



Psychoakustik

1. Stunde

Referenz:

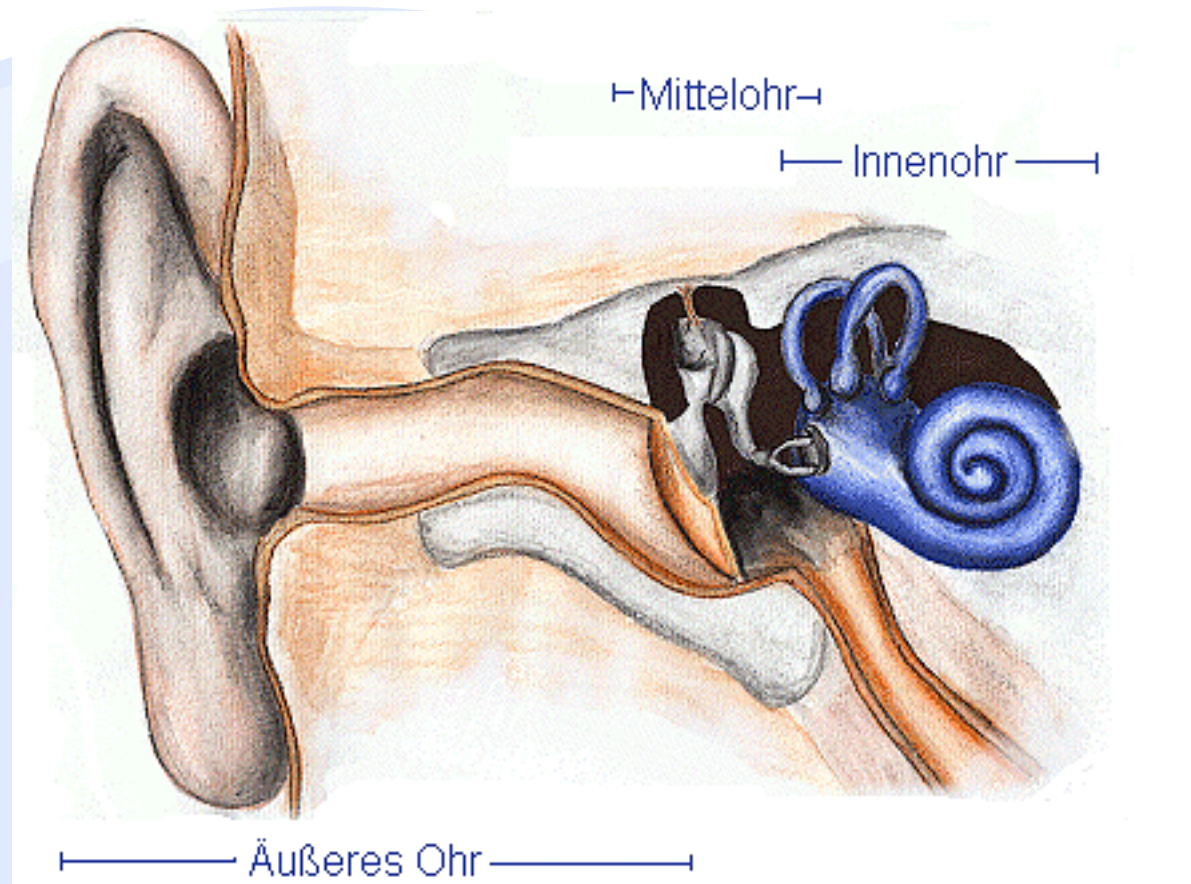
http://web.fbe.uni-wuppertal.de/fbe0014/ars_auditus/

Animation:

<http://www.youtube.com/watch?v=KaFVKdg3NgU&feature=related>



Anatomie des Ohrs



Das **äußere Ohr** besteht aus der Ohrmuschel und dem äußeren Gehörgang. Es erfüllt die Funktion der Schallleitung aus der Umwelt zum Mittelohr. Die Grenze zum Mittelohr ist durch das Trommelfell gegeben, welches von den antransportierten Schallwellen in mechanische Schwingungen versetzt wird. Die Formen von Ohrmuschel und Gehörgang haben wesentlichen Einfluß auf die Übertragungseigenschaften des Gehörs.

Das **Mittelohr** dient der Übertragung der Trommelfellschwingungen an das Innenohr. Es besteht aus dem Trommelfell, den Gehörknöchelchen, die als Hammer, Amboß und Steigbügel bezeichnet werden, der luftgefüllten Paukenhöhle und den Mittelohrmuskeln.

