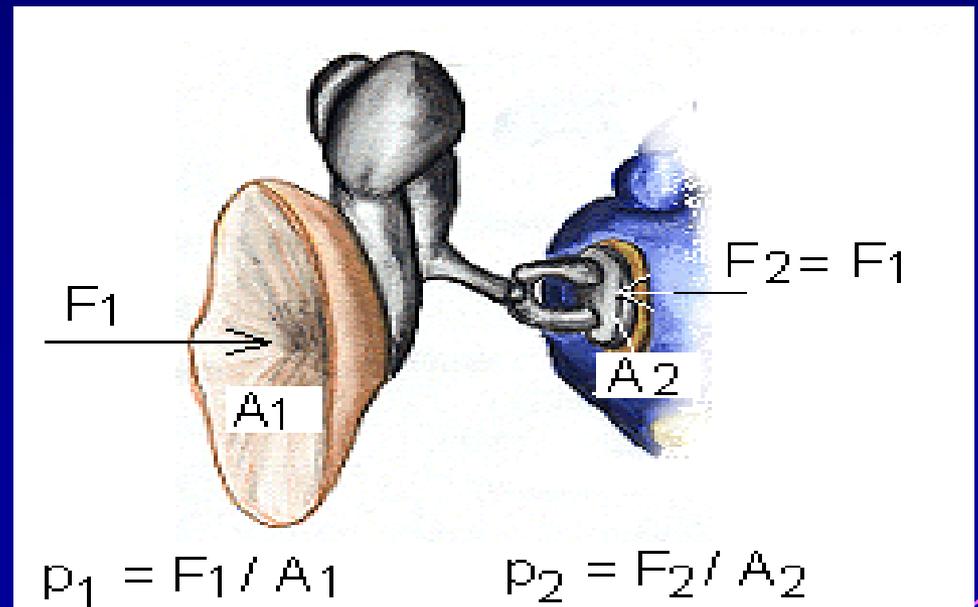
$$p = F / A$$

Auf Trommelfell und Steigbügelplatte wirkt die gleiche Kraft: $F_1 = F_2$

⇒ Der an der Steigbügelplatte ausgeübte Druck wird verstärkt.

Verstärkungsfaktor ergibt sich aus Verhältnis Trommelfellfläche zur Fläche der Steigbügelplatte.

$$v_F = 55 / 3,2 = 17$$



Hebelwirkung der Gehörknöchelchenkette

Auslenkung der Steigbügelfußplatte gegenüber der Auslenkung am Trommelfell um den Faktor 1,3 vermindert durch die Längenverhältnisse der wirksamen Hebelarme.

Hebelgesetz $F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2$

⇒ Kraft auf die Steigbügelfußplatte wird um den gleichen Faktor verstärkt.

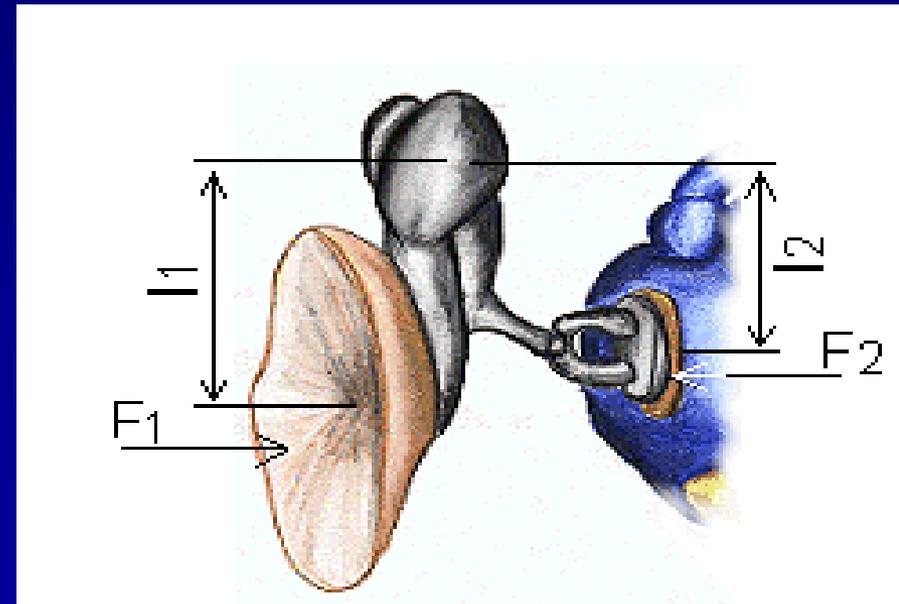
Der Übertragungsfaktor der Umsetzung über das Hebelsystem beträgt $v_H = 1,3$

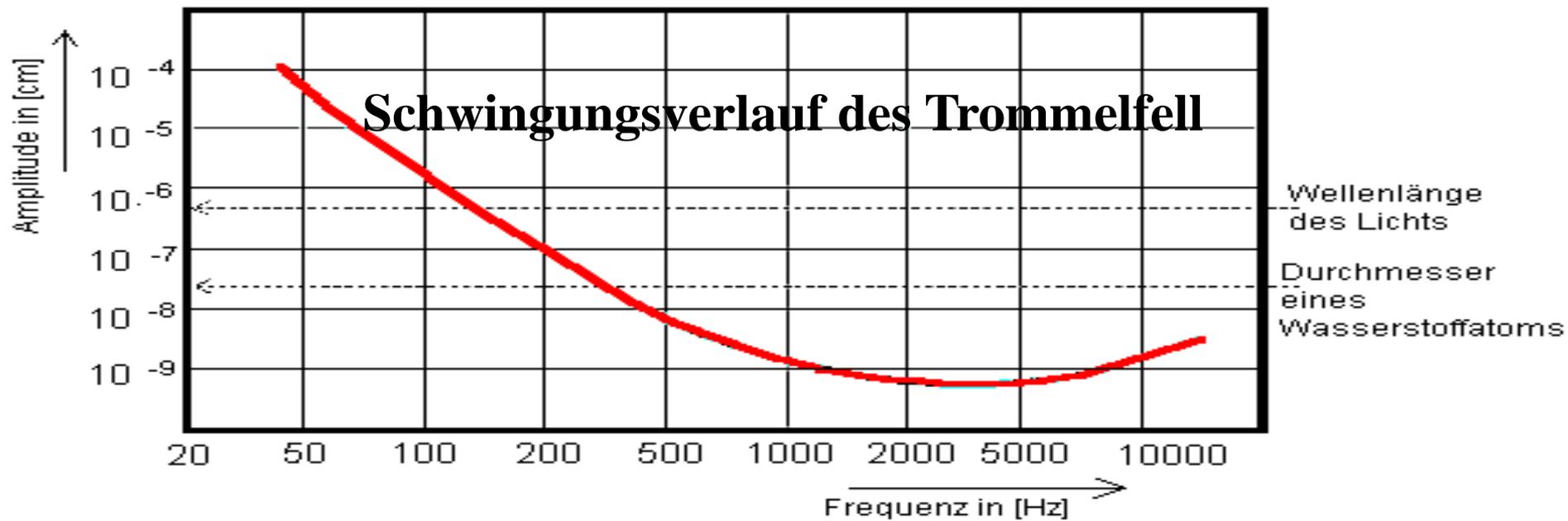
Verstärkungsfaktor (V) des Mittelohres

$V_{\text{Flächenverhältnis}} \cdot V_{\text{Hebelwirkung}}$

$V = 17 \cdot 1,3$

$V = 22$





Bis zu einer Frequenz von 2,4 kHz schwingt das gesamte Trommelfell einschließlich des Hammergriffs als starre Fläche um eine gemeinsame Drehachse. Die größte Amplitude tritt am unteren Rand des Trommelfells auf.

Oberhalb 2,4 kHz setzt ein komplexes Schwingungsverhalten ein

Mittelohrmuskel

M. tensor tympani, M. stapedius

Veränderung der Impedanzanpassung durch Kontraktion.
Reflektorische Kontraktion bei lauten Schallreizen.

Tuba Eustachii („Ohrtrumpete“)

Der Luftdruck in der Paukenhöhle wird beim Schlucken über die Tuba Eustachii an den Aussendruck angeglichen. Gelingt der Druckausgleich nicht, führt dies zu Auswölbung bzw. Eindellung des Trommelfells und damit zu einer Behinderung seiner Schwingungsfähigkeit. (Tauchen, Fliegen).

Überprüfung der Mittelohrfunktion/Schalleitungsstörungen:

- Audiometrie
- Stimmgabeltests (Rinne Test)
- Mittelohrreflexe bzw. Trommelfellimpedanz

Mittelohrmuskeln

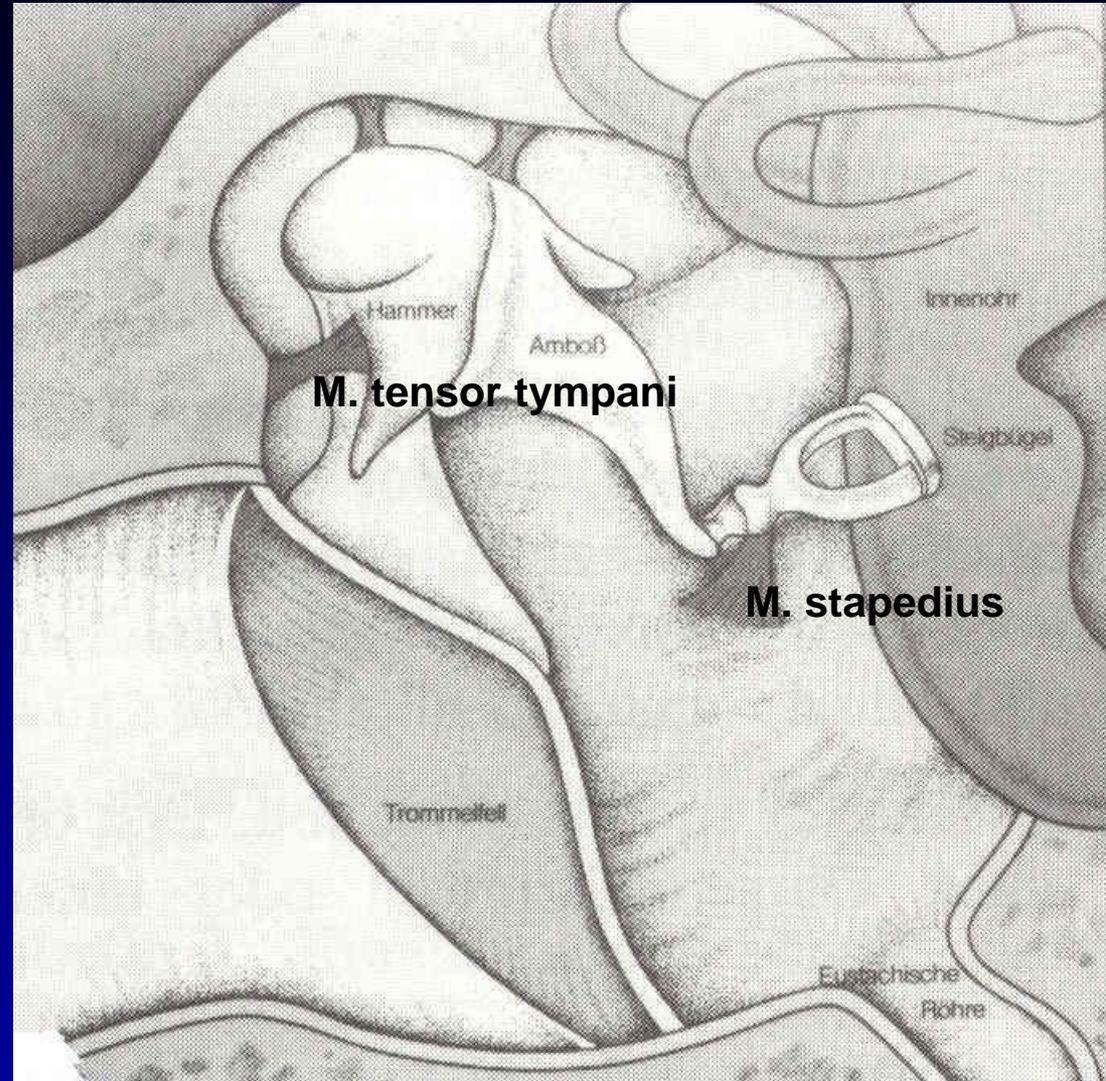
M. tensor tympani

Der Trommelfellspanner spannt bei Kontraktion das Trommelfell an und erhöht dadurch den Widerstand gegen Schall

M. stapedius

Der Steigbügelmuskel kippt bei Kontraktion den Steigbügel vom ovalen Fenster weg, so dass Druck nicht voll übertragen wird

Bei Intensitäten von 80 dB über der Hörschwelle werden Kontraktionen der Muskeln messbar, sie bewirken einen Schallschutz von mehr als 20 dB



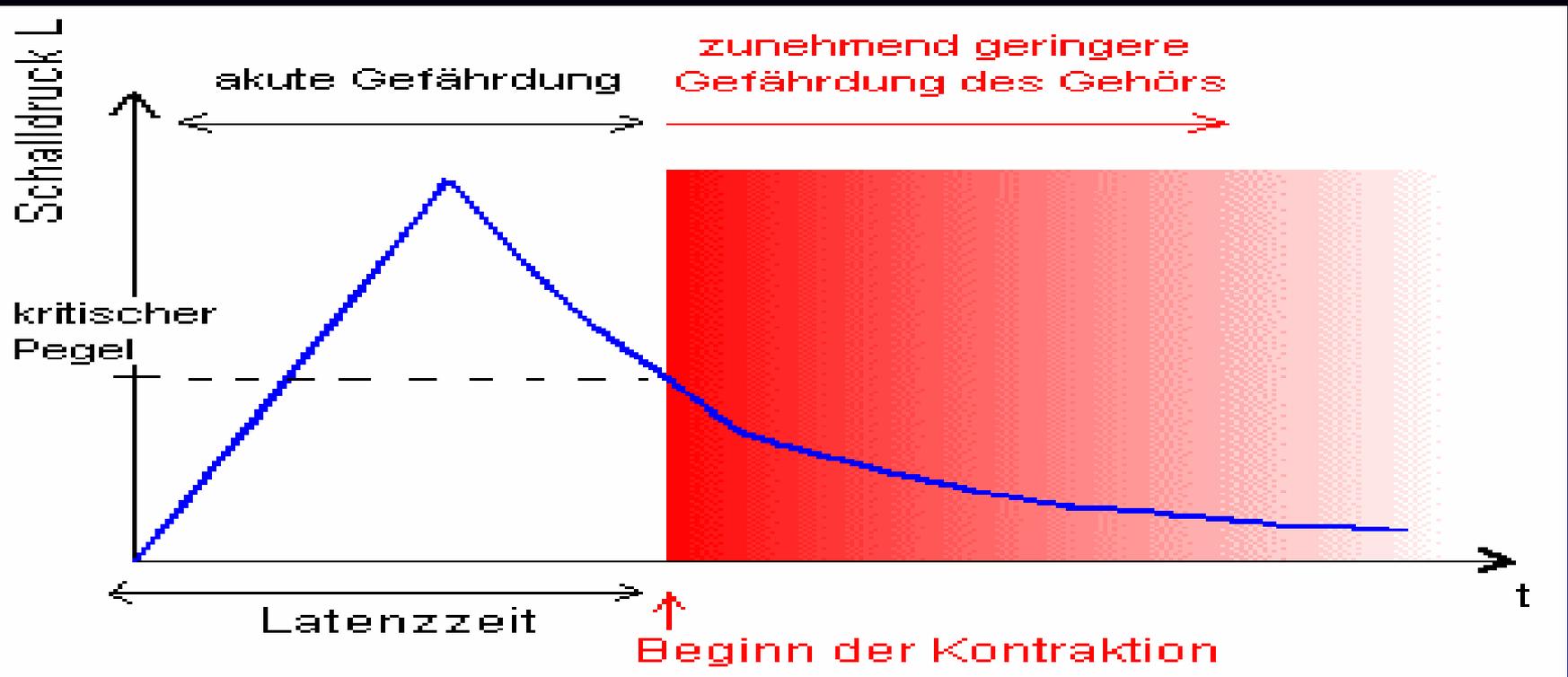
M. Stapedius

für eine volle Kontraktion werden abhängig vom Schallpegel 35 – 140 ms benötigt

- Ermüdung erst bei längerer Tondauer (> 10 s)
- oberhalb 2000 Hz kaum noch Schallschutzfunktion. Damit können Schallfrequenzen, für die das Ohr besonders empfindlich ist, ungedämpft auf das Ohr einwirken und bei hoher und anhaltender Belastung schädigen