Im **Innenohr**, der Cochlea (Schnecke), findet der eigentliche Hörvorgang statt. Die Cochlea enthält das Transformationsorgan mit den Sinneszellen, welche die durch das Mittelohr übertragenen Schwingungen in Nervenimpulse umwandeln. Diese werden über den Hörnerv an das Gehirn geleitet. Hieran schließt sich der letzte Schritt des Hörvorgangs, die neuronale Verarbeitung, an.



Übertragungsfunktionen des Ohres



Hören besteht funktionell aus den Vorgängen Reizleitung, Reiztransformation und neuronale Verarbeitung. Jeder dieser Vorgänge kann durch ein Übertragungsglied dargestellt und bis auf die neuronale Verarbeitung, durch eine entsprechende Übertragungsfunktion beschrieben werden.

Der Schall, der durch eine Schallquelle in der Umwelt des Menschen erzeugt wird, gelangt an die beiden Trommelfelle. An dieser Stelle wird das Schallereignis durch die beiden **Ohrsignale** beschrieben und die Trommelfelle als physikalischer Eingang des Schallsignals aufgefaßt. Schon an dieser Stelle treten in Abhängigkeit der Frequenz unterschiedliche Ohrsignale auf, die durch die **Freifeldübertragungsfunktion** und die **interaurale Übertragungsfunktion** beschrieben werden.

Die Beschreibung der Reizleitung erfolgt mit Hilfe der Übertragungsfunktionen von

- **äußerem Ohr**
- **Mittelohr** und
- **Innenohr**

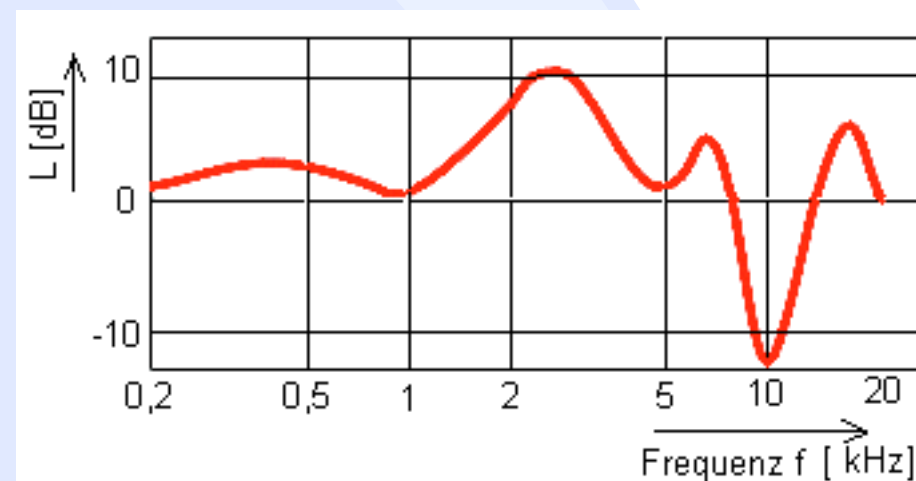
Ein letztes Glied in der Beschreibung des Hörvorgangs für das näherungsweise eine Übertragungsfunktion angegeben werden kann, ist durch die **Übertragungsfunktion der Reiztransformation** gegeben. Dabei ist augenfällig, dass eine direkte Beziehung zwischen der tonotopischen Organisation der Basilarmembran und dem primären Hörkortex gibt.

Außenohr

Die Schallquellen in der Umgebung des Menschen liefern jegliche Art akustischer Information. Die erzeugten Schallsignale werden aber schon auf dem Weg zum äußeren Ohr durch die Reflexions- und Beugungserscheinungen der Schallwellen am menschlichen Körper verändert.

Für eine eindeutige Beschreibung der Hörereignisse wird daher auf die sogenannten Ohrsignale zurück gegriffen. Als Ohrsignale werden die Schalldrucksignale bezeichnet, die direkt vor den Trommelfellen entstehen. Auf diese Weise kann man die Trommelfelle als physikalische Eingänge des Gehörs auffassen, unabhängig davon, auf welche Weise die Ohrsignale von den äußeren Schallquellen erzeugt werden.

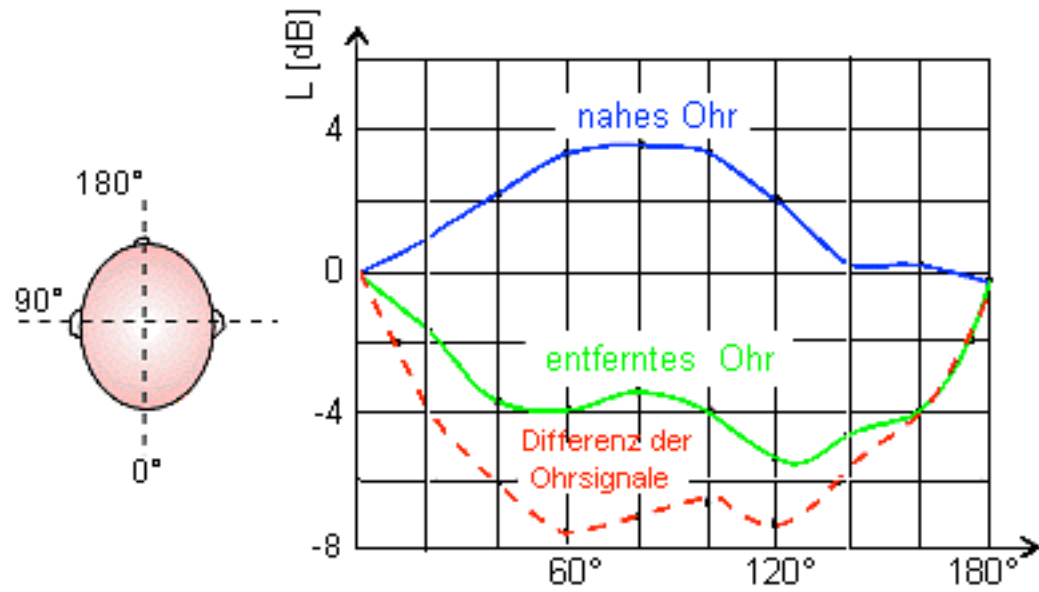
Die Beschreibung der Ohrsignale erfolgt mit der sogenannten **Freifeldübertragungsfunktion**.



Die Ohrsignale, die vor den Trommelfellen auftreten, unterscheiden sich von demjenigen Schallsignal, welches in Abwesenheit der Person vorhanden gewesen wäre. Die Unterschiede werden durch **Beugungs- und Brechungerscheinungen** der Schallwellen am Körper der hörenden Person hervorgerufen. Das Schallfeld, das in Abwesenheit der Person vorhanden ist, wird als **Freifeld** bezeichnet. Seine Charakteristik kann allein durch die geometrische Anordnung und die Art der Schallquellen beschrieben werden. Der Unterschied zwischen dem Freifeldsignal und dem resultierenden Ohrsignal, wird durch die **Freifeldübertragungsfunktion** beschrieben. Diese ist in der nebenstehenden Abbildung für eine frontale Beschallung dargestellt. Die Freifeldübertragungsfunktion ist von der Richtung und Entfernung der Schallquelle und den individuellen anatomischen Abmessungen abhängig.