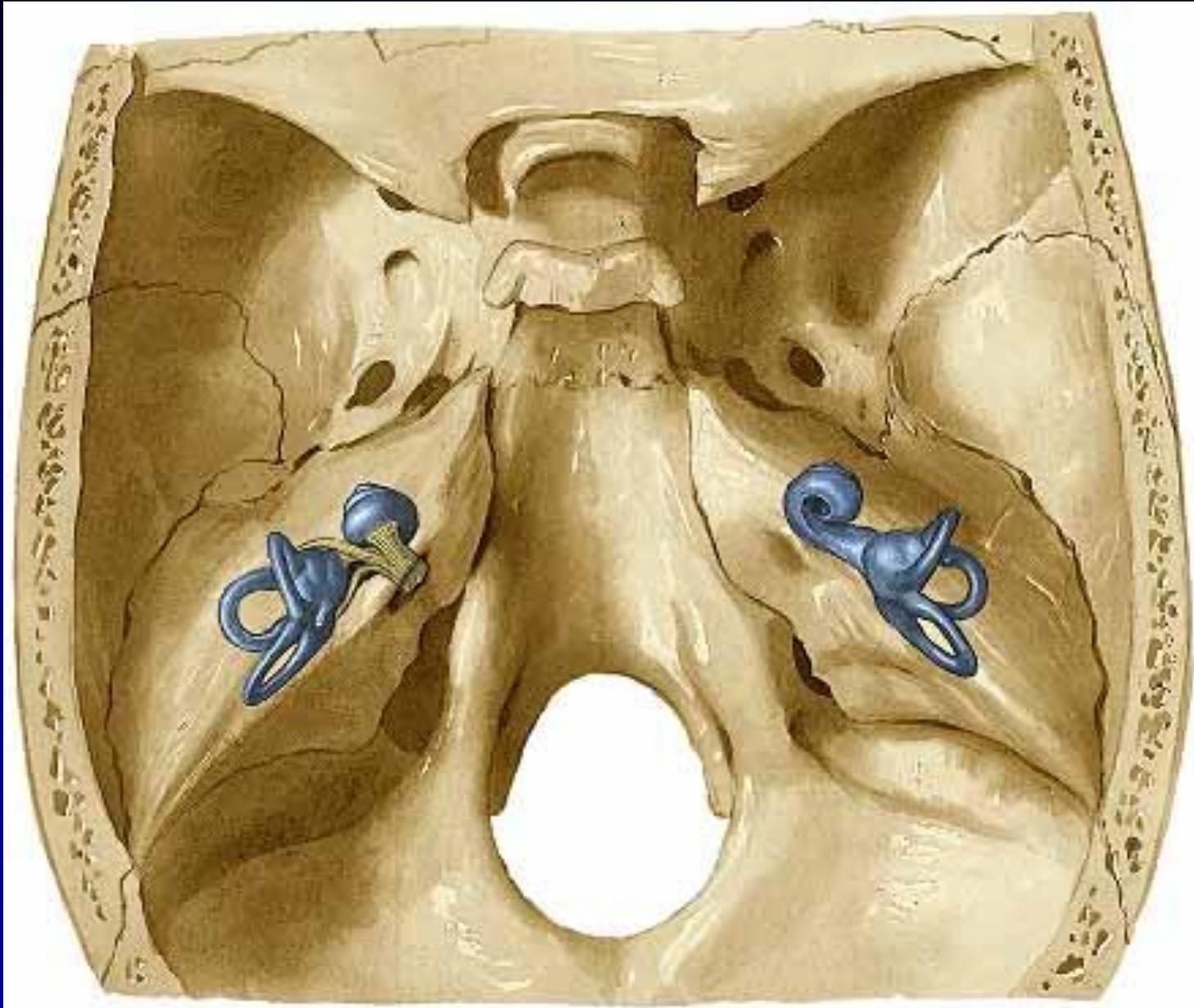
Evolutionenbiologische Aspekte

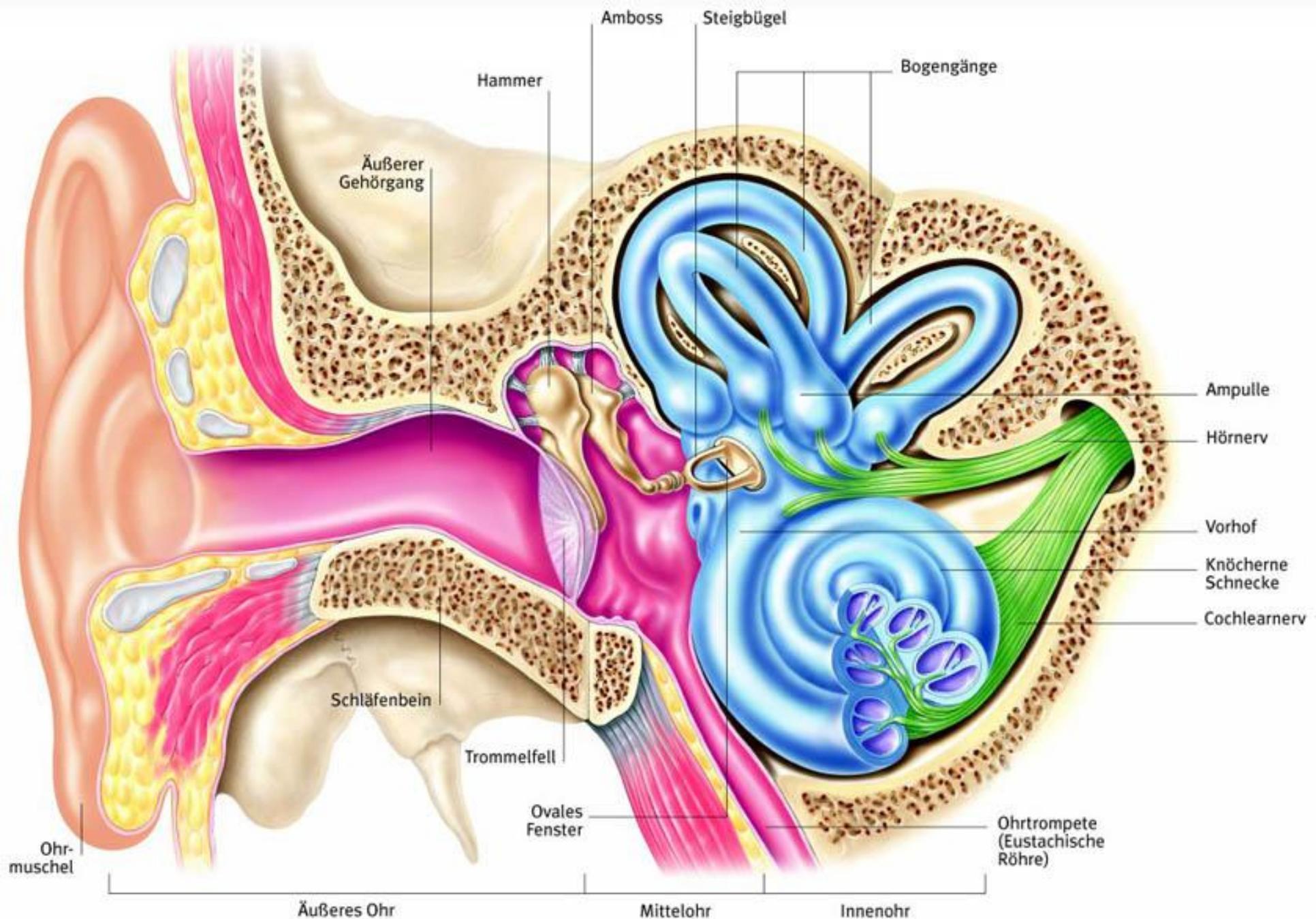
Zwischen 2000 - 5000 Hz liegen die für das Sprachverständnis wichtige Konsonanten und Umweltgeräusche, die durch laute tiefe Frequenzen verdeckt werden können. Reflektorische Dämpfung von lauten tiefen Frequenzen erhöhen den Signal-Rausch-Abstand

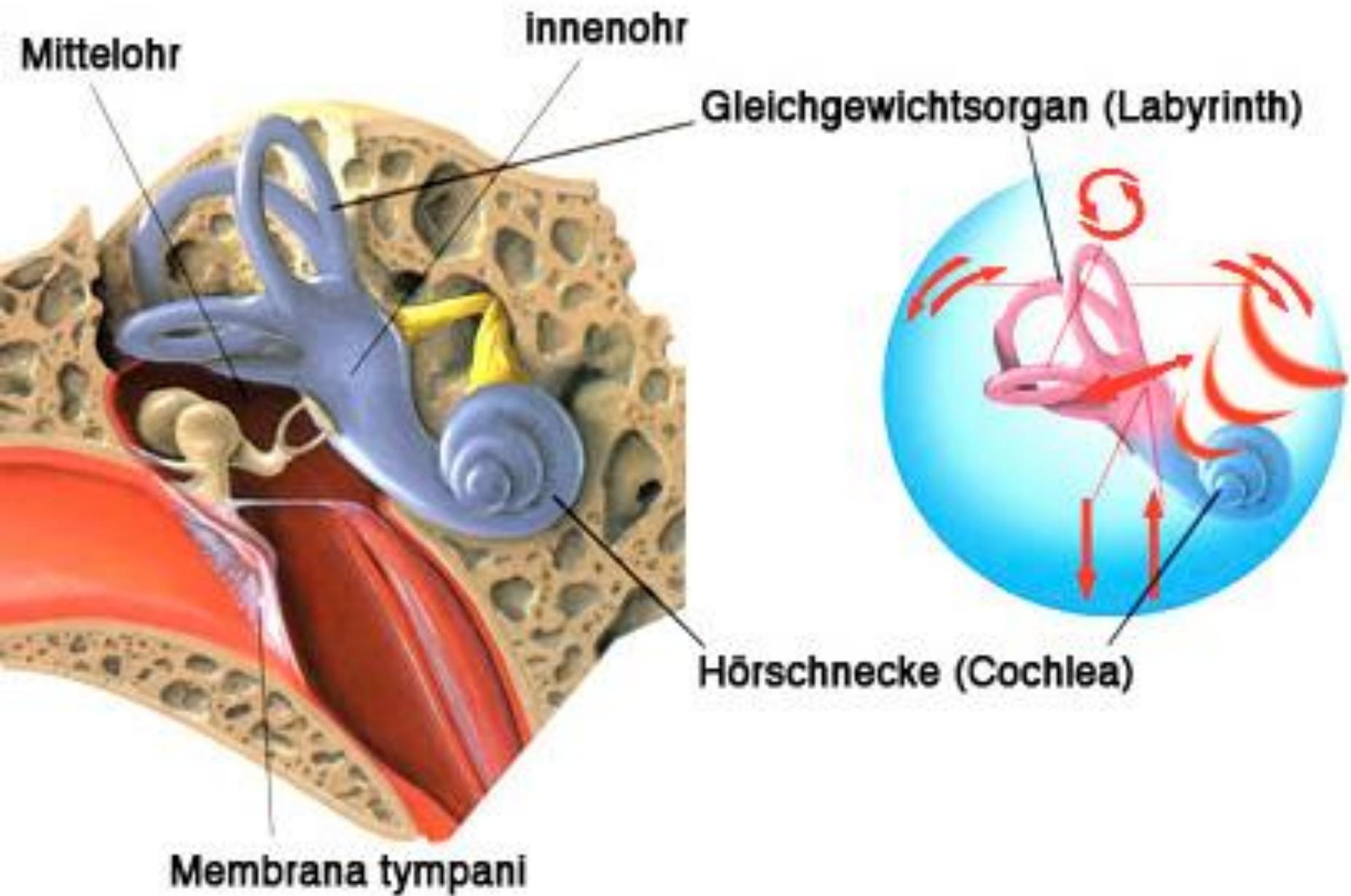


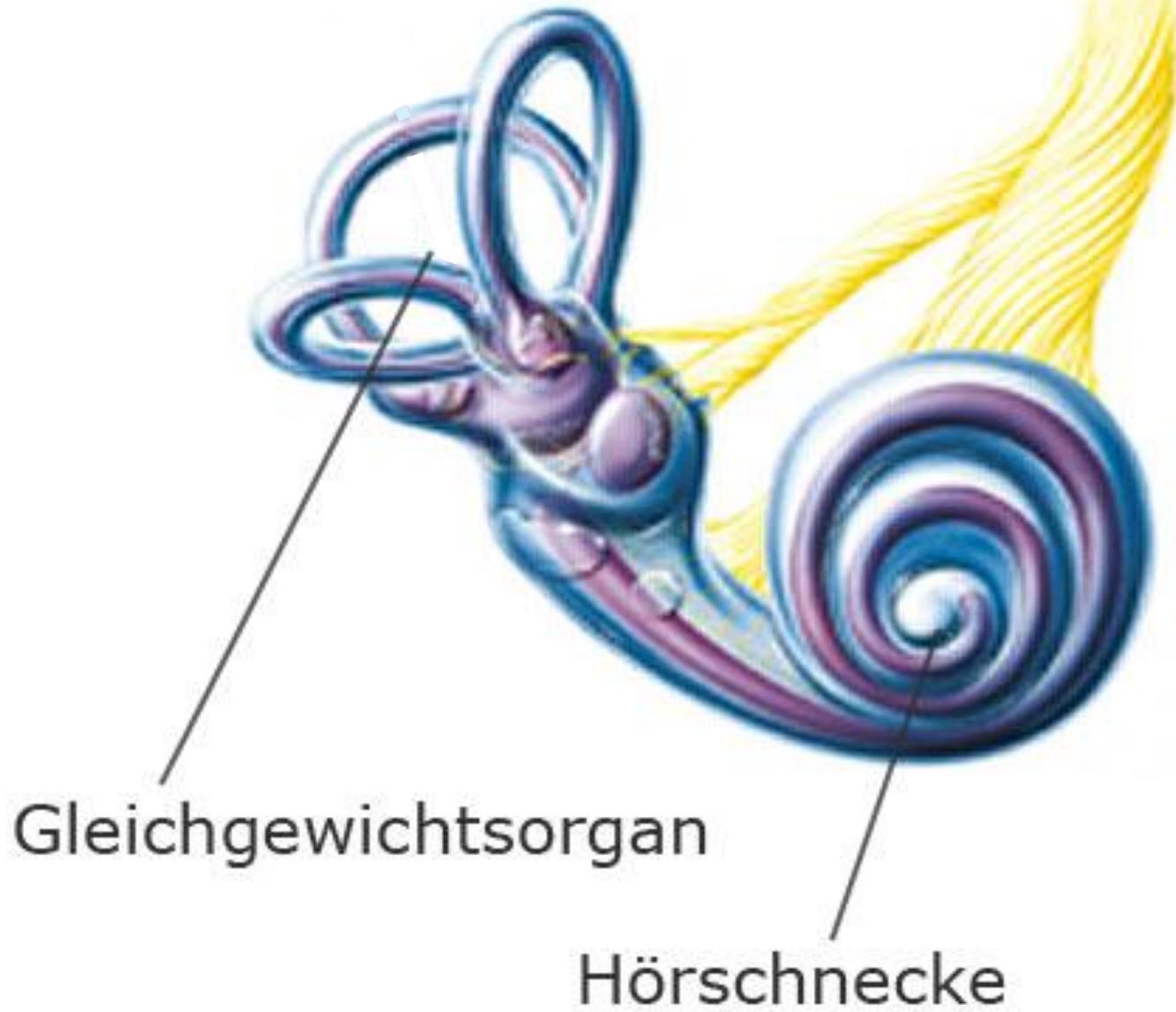
Latenzzeit: Kontraktion des M. stapedius abhängig vom Schallpegel, ca. 35 – 140 ms