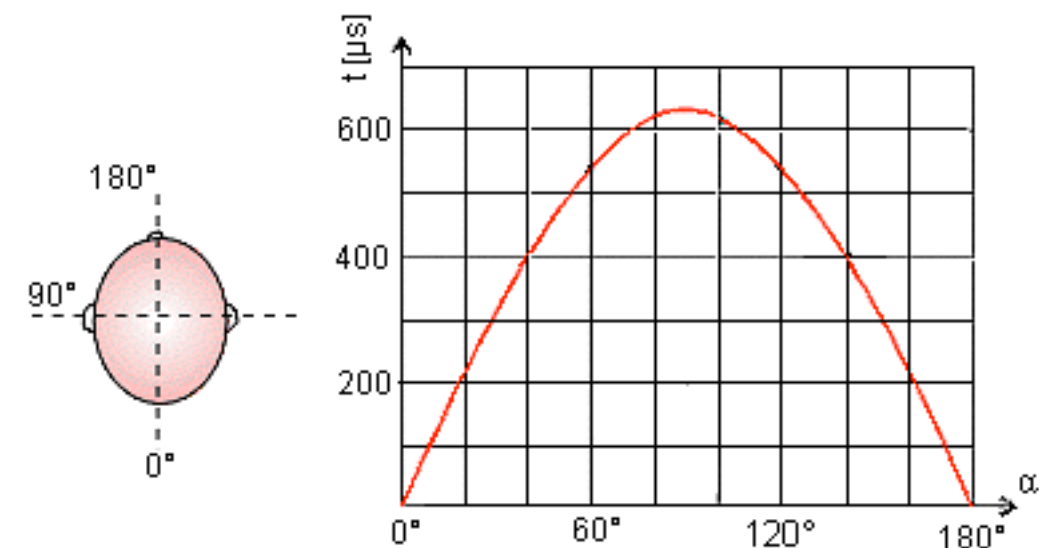


Interaurale Übertragungsfunktionen



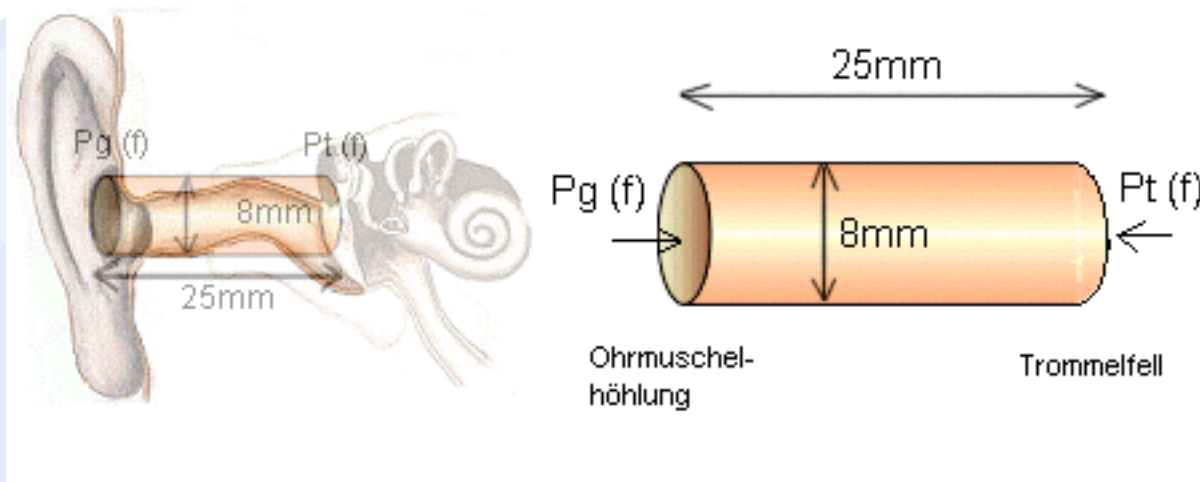
Befindet sich eine Schallquelle genau vor oder hinter der hörenden Person, so liegen an beiden Trommelfellen die gleichen Ohrsignale an. Das ändert sich aber, wenn die Position der Schallquelle nicht mehr frontal vor der Person liegt. In diesem Fall tritt, bedingt durch die unterschiedliche geometrische Lage der Ohren zur Schallquelle sowie durch den Kopf, der hierbei ein "Schallhindernis" darstellt, an den Trommelfellen ein unterschiedliches Ohrsignal auf.

Dieser Unterschied wird durch die sogenannte **interaurale Übertragungsfunktion** beschrieben. Die nebenstehende Grafik beschreibt die interaurale Übertragungsfunktion für den Schalleinfall in Abhängigkeit des Einfallswinkels der Schallwellen. Die dargestellte Funktion gilt für Schallereignisse im Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 2500 Hz. Für höhere Frequenzen verläuft die Funktion zu tieferen Pegeln hin, was auf die **Schallschattenbildung** des Kopfes zurückzuführen ist.



Außer der Abschattung tritt noch ein zweiter interauraler Effekt auf: Die **interaurale Laufzeitdifferenz**. Laufzeitdifferenzen spielen, in Zusammenhang mit der frequenzabhängigen Abschattung des Schalles am Kopf, eine wichtige Rolle im Hinblick auf das räumliche Hören und die Schallquellenlokalisierung. Die Laufzeitverzögerung zwischen den Ohren in Abhängigkeit des Einfallswinkels ist in der nebenstehenden Grafik dargestellt.

Die Übertragungsfunktion des äußeren Gehörgangs



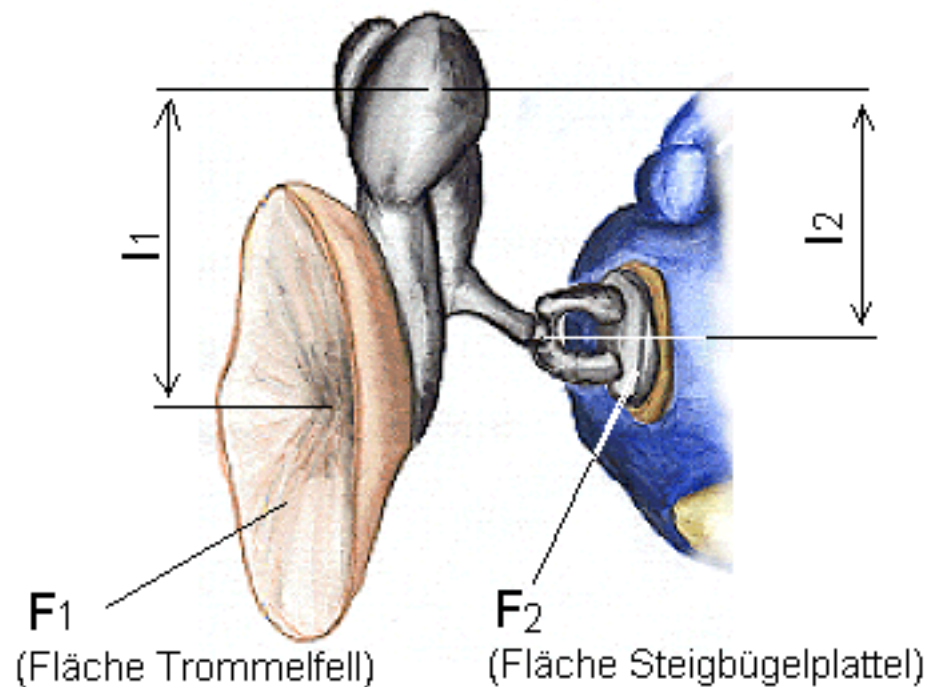
Für eine mathematische Beschreibung kann der äußere Gehörgang in erster Näherung als Rohr mit 25 mm Länge und 8 mm Breite betrachtet werden.