Innenohr





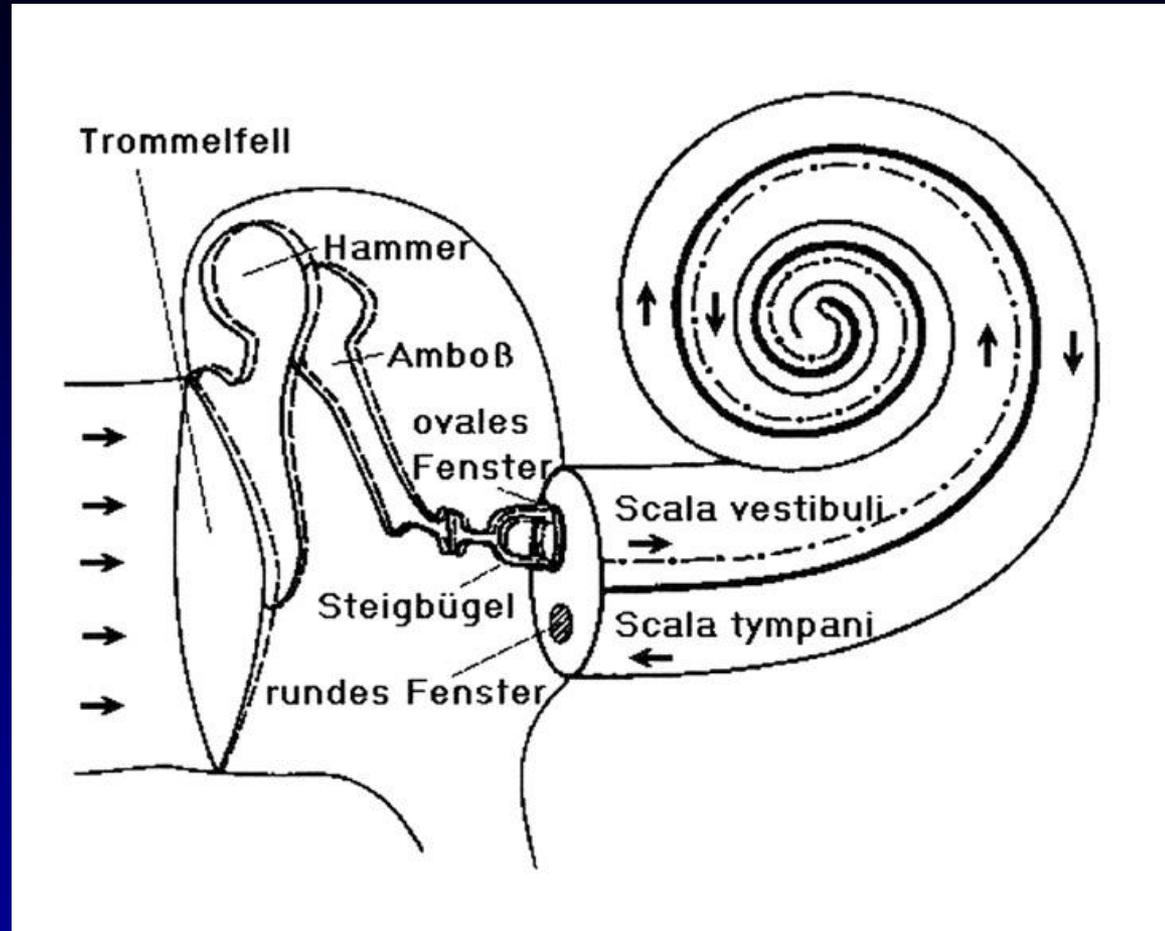


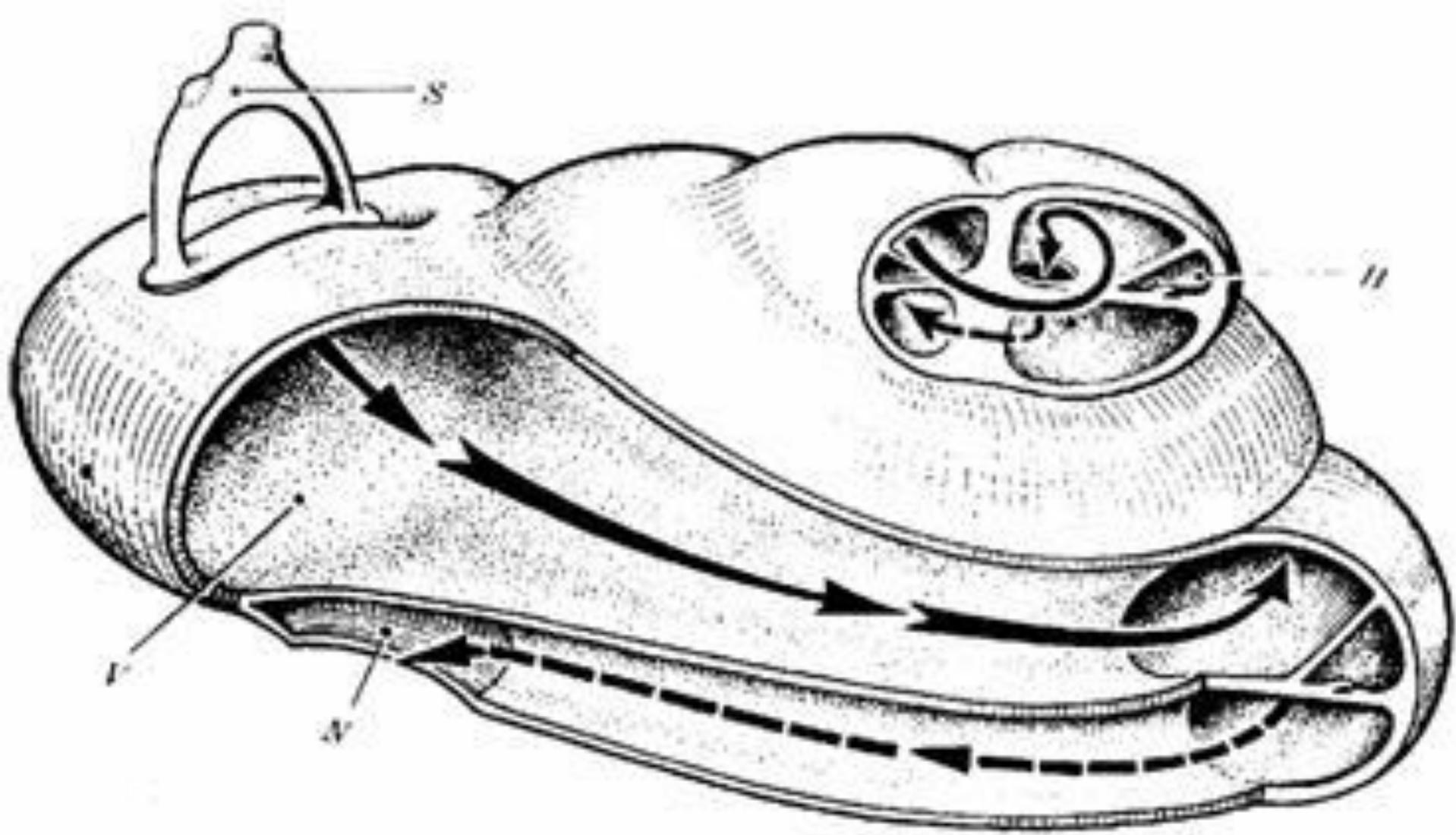


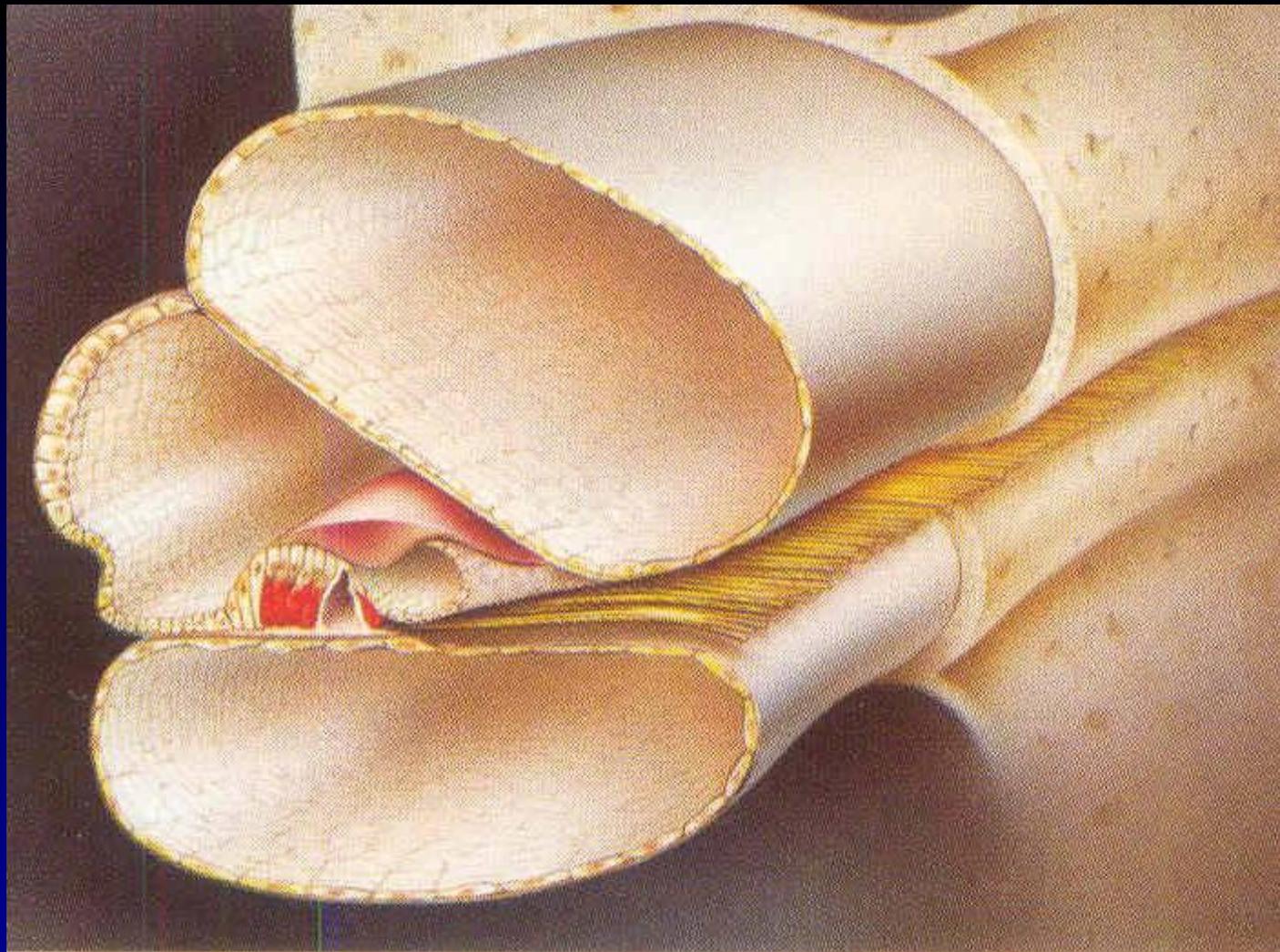
Innenohr

enthält zwei Sinnesorgane:
Gleichgewichtsorgan und
Hörorgan

Cochlea:
ovales Fenster, Helicotrema
Scala tympani, Scala media, Scala vestibuli
Rundes Fenster





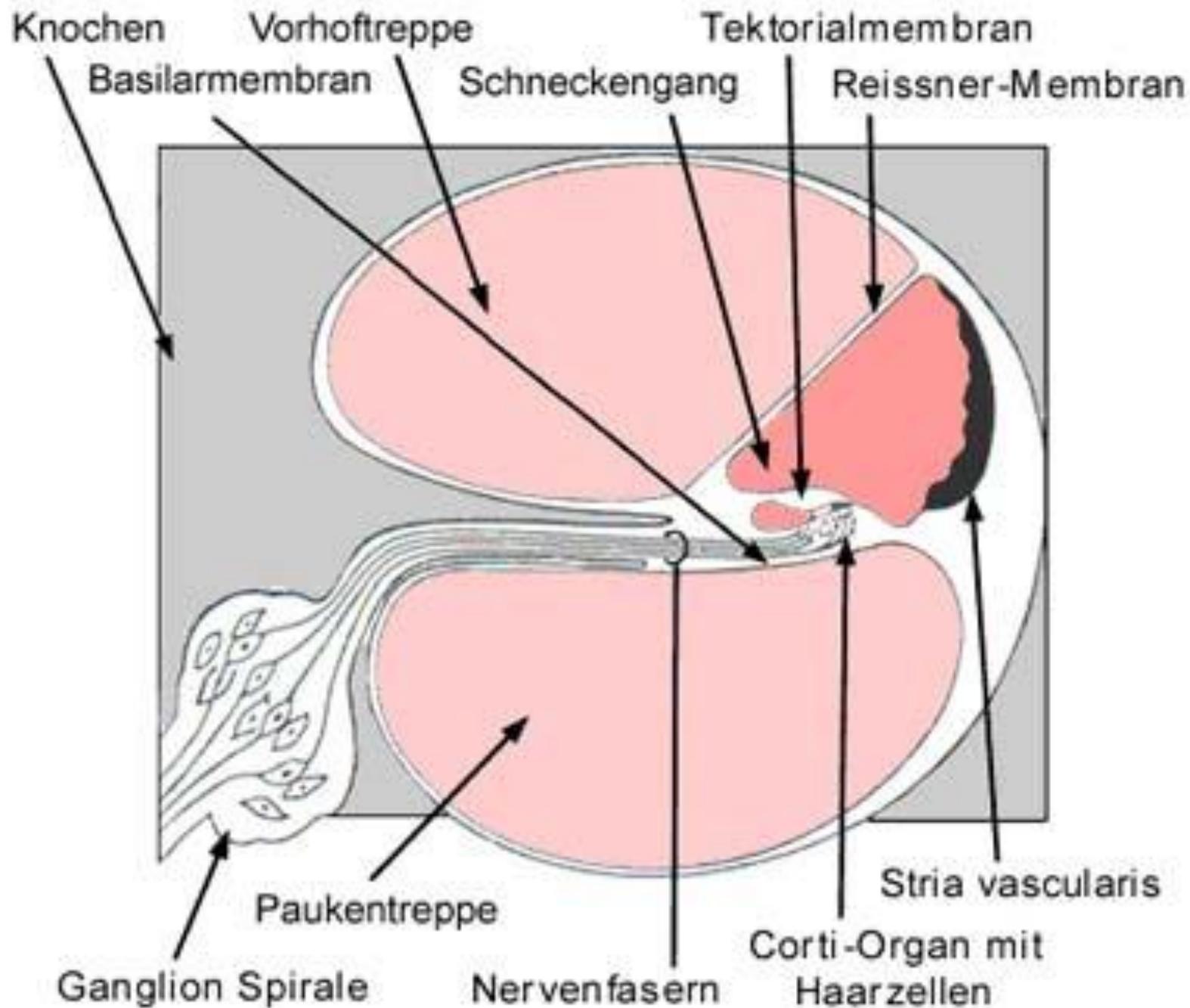


Basilarmembran
Tektorialmembran
Reissnermembran

Cortiorgan: innere und äußere Haarzellen (ca. 16 000 Sinneszellen/Ohr)

Ganglion spirale mit Bipolarzellen:

Dendriten bilden die afferenten Fasern, die ca. 30 - 40000 Axone bilden den Hörnerv





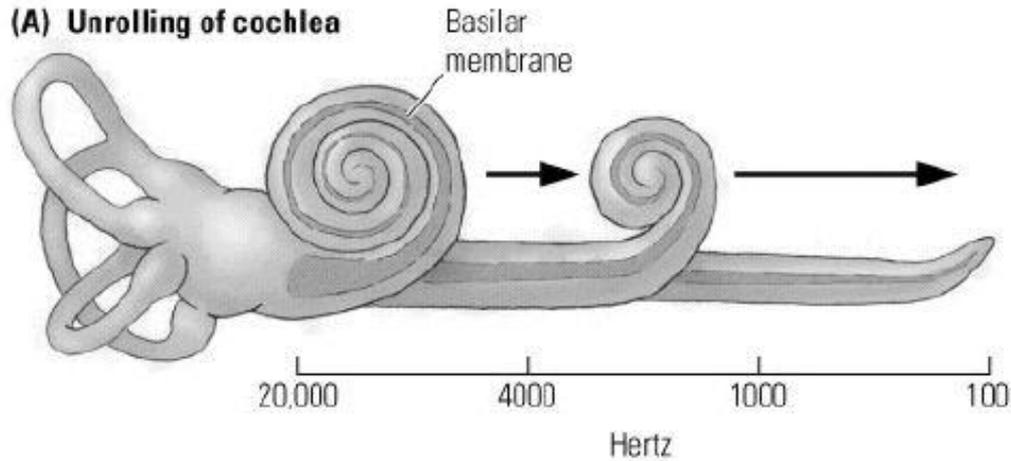
Georg Békésy

Augenarzt, Internist, Psychiater, Psychologe

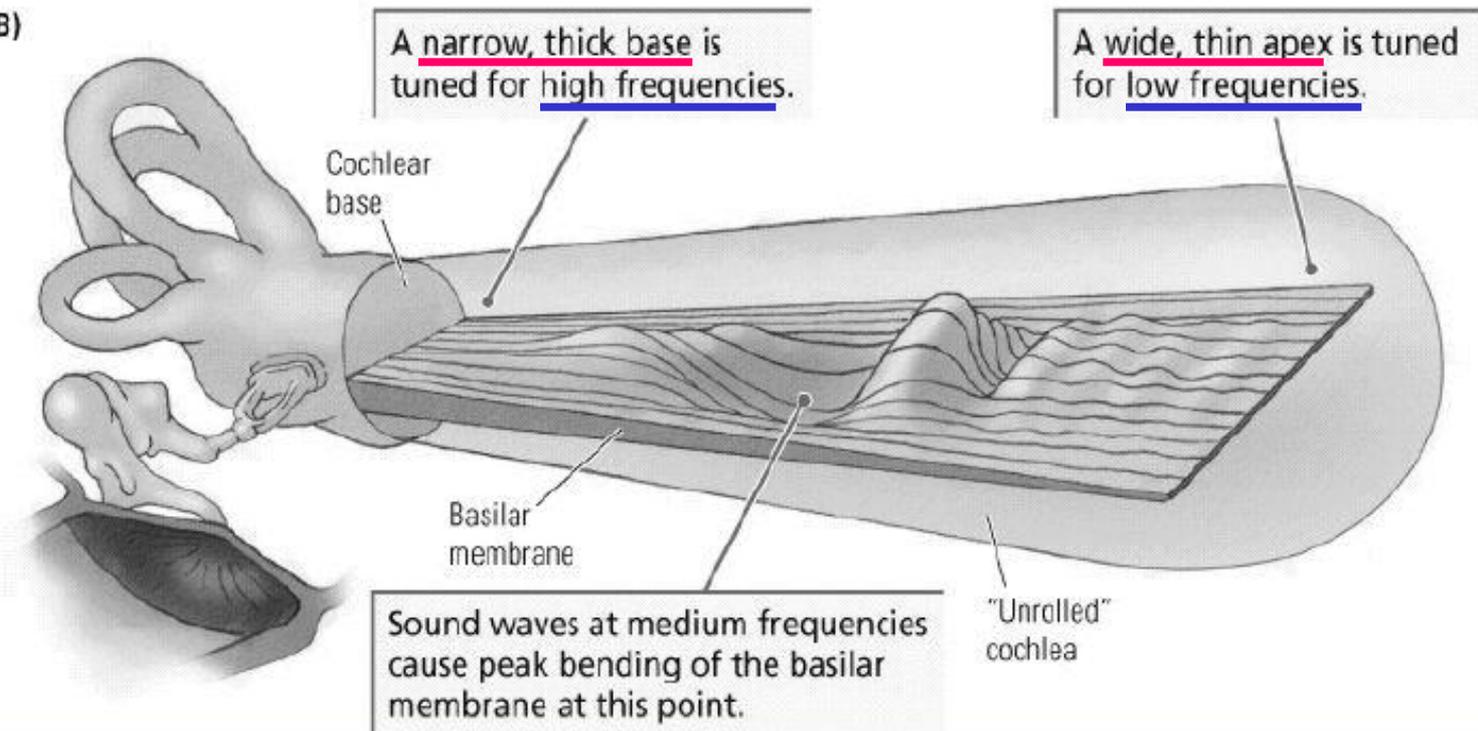
* 3. Juni 1899 in Budapest, † 13. Juni 1972 in Honolulu

1961 Nobelpreis für Medizin und Physiologie "für seine Entdeckung im physikalischen Mechanismus der Erregungen in der Schnecke des Ohres".

(A) Unrolling of cochlea



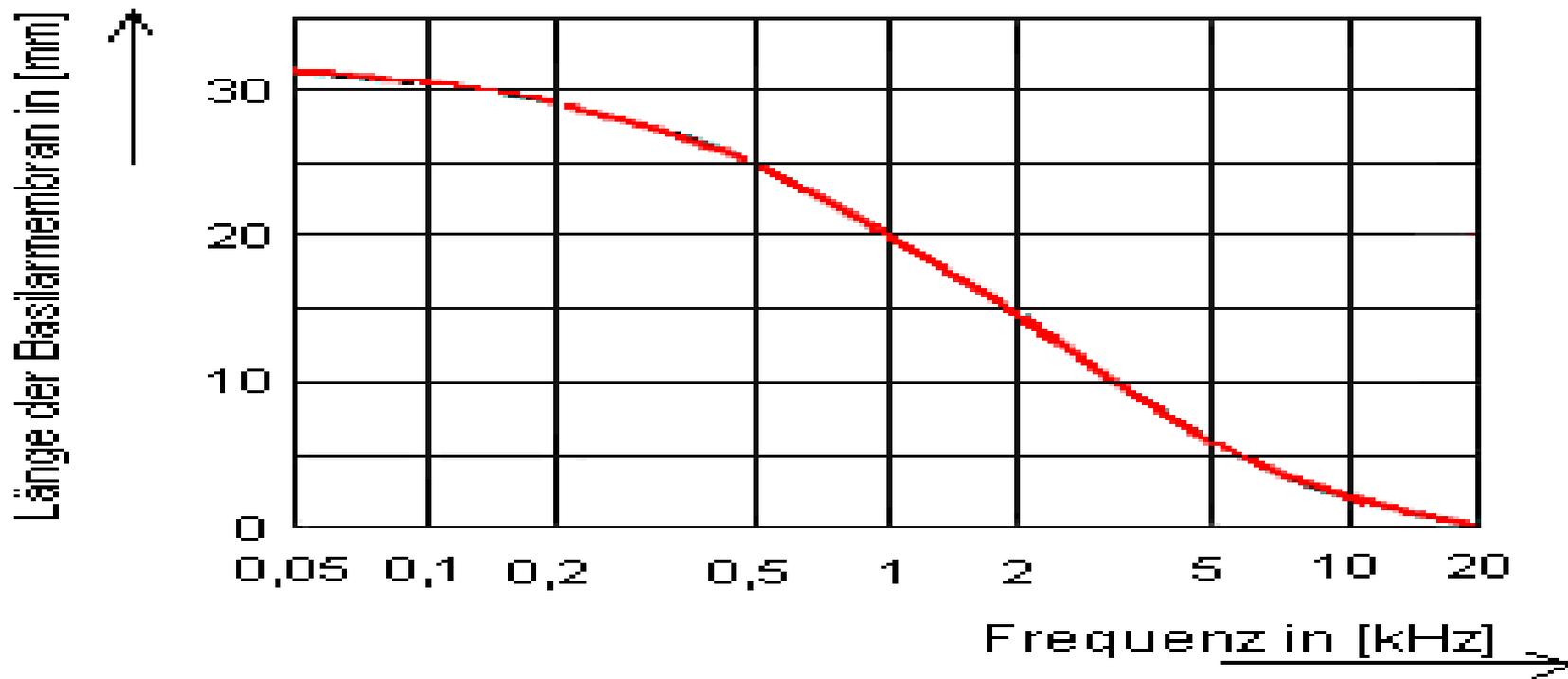
(B)



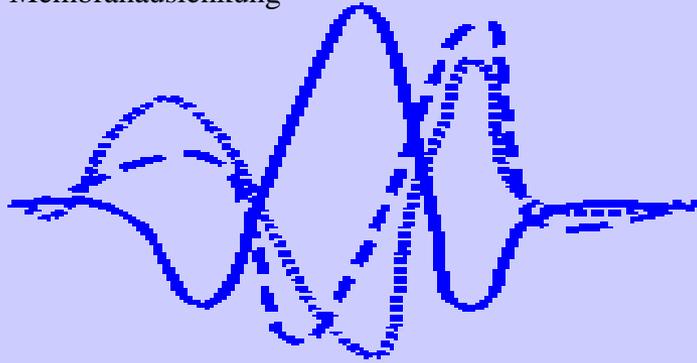
Mechanik der Basilarmembran

Druckbewegungen am ovalen Fenster bewirken Wellen, die entlang der Basilarmembran laufen (Wanderwellen). Dies führt zu einer ständigen Auf- und Abwärtsbewegung (Auslenkung) der Membranen und des Corti-Organes des Innenohres.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und die Wellenlänge der Wanderwelle nimmt wegen der abnehmenden Steifheit (vom Stapes zum Helicotrema eine im Verhältnis 100:1 abnehmende Steife) der Basilarmembran immer mehr ab, während ihre Amplitude bis zu einem Maximum steigt und dann verebbt.



Membranauslenkung



Helicotrema

Wellenlänge ↓

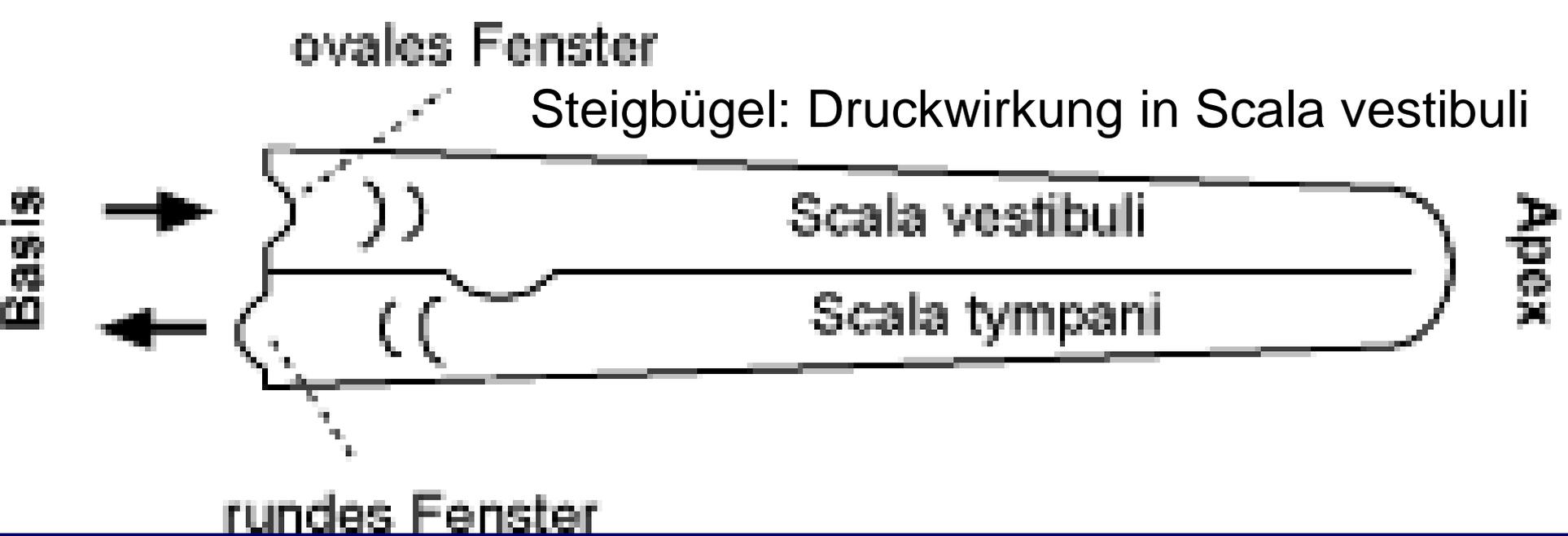
Wellengeschwindigkeit ↓

(Basilarmembran wird breiter und dehnbarer)

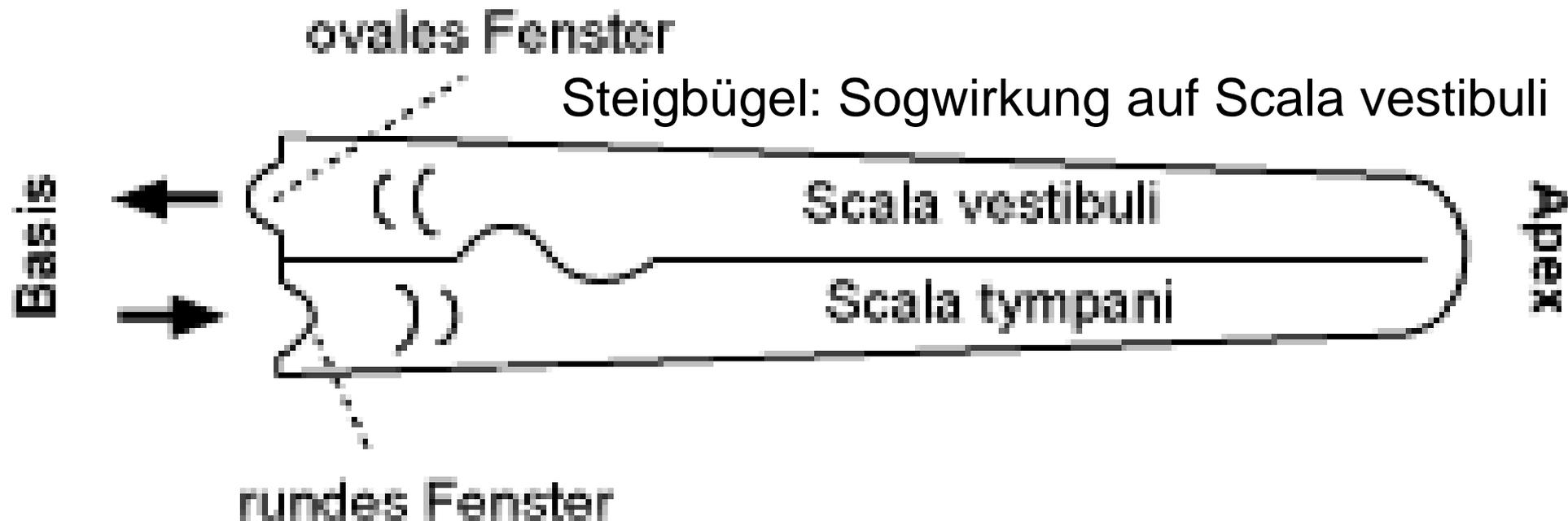
**Wellengeschwindigkeit ist frequenzabhängig
steigbügelnahe -fern**