Die Übertragungsfunktion wird durch das Verhältnis des Schalldruckes am Trommelfell $P_t(f)$ zum Schalldruck am Eingang des Gehörgangs $P_g(f)$ beschrieben. Da sowohl der Schalldruck am Trommelfell als auch der Schalldruck am Eingang des Gehörgangs von der Frequenz abhängig sind, ist die daraus gebildete Übertragungsfunktion ebenfalls frequenzabhängig. Der Verlauf der Übertragungsfunktion wird größtenteils durch die Abschlußimpedanz des Gehörgangs (Schallwellenwiderstand), also die Impedanz des Trommelfells beeinflusst.

Die aus diesem Modell hergeleitete Übertragungsfunktion weist ein Maximum bei der Frequenz $f = 3430$ Hz auf. Das Maximum der Übertragungsfunktion an dieser Stelle bedeutet aber auch ein Maximum der Empfindlichkeit des Gehörs. Diese Empfindlichkeitssteigerung läßt sich im **Verlauf der Ruhehörschwelle** wiederfinden. Im Bereich der ermittelten Frequenz (3430 Hz) weist diese eine Absenkung auf. Hier ist also ein geringerer Schallpegel erforderlich um eine Hörempfindung auszulösen. Dies ist gleichbedeutend mit der Aussagen, daß das Gehör in diesem Bereich eine erhöhte Empfindlichkeit besitzt.



l_1, l_2 : Wirksame Länge der Gehörknöchelchen



Impedanzanpassung im Mittelohr

Außenohr und Paukenhöhle sind mit Luft, das Innenohr mit den darin befindlichen Sinneszellen mit Lymphflüssigkeit, einer wasserähnlichen Flüssigkeit gefüllt. Bei der Übertragung der Schwingungen vom Außenohr zum Innenohr findet daher ein Wechsel des schallleitenden Mediums und damit ein Übergang zwischen zwei unterschiedlichen akustischen Impedanzen statt.

Theoretisch würden, aufgrund der unterschiedlichen Schallwellenwiderstände der beiden Medien, an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser etwa 98% der auftreffenden Schallwellen reflektiert und somit für den Hörvorgang verloren gehen.

Zur Vermeidung dieser **Reflexionsverluste** muß im Mittelohr eine Anpassung der Schallwellenwiderstände, eine sogenannte Impedanzanpassung, vorgenommen

werden. Hierzu ist eine Druckerhöhung am ovalen Fenster gegenüber des Druckes am Trommelfell notwendig.