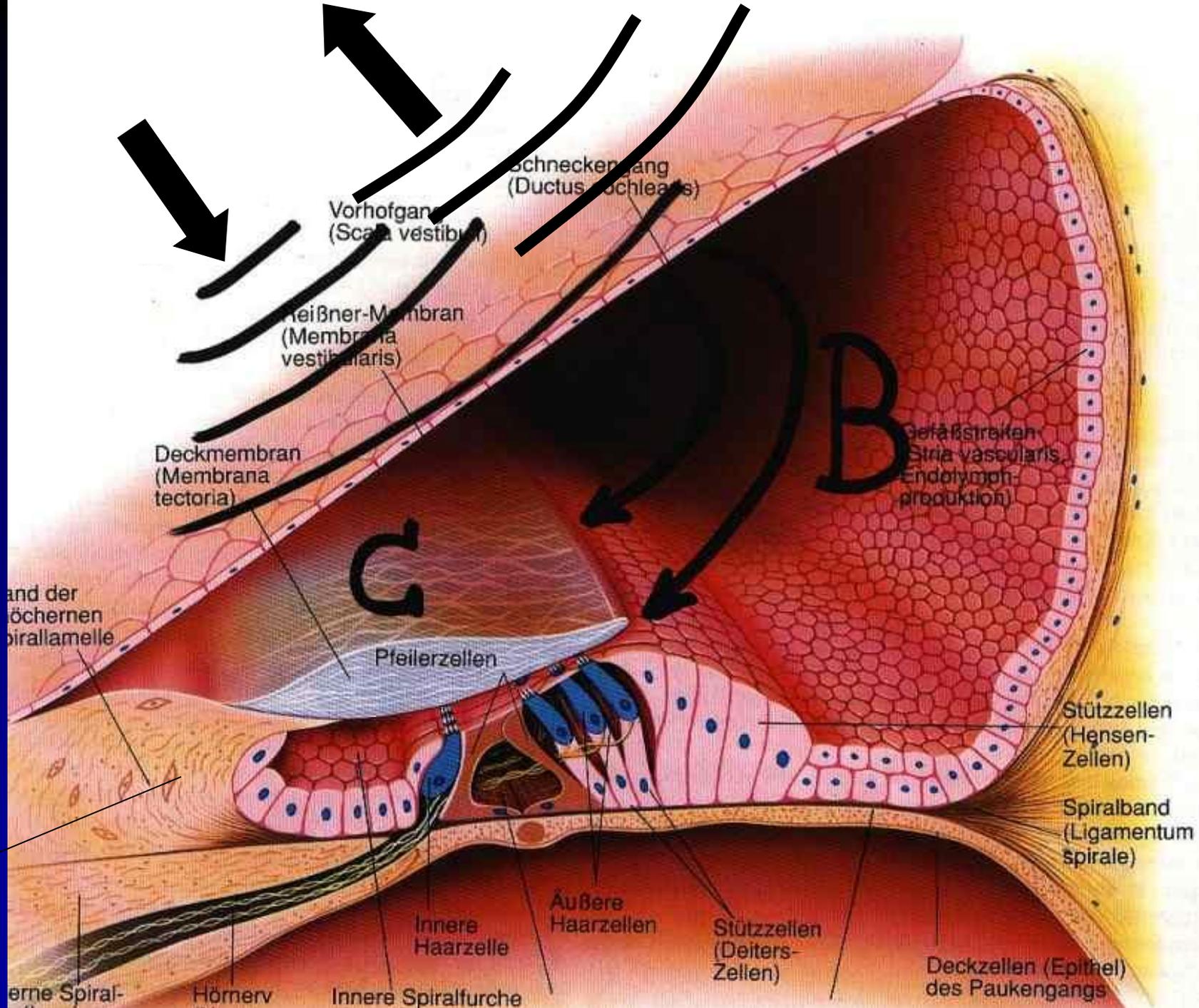
10 kHz: 150 m/s - 40 m/s

100 Hz: 8 m/s - 1 m/s



bei Sogwirkung auf Scala vestibuli wird Basilarmembran angehoben

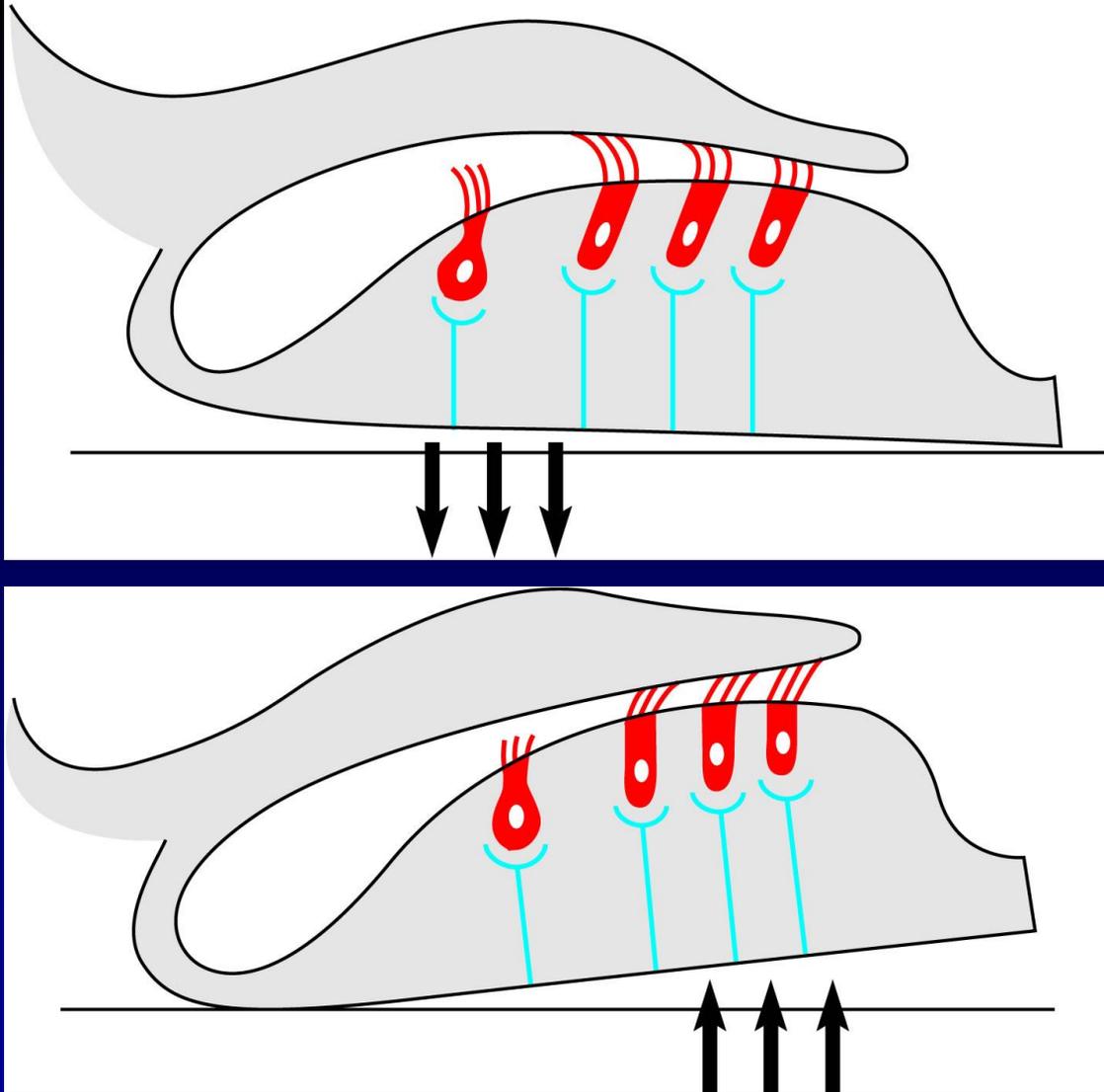




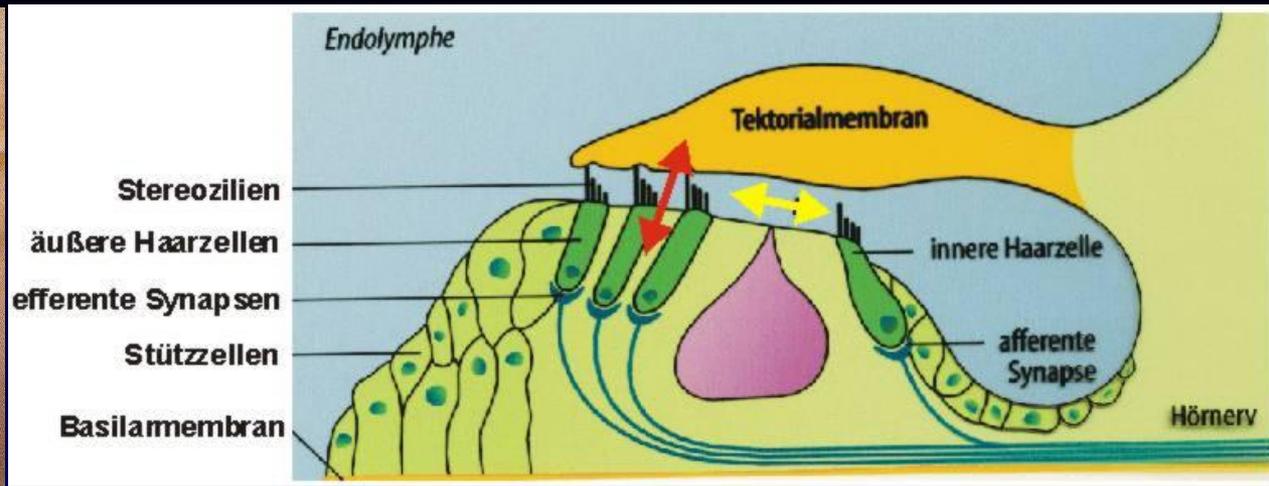
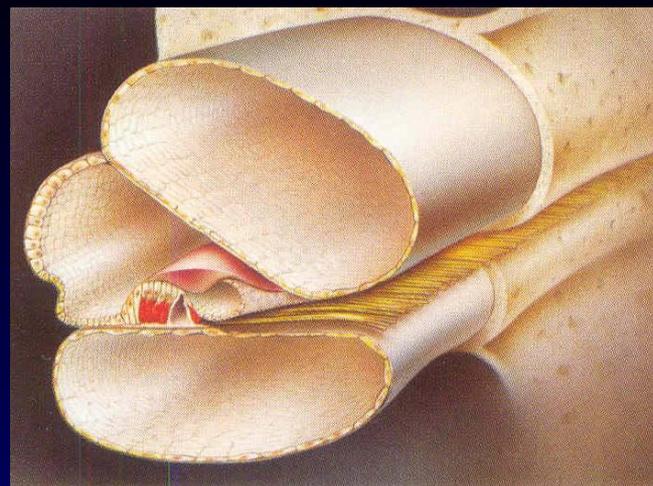
Indirekte Erregung der inneren Haarzellen

Oszillationen der äußeren Haarzellen verstärken die Schwingungsenergie bzw. die Schwingungsamplitude der Wanderwelle auf der Basilarmembran. Als Folge werden die Stereovilli der inneren Haarzellen abgebogen.

Ähnlich dem Mechanismus der *Transduktionskanäle* in den äußeren Haarzellen führt die Abscherung der Stereovilli der inneren Haarzellen zu einer Erregung der afferenten Nervenfasern durch Auslösung von Aktionspotentialen.



Auslenkung der Stereozilien durch Relativbewegungen von Basilar- und Tektorialmembran

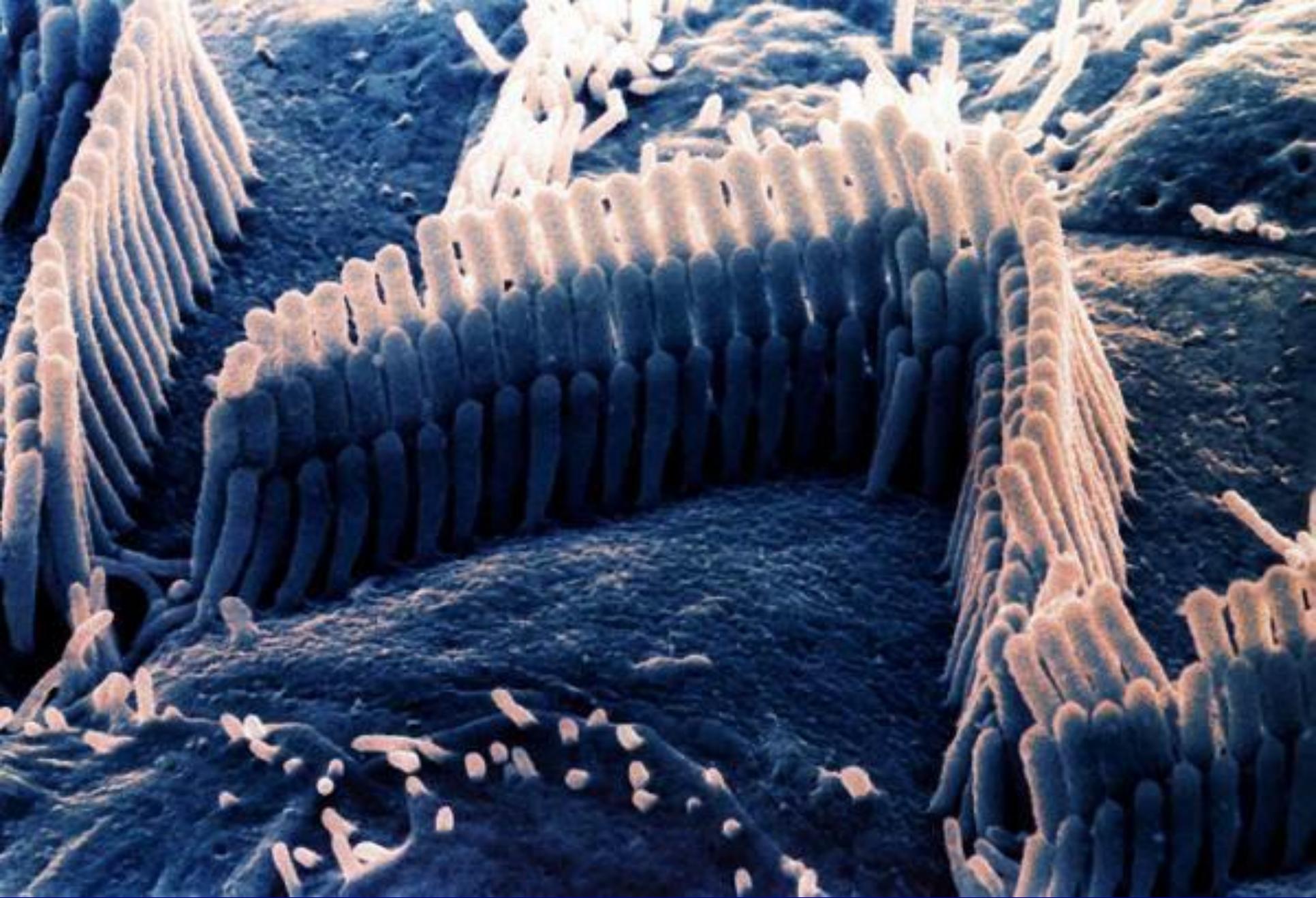


Die Tektorialmembran berührt die Stereozilien der äußeren, nicht aber der inneren **Haarzellen**.

Durch Wanderwelle werden Basilar- und Tektorialmembran gegeneinander verschoben und die Zilien abgeschert.