Der Anpassungsvorgang wird hauptsächlich durch

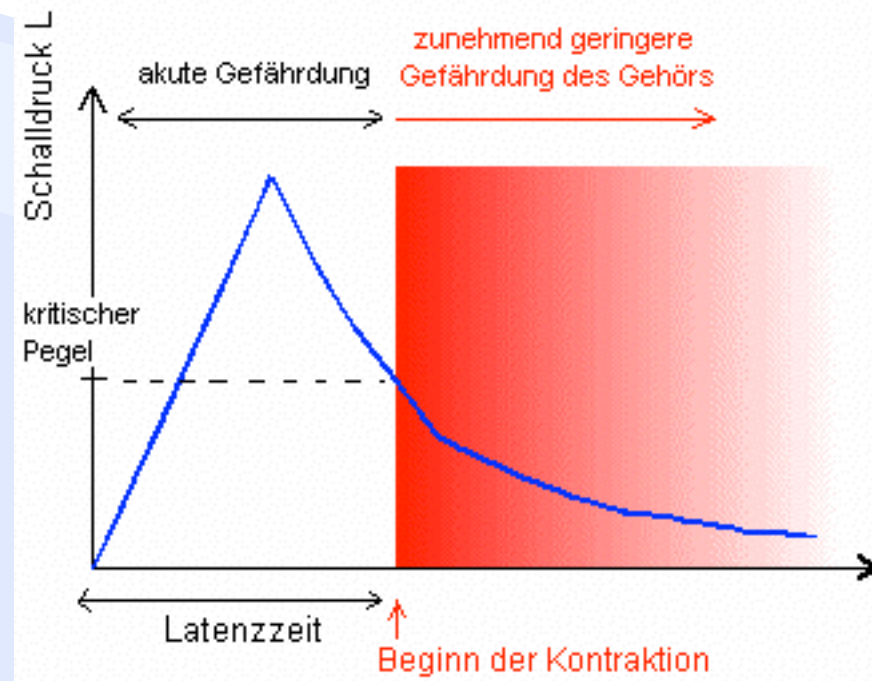
- das **Flächenverhältnis von Trommelfell zu Steigbügelfußplatte** und
- die **Längenverhältnisse der wirksamen Hebel der Gehörknöchelchenkette**

realisiert.

Durch den Prozeß der Impedanzwandlung werden nur etwa 40% anstatt 98% der Schallwellen reflektiert. Dies entspricht einer Absorption von ca. 60% der am Trommelfell eintreffenden Schallwellen.

Der Druck am ovalen Fenster des Innenohres weist durch den Mechanismus der Impedanzanpassung einen etwa 22 mal höheren Wert auf, als der Druck am Trommelfell.

Schutz des Innenohres vor zu lauten Schallen



Überschreitet die aus der Umwelt übertragene Schallenergie einen gewissen Wert, so kommt es zur Kontraktion der Mittelohrmuskeln wodurch das Trommelfell stärker gespannt wird. In Folge wird die Reflexion der Schallwellen am Trommelfell erhöht und die Steigbügelauslenkung eingeschränkt. Durch die verminderte Steigbügelauslenkung und den vermehrt reflektierten Anteil der eintreffenden Schallwellen sind die im Innenohr liegenden Sinneszellen vor einer Beschädigung durch zu hohe Schalldruckamplituden geschützt.

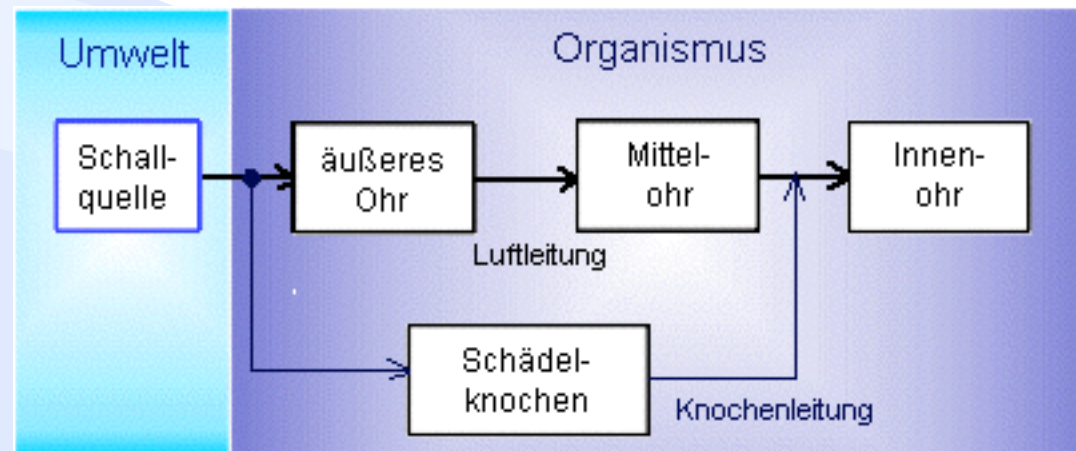
Beide Muskeln benötigen allerdings eine gewisse Ansprechzeit (Latenzzeit) bis sie kontrahieren. Diese Zeit ist von der Schallintensität abhängig und beträgt ca. 35 ms bei hohen und bis zu 150 ms bei niedrigen Schallpegeln. Die Mittelohrmuskeln erfüllen aus diesem Grund nur einen unzureichenden Schutz des Innenohres vor plötzlich auftretenden lauten Schallereignissen, z.B. Knallen.

Dies ist darin begründet, daß der Anstieg des Schalldruckpegels eines Schallereignisses in einem kürzeren Zeitraum als Ansprechzeit der Mittelohrmuskeln erfolgt. Das Schallereignis erreicht in diesem Fall mit einem die Sinneszellen gefährdenden hohen Pegel das Innenohr, bevor die Mittelohrmuskeln kontrahieren.