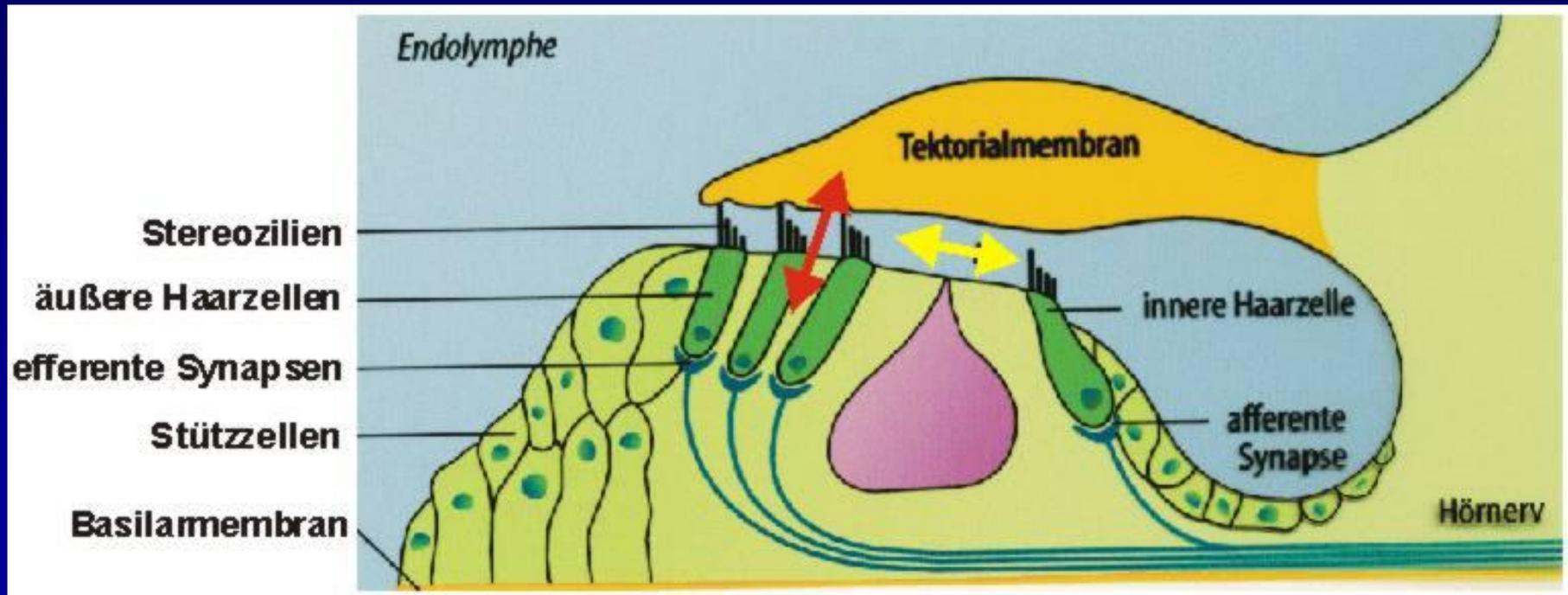
Die äußeren **Haarzellen** werden zu Längenänderungen stimuliert: Depolarisation führt zur Kontraktion, die Zellen "vibrieren" mit der Frequenz des eintreffenden Tones und verstärken damit die Auslenkungen der Tektorialmembran, mit lokalen Bewegungen ca. 1000fach: die **äußere Haarzellen** fungieren als **cochleärer Signalverstärker bei einer definierten Frequenz (Frequenzselektivität)**.

Die verstärkte Bewegung führt zur Stimulierung der inneren **Haarzellen**, die das eigentliche sensorische Signal produzieren und zum Gehirn senden, erst durch diese Verstärkung werden leise bis mittlere Töne hörbar.



Efferente Kontrolle der Haarzelle

Parallel zu der afferenten Hörbahn besteht die efferente Hörbahn (zentrifugale Bahn). Sie erstreckt sich vom Cortex bis zur Cochlea. Olivocochleäre Bündel: vom oberen Olivenkomplex v.a. zu den äußeren Haarzellen der Cochlea (gekreuzt und ungekreuzt).



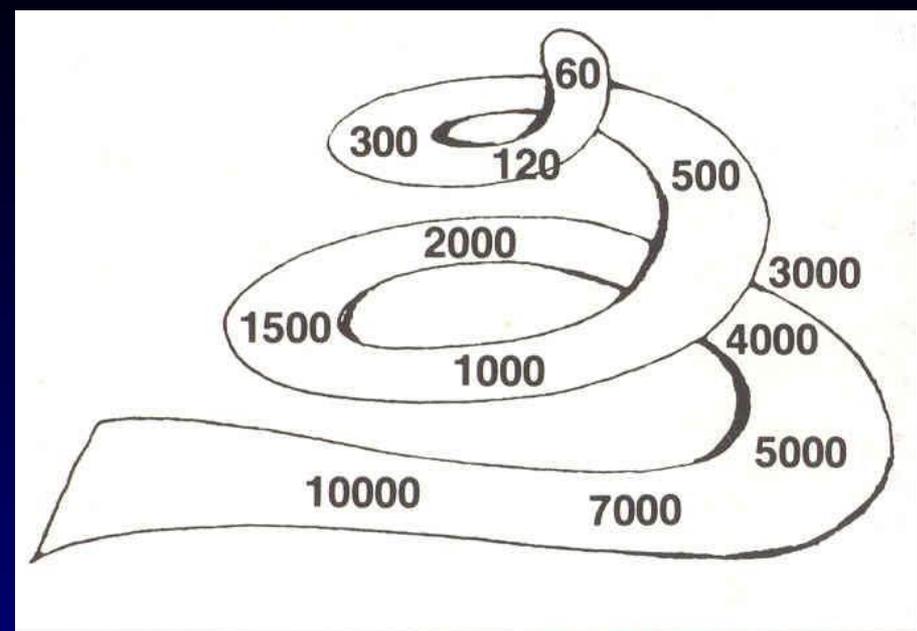
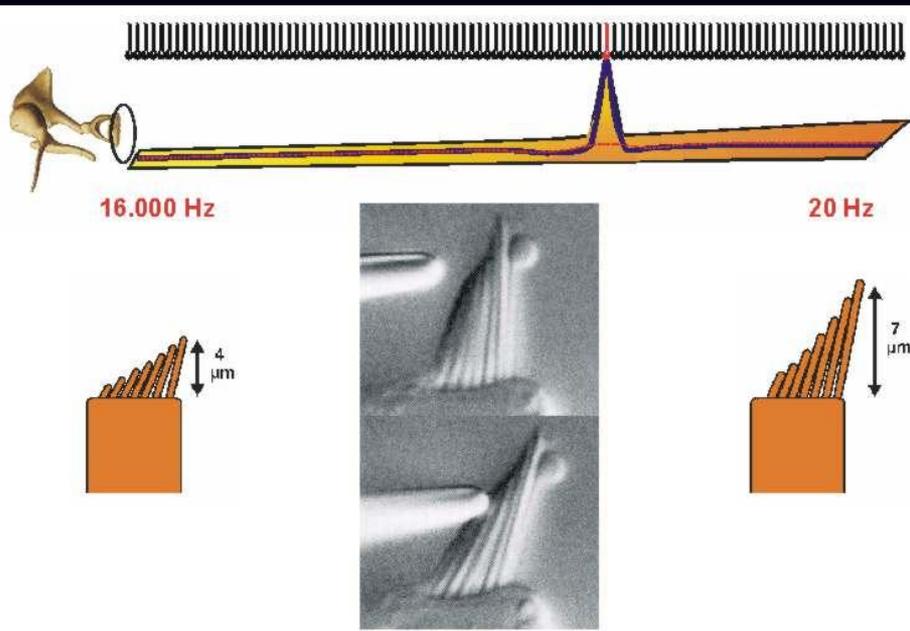
afferente Fasern:

90% der peripheren Dendriten myelinisiert, versorgen die inneren Haarzellen

10% der peripheren Dendriten nicht myelinisiert, verzweigt, versorgen die äußeren Haarzellen

efferente Fasern:

enden an den äußeren Haarzellen, können die Empfindlichkeit der Haarzellen regulieren.



Innere Haarzellen (ca. 3500)

- angeordnet in einer Reihe entlang der Basilarmembran.
- sind Sensoren der Cochlea, leiten Information über die Position der Resonanzschwingung der Basilarmembran an das Gehirn weiter.
- sind auf bestimmte Frequenzen abgestimmt:
 1. Stereozilien der Haarzellen aus dem Hochfrequenzbereich sind kürzer als die der Haarzellen aus der Nähe der Cochleaspitze.
 2. Durch unterschiedliche Ionenkanäle ist die mechano-elektrische Transduktion dem jeweiligen Frequenzbereich angepasst.

Orts-Transformation/Tonotopie: Frequenzselektivität durch räumliche Abbildung der Frequenzen auf der Basilarmembran.

hohe Frequenzen: Wellenmaximum in der Nähe des Stapes

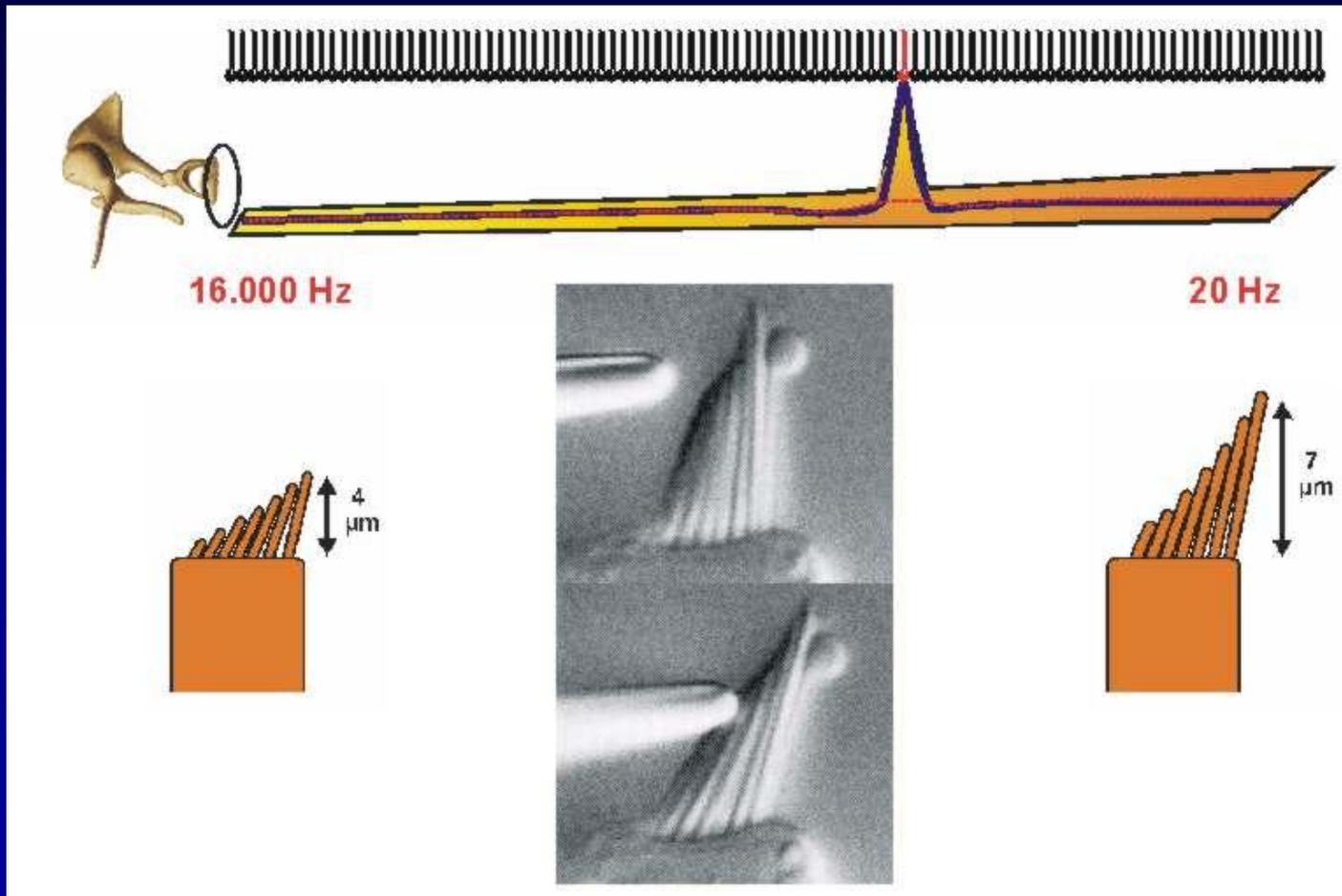
tiefe Frequenzen: Wellenmaximum in der Nähe des Helicotremas

Im Bereich des Maximums der Wanderwelle kommt es zu Scherbewegungen zwischen Basilar- und Tektorialmembran, was zu einem *Rezeptorpotential* in den äußeren Haarzellen führt.

- Schalltransduktion
- Verstärkung durch äußere Haarzellen, Verstärkung der Wanderwelle durch aktive Längenänderungen, Verbesserung der Frequenzselektivität

Ortstherorie:

Jeder inneren Haarzelle sind optimale Reizfrequenzen zugeordnet, die aufgrund der charakteristischen Wanderwelle entstehen.



Zusammenfassung des Transduktionsprozesses im Innenohr

1. Zunächst bildet sich durch passive Eigenschaften der Basalmembran eine Wanderwelle aus
2. Im Bereich des Wanderwellenmaximums werden die äußeren Haarzellen erregt und oszillieren aktiv. Dies verstärkt lokal die Wanderwelle, so dass nun auch
3. die inneren Haarzellen erregt werden. Auslösung von Aktionspotentialen in den afferenten Fasern des Hörnervs.

Frequenzanalyse

Analyse von zwei überlagerten Sinustönen:

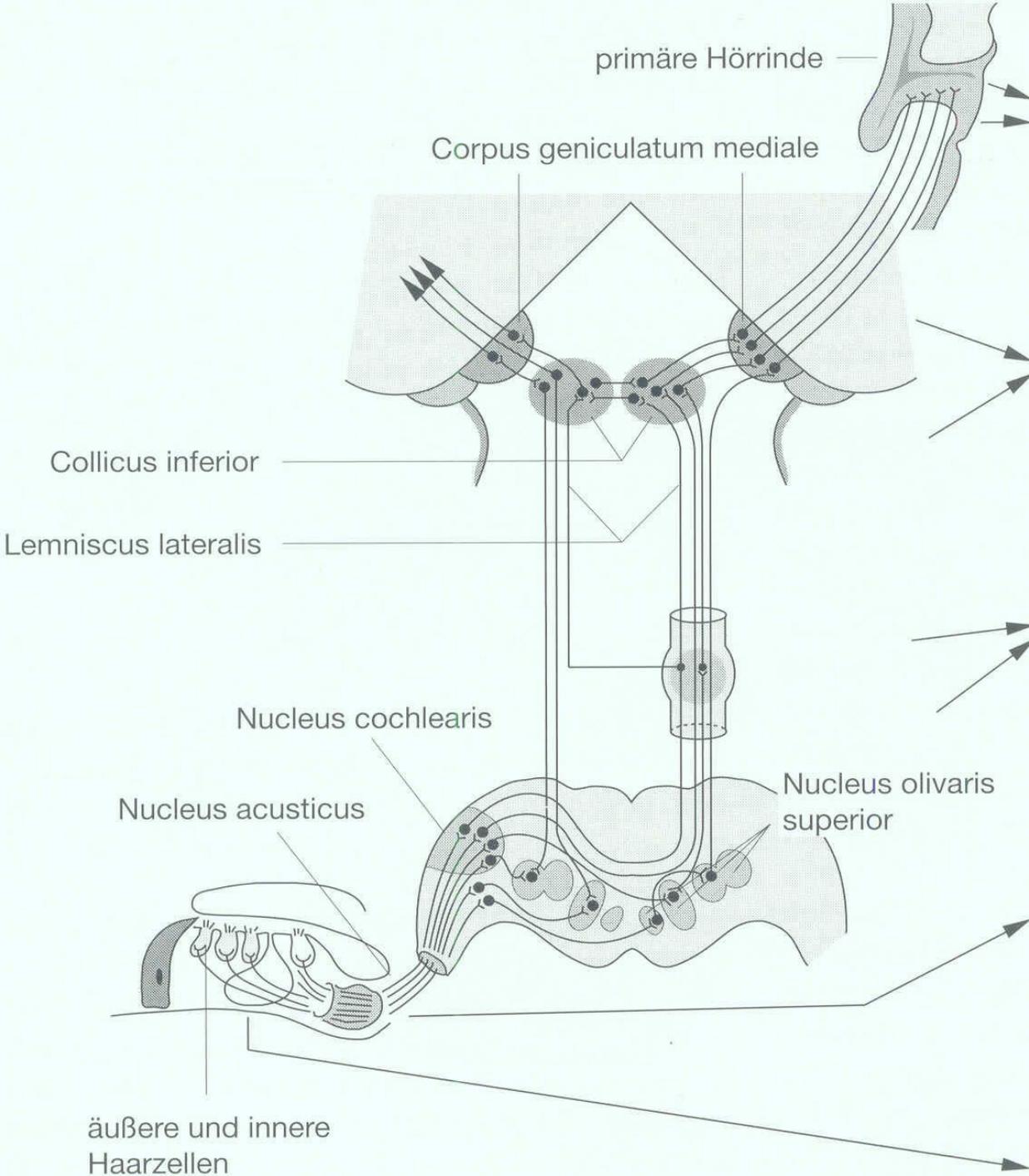
Schwebung: Modulationsfrequenz von 4 Hz

Rauhigkeit: Modulationsfrequenz von 15 Hz (max. 70 Hz)

Unterscheidung von zwei Tönen: 200 - 300 Hz

Kritische Bandbreite: Frequenzabstand, innerhalb dessen man die Empfindung der Rauhigkeit hat.