Schon ein plötzlich auftretendes Schallereignis genügend hoher Lautstärke kann zur irreparablen Schädigung der Sinneszellen im Innenohr führen.

In diesem Zusammenhang spricht man von einem **Schall- oder Knalltrauma**. Solche Schalle entstehen z.B. beim Zünden eines Feuerwerkskörpers oder bei einem Gewehrschuss.

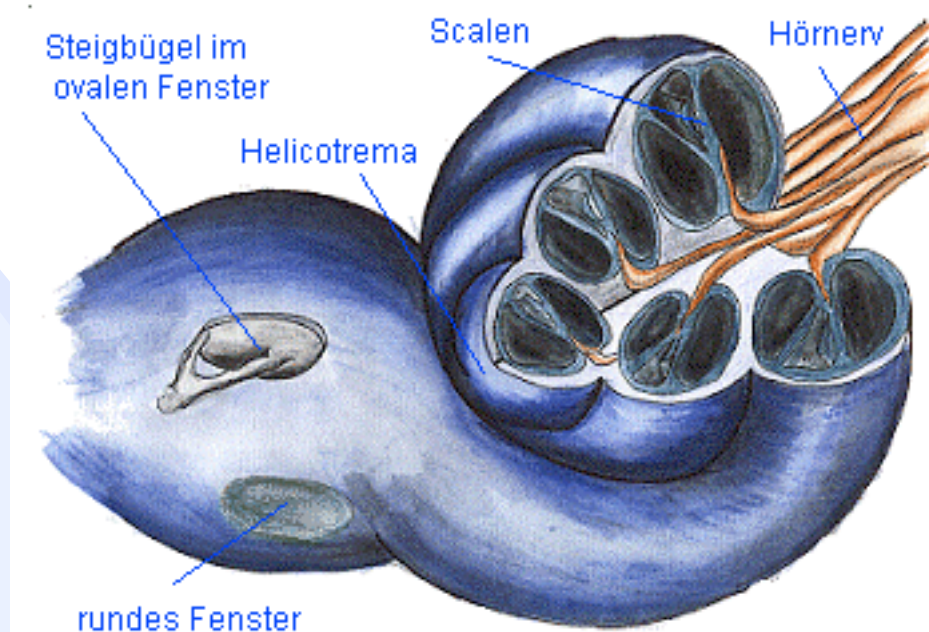
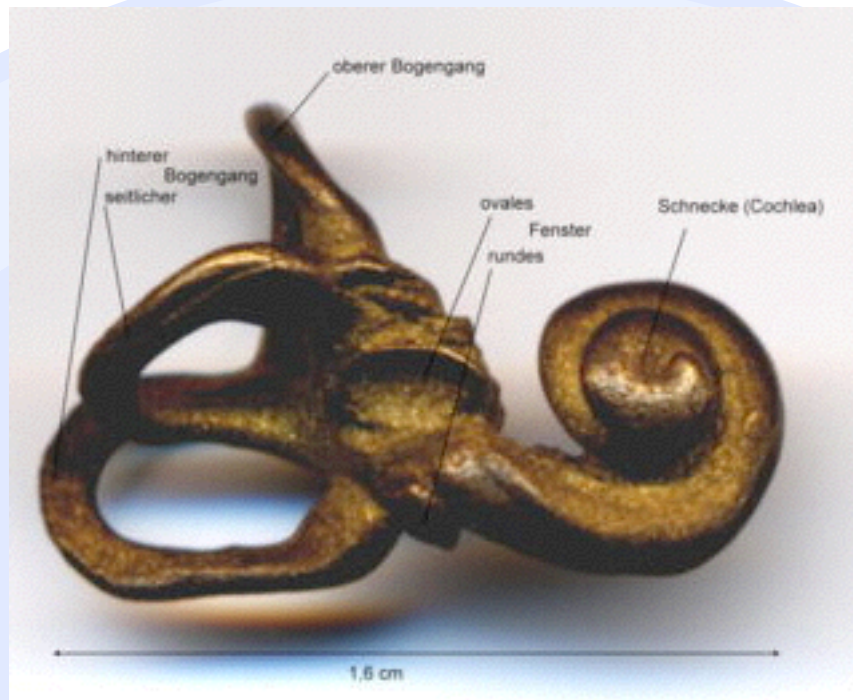
Beethovens Trauma