Hörbahn



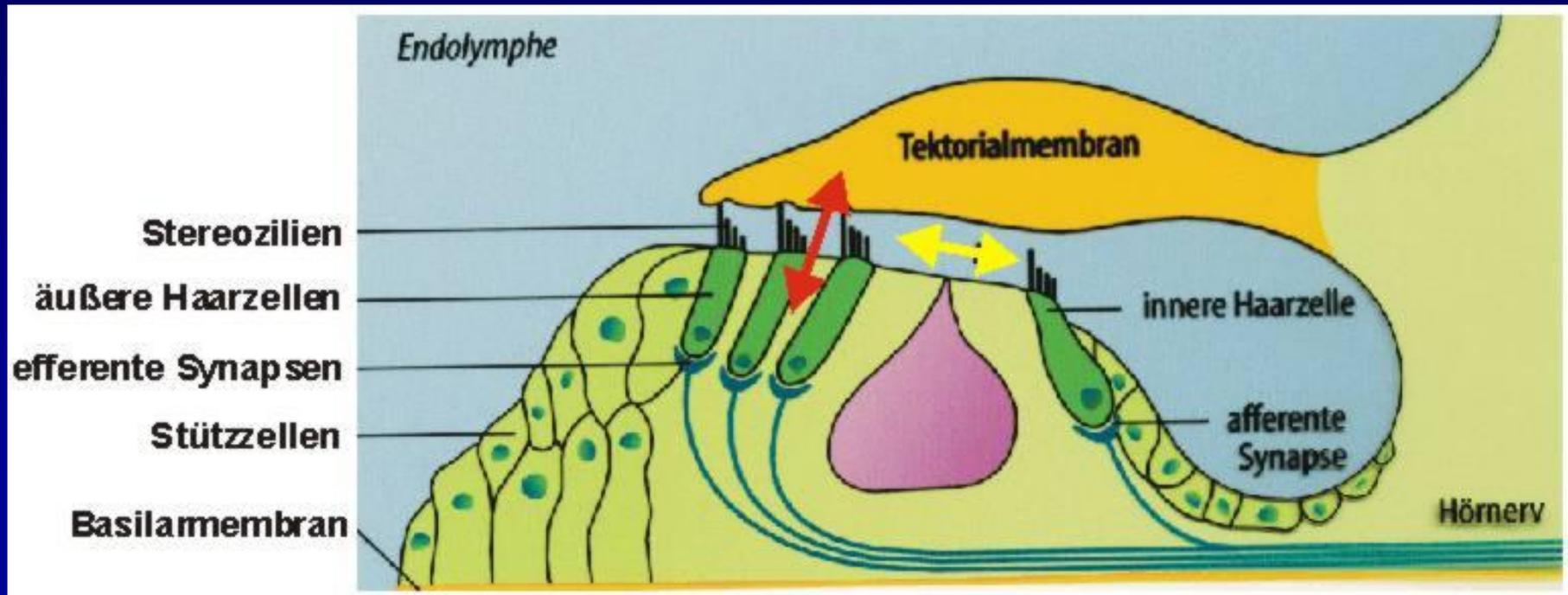
Zentrale Hörbahn

retrocochleärer Anteil

cochleärer Anteil

Efferente Kontrolle der Haarzelle

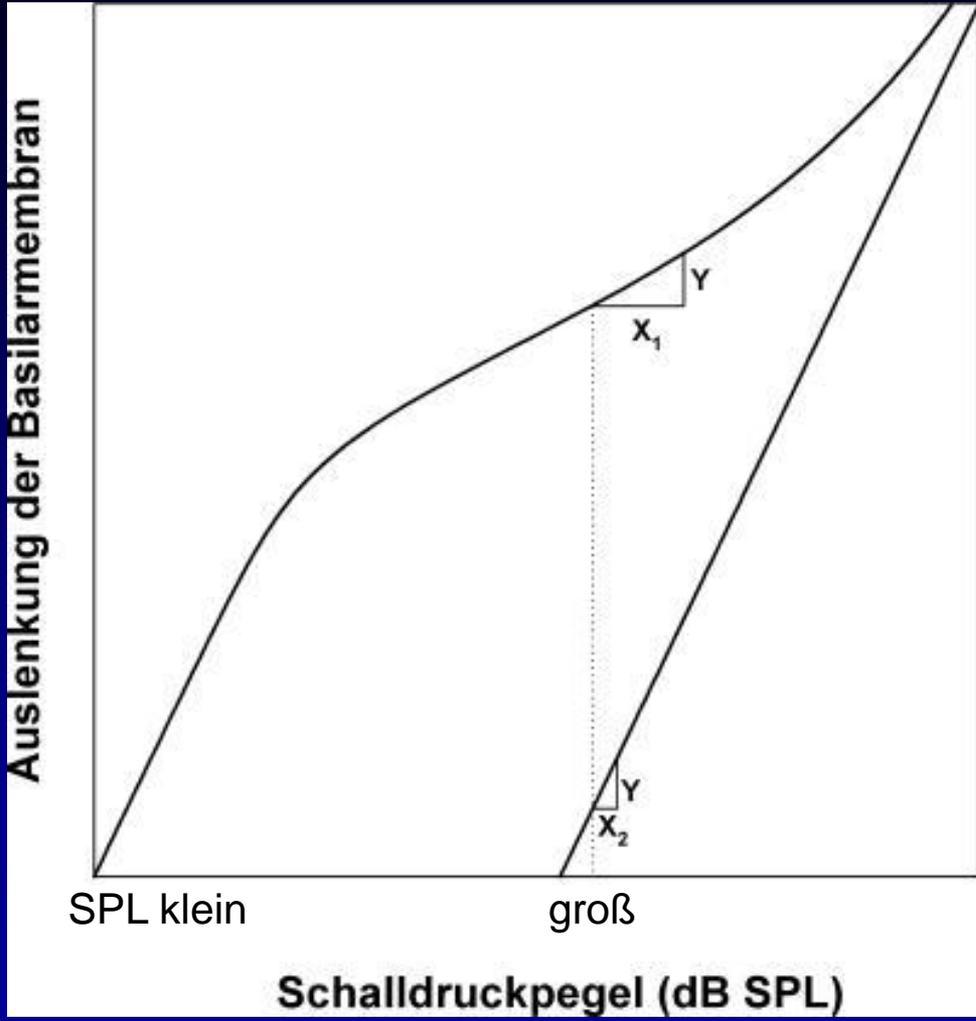
Parallel zu der afferenten Hörbahn besteht die efferente Hörbahn (zentrifugale Bahn). Sie erstreckt sich vom Cortex bis zur Cochlea. Olivocochleäre Bündel: vom oberen Olivenkomplex v.a. zu den äußeren Haarzellen der Cochlea (gekreuzt und ungekreuzt).



Innenohrschwerhörigkeit

HÖRMAL
..WER DA
HÄMMERT

Rekrutmenthypothese als Verlust des aktiven kochleären Verstärkers.



S-förmig gebogene Linie bei hohen SPL: Mit dem aktiven kochleären Verstärker benötigt die Amplitudenzunahme (y) der Basilarmembran im Innenohr, die zur Wahrnehmung einer Lautheitsänderung erforderlich ist, eine relativ große Zunahme des Schalldruckpegels (x_1), weil die Kurve nichtlinear verläuft.

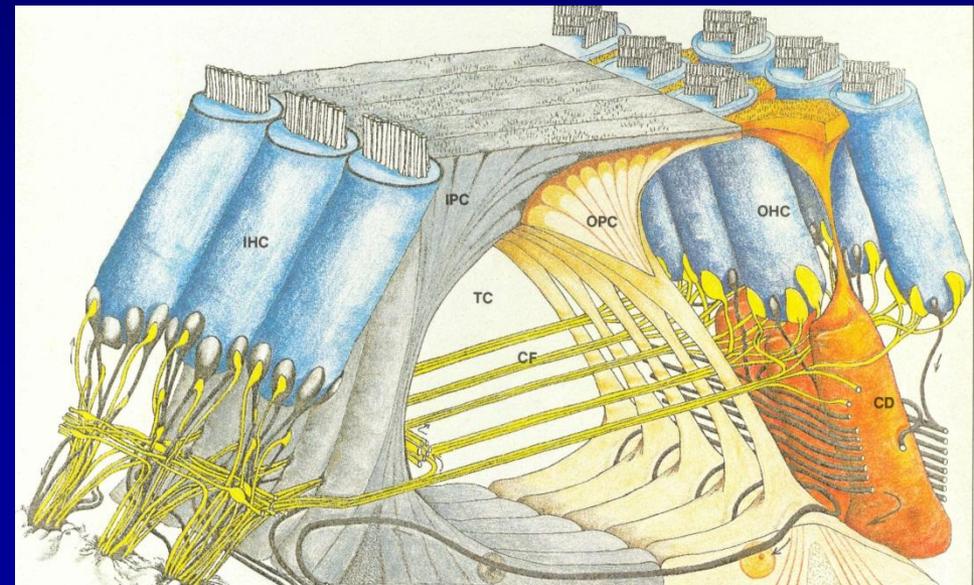
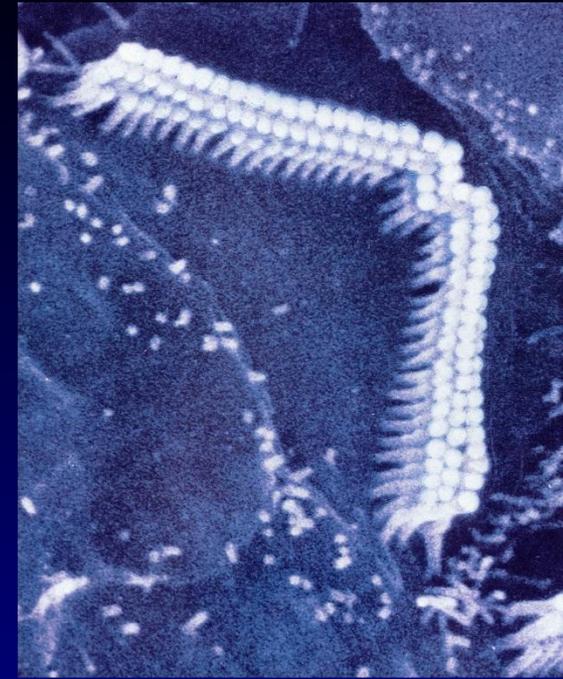
Gerade Linie: Ohne Verstärker (passives Innenohr) verläuft die Kurve linear. Für dieselbe Amplitudenzunahme (y) ist eine geringere Schalldruckpegelzunahme (x_2) erforderlich (Rekrutment).

Der „Vorteil“ des Kranken, eine geringere Intensitätsunterschiedsschwelle zu haben, ist nur scheinbar, da gleichzeitig die Frequenzselektivität verloren geht (Diskriminationsverlust).

Äußere Haarzellen: Führen je nach Schallintensität auch eine Dämpfung der Basilarmembran herbei und gewährleisten so ein optimales Funktionieren der inneren Haarzellen

Cochleäre Schwerhörigkeit: äußere Haarzellen fallen aus

- bei geringen Schallintensitäten entfällt die Schallverstärkung der äußeren Haarzellen, so dass es zu einem Hörverlust kommt
- bei hohen Schallintensitäten entsteht aufgrund des Wegfalls der Dämpfung auf die Basilarmembran eine überproportional starker Zuwachs der Lautheitsempfindung. Die Unbehaglichkeitsschwelle wird vorzeitig erreicht



Rekrutment:

- = Lautheitsausgleich bei seitengetrenten Hörschwellen oberhalb einer bestimmten Lautstärke wird auf dem schwerhörigem Ohr die gleiche Lautheit empfunden wie auf dem normalhörenden Ohr (historisch: es werden Leistungsreserven herangezogen, „rekrutiert“)
- ⇒ Bei einem bestimmten (großen) Lautstärke verhält sich das „kranke“ Ohr wie ein gesundes Ohr
- ⇒ Rekrutment negativ: Lautheitsausgleich kommt nicht zustande

Energieversorgung des Innenohres

Bei Sauerstoffmangel scheinen Haarzellen die Fähigkeit zu besitzen, vom aeroben Stoffwechsel auf den anaeroben umzuschalten, d.h. die Glukose über die Milchsäuregärung abzubauen.

Nach Beschallung im hochfrequenten Bereich ist der Blutfluss in den cochlearen Gefäßen nach 10 bis 20 Minuten bis zu 70% gedrosselt (wahrscheinlich durch sympathische Innervierung der cochleären Blutgefäße).

Lärmschwerhörigkeit: Versorgungsstörung der Cochlea unter starker Dauerlärmbelastung. c5-Senke: Der Hörverlust ist im Bereich der 4 kHz-Frequenz besonders stark ausgeprägt (besonders kritischer Bereich der Basilarmembran).

Tinnitus und Hörsturz: werden oft in Verbindung gebracht mit Durchblutungsstörungen in der Cochlea (Ursache bisher unbekannt). Risikofaktoren: Gefäßverengungen, Nikotinabusus.

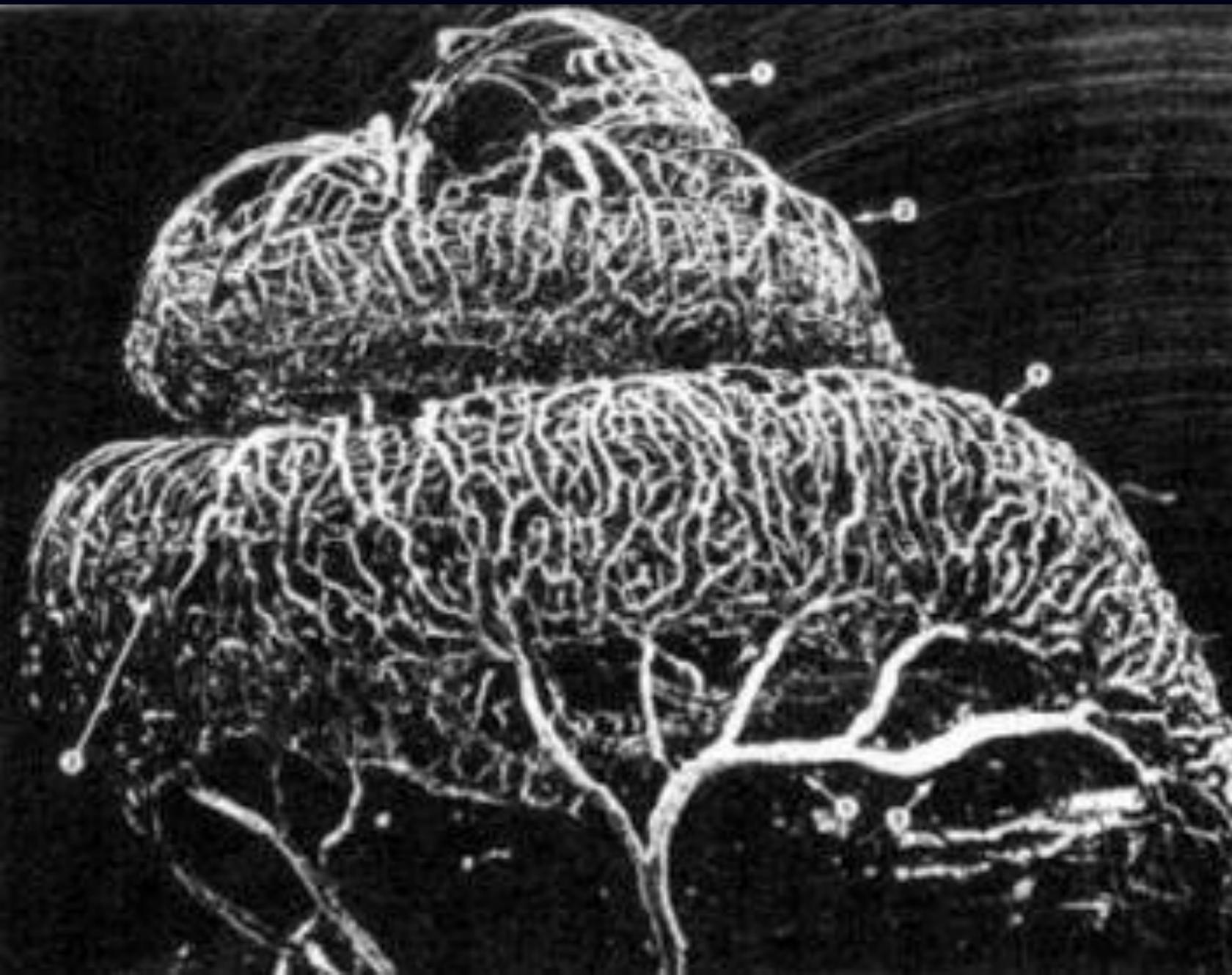
Energieversorgung des Innenohres

Blutversorgung durch die Stria vascularis zusammen mit den Blutgefäßen der Basilarmembran.

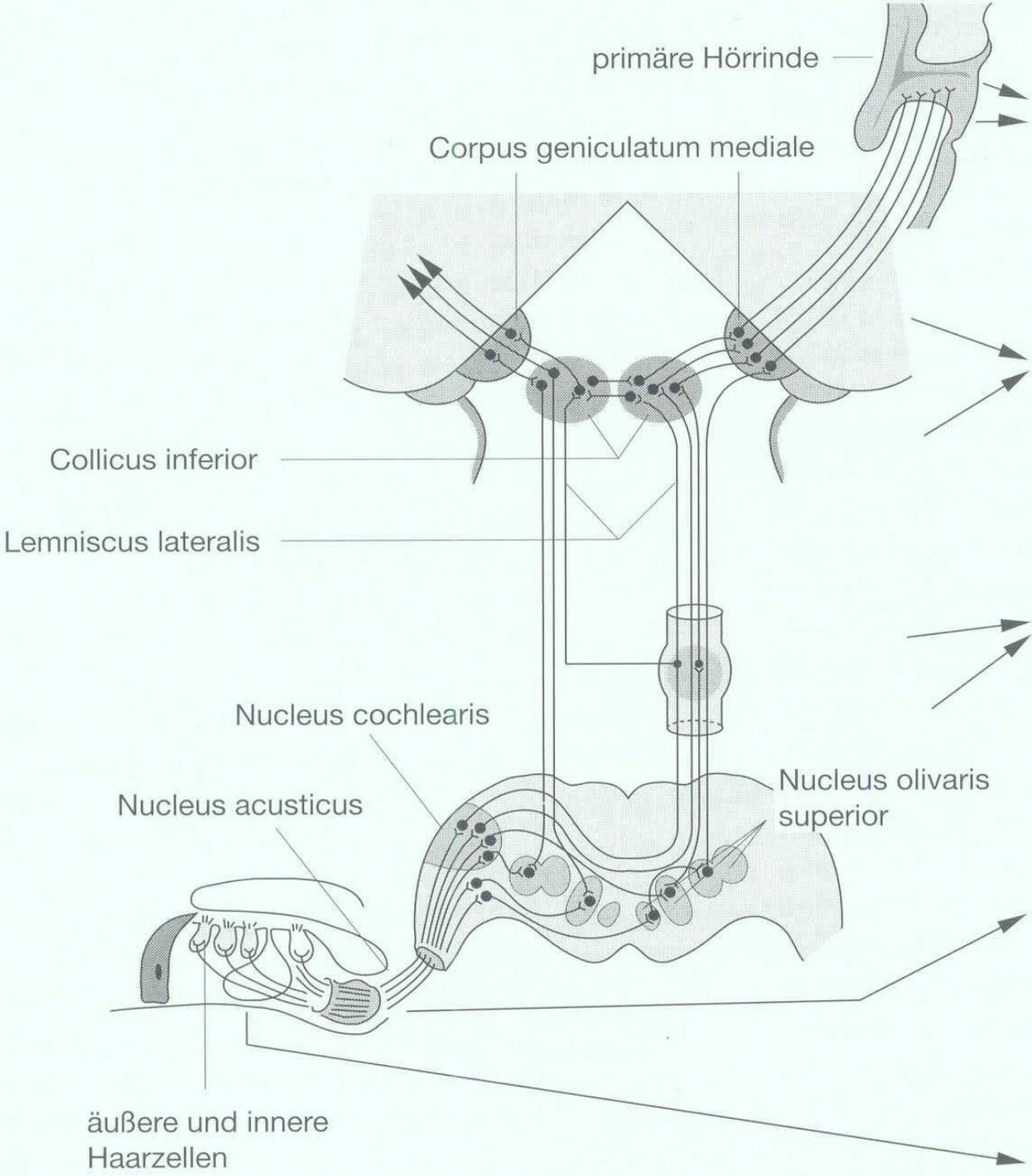
Haarzellen verbrauchen Sauerstoff und Glukose in Abhängigkeit ihrer Beanspruchung. Der Stoffwechsel ist umso größer je mehr Reizfolgestrom durch sie hindurchfließt.

Haarzellen reagieren empfindlich auf Störungen der Mikrozirkulation und auf Veränderungen des pO_2 . Als Folge treten auch Störungen der Produktion und Resorption der Endolymphe auf.

cochleäre Blutgefäße



Hörbahn



Zentrale Hörbahn

retrocochleärer Anteil

cochleärer Anteil

Räumliches Hören

Bedeutung der Ohrmuschel

Die Geometrie der Ohrmuschel bewirkt Reflexionen, Streuung, Beugung, Interferenz und Resonanz. Räumliche Merkmale des Schallfeldes werden in Intensitätsunterschiede und zeitliche Merkmale umkodiert.

Dadurch werden Hörereignisse als außerhalb des Kopfes räumlich wahrgenommen.

Die eigene Stimme hört sich „online“ ganz anders an als off line (Aufzeichnung). Warum?

Binaurales Hören

Richtung: rechts/links

Zur Lokalisation einer Schallquelle nutzt das Ohr interaurale Pegel- (0,6 - 1,5 dB) und Laufzeitdifferenzen (10 - 20 ms). Die Fähigkeit eine Schallquelle zu orten ist deutlich eingeschränkt bei einseitiger Schwerhörigkeit/Taubheit.

Interaurale Pegelunterschiede kann das Gehör jedoch nur nutzen, wenn die Wellenlänge des Schalls im Vergleich zum Kopf klein ist. Nur dann ist der Kopf ein Hindernis für die Schallwelle, ab ca. 2 bis 3 kHz.

Bei tiefen Frequenzen reagiert das binaurale Hörsystem empfindlich auf Zeitdifferenzen, bei hohen Frequenzen dagegen auf Intensitätsdifferenzen.

Winkelauflösung ca. 7°

Raumakustik/ Hören in geschlossenen Räumen:

Schall erreicht das Ohr auf verschiedenen Wegen, direkt oder über Reflexionen durch die Zimmerwände oder andere Gegenstände.

In einem reflexionsarmen Labor, Tonstudio werden kaum Echos wahrgenommen.

Zeitliche Auflösung.

Zwei zeitlich getrennte Schallereignisse werden unterschieden in Abhängigkeit des Struktur:

Klicks: 5 ms

komplexer Schall (Musik, Sprache): bis zu 40 ms

Die räumliche Lokalisation wird bestimmt von dem Schall, der als erster das Ohr erreicht hat (Präzedenzeffekt).

Ohne diese Eigenschaft des Gehörsystems wäre die Ortung von Schallquellen in geschlossenen Räumen kaum möglich.

Tonhöhenempfindung und Periodizitätserkennung

Tonhöhenempfindung hängt nicht nur alleine von der Frequenz, sondern auch vom Schallpegel ab. Tiefe Töne klingen bei hohen Schallpegeln noch tiefer, hohe Töne klingen noch höher, wenn sie laut sind

Bei 1 kHz können Frequenzunterschiede von 3 Promille erkannt werden. Ab 5 kHz verschlechtert sich die ebenmerkliche Frequenzunterschiedsschwelle deutlich

Der Hörnerv nutzt orts- und zeitgebundene Informationen zur Tonhöhenerkennung

Lautstärkeempfinden

Die Lautstärkeempfindung wird durch die Impulsfrequenz und durch die Anzahl der feuernden Nervenfasern kodiert.

Abhängigkeit des Lautstärkeempfindens von der Frequenz

Wenn zwei Töne unterschiedlicher Frequenz erklingen, ist die Gesamtzahl der übermittelten Impulse davon abhängig, ob die Töne in der gleichen oder in verschiedenen Frequenzgruppen liegen.

Abhängigkeit des Lautstärkeempfindens von der Schalldauer

Bis zu einer Schalldauer von 200 ms ist die empfundene Lautstärke abhängig von der Dauer. Erhöht sich die Dauer des Schalls um den Faktor 10, wächst die Lautstärke um 10 dB. Bei Tönen, die länger als 200 ms andauern, ist die Lautstärke nur noch von der Intensität und der Frequenz abhängig.

Frequenzanalyse

Analyse von zwei überlagerten Sinustönen:
Schwebung: Modulationsfrequenz von 4 Hz

Rauhigkeit: Modulationsfrequenz von 15 Hz (Max. 70 Hz)

Unterscheidung von zwei Tönen: 200 - 300 Hz

Kritische Bandbreite: Frequenzabstand innerhalb dessen man die Empfindung der Rauhigkeit hat.

Analyse von nahe beieinanderliegenden Frequenzen:

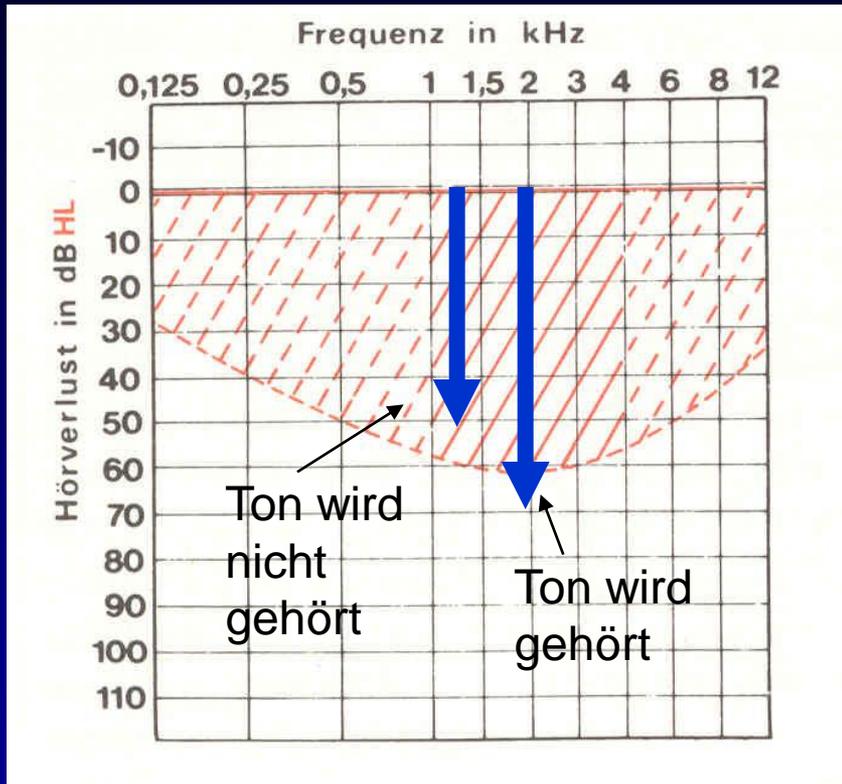
Frequenzgruppe: Ein Sinuston kann durch ein Rauschen maskiert werden, aber nur durch die Frequenzanteile, die in der Nähe des Tones sind (Frequenzgruppe).

Mithörschwelle in Gegenwart von weißem Rauschen (gleichmassig verteilte Frequenzen zwischen 20 Hz und 20 kHz):

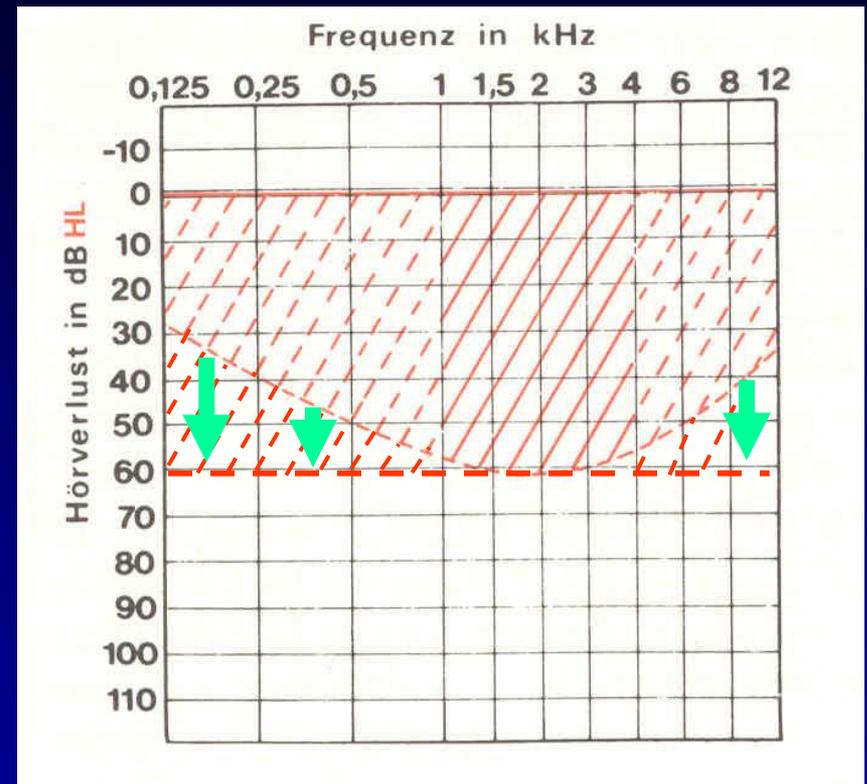
Die Intensität eines Sinustones, der gleichzeitig mit einem Breitbandrauschen dargeboten wird, muss im Vergleich zu der Hörbedingung, in der kein Rauschen dargeboten wird, beträchtlich erhöht werden, damit der Sinuston wahrgenommen wird.

Die Haarzellen, die für den Sinuston zuständig sind, sind durch das Rauschen schon erregt, und der Sinuston bedarf einer höheren Intensität, um den Erregungspegel des Rauschen zu übersteigen.

Relative Hörschwelle



Das **weiße Rauschen** ist im tiefen und hohen Frequenzbereich weniger laut als im Mitteltonbereich



Das **gleichmäßig verdeckende Rauschen** ist in allen Frequenzbereichen gleich laut

Die Mithörschwelle ist bis 500 Hz unabhängig von der Frequenz des Tones, danach nimmt sie mit ansteigender Frequenz in einem konstanten Verhältnis zu mit ca. 10 dB, wenn die Frequenz um den Faktor 10 ansteigt.

Analyse von komplexen Frequenzmustern:
tieffrequente Töne setzen sich in der Empfindung durch (in einem Orchester sind hochfrequente Instrumente, Violinen, häufiger vertreten als tieffrequente, Bassgeigen).

Maskierung: Empfindungsschwelle eines Reizes wird durch die gleichzeitige Darbietung eines zweiten Reizes beeinflusst wird.