Der bisher beschriebene Weg des Schalltransports über Außen- und Mittelohr zum Innenohr wird als Luftleitung bezeichnet. Zusätzlich zur Luftleitung tritt aber noch ein zweiter Mechanismus der Schalleitung, die sogenannte **Knochenleitung**, auf. In gleicher Weise wie das Trommelfell, wird auch der Schädelknochen durch die aus der Umwelt auftreffenden Schallwellen zu mechanischen Schwingungen angeregt. Diese Schwingungen des Schädelknochens werden als Knochenschall bezeichnet und übertragen sich direkt auf das Innenohr. Der Weg durch äußeres Ohr und Mittelohr wird hierbei umgangen. Für die Hörempfindung im täglichen Leben spielt die Knochenleitung, außer zum Hören der eigenen Stimme, kaum eine Rolle. Dies liegt daran, daß der Anteil des Knochenschalls für alle Frequenzen ungefähr 50 dB unter dem Luftschallanteil liegt. Die Wirkung der Knochenleitung auf das Hören der eigenen Stimme ist jedem bekannt, der einmal eine Tonbandaufnahme seiner Stimme gehört hat. Die eigene Stimme erscheint auf der Aufnahme völlig fremd, während andere Personen nichts ungewöhnliches feststellen können.



Innenohr



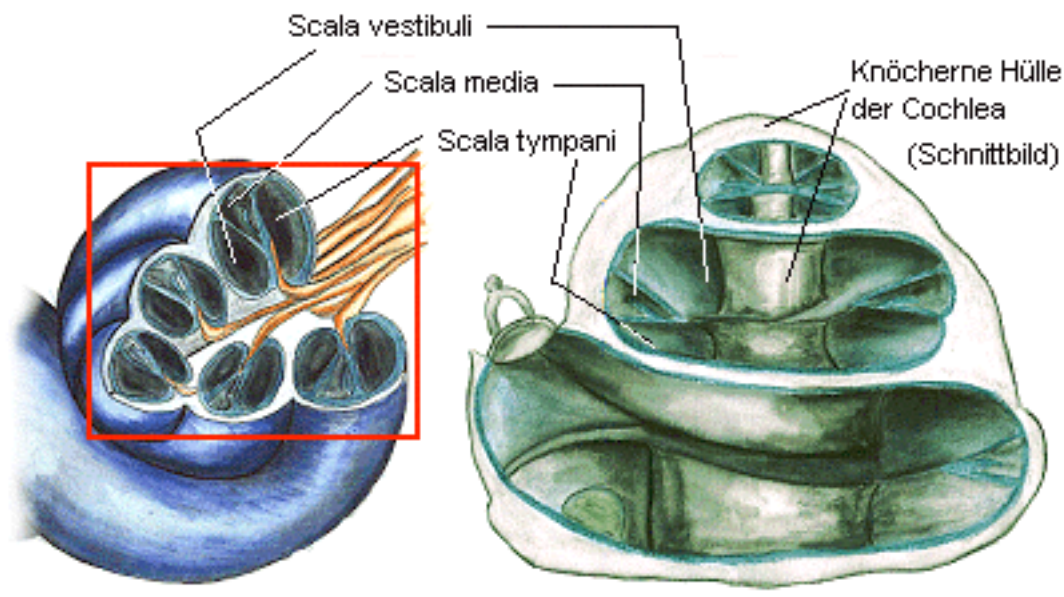
Das Innenohr enthält das Gleichgewichtsorgan und das eigentliche Hörorgan, das wegen seiner Form auch **Schnecke (Cochlea)** genannt wird. Beide Organe zusammen werden als Labyrinth bezeichnet. Das Gleichgewichtsorgan steht zwar mit der Schnecke in Verbindung, spielt aber für den Hörprozeß keine Rolle, so dass es hier nicht weiter betrachtet wird.

Im Innenohr findet der eigentliche Hörprozeß statt, hierfür muß es die Aufgaben der

- **Reizverteilung an die Sinneszellen (Wanderwellentheorie)** und die
 - **Reiztransformation**,
- die Umwandlung der mechanischen Schwingungen in Nervenimpulse, erfüllen.



Cochlea



Die Schnecke besteht aus einer knöchernen Hülle, die drei übereinander liegende spiralig aufgewickelte konische Röhren enthält. Diese Röhren sind mit der sogenannten Perilymphe, einer Lymphflüssigkeit gefüllt und werden als Scala vestibuli, Scala media und Scala tympani bezeichnet.

Zur besseren Darstellung wird die Schnecke im abgerollten Zustand dargestellt. Die Schneckenbasis, an der sich rundes und ovales Fenster befinden, wird als basales, der Ort des Helicotremas als apicales Ende bezeichnet.

Im abgerollten Zustand ist die Schnecke ca. 30 mm lang und verjüngt sich während ihres Verlaufs von 0,9 mm auf 0,3 mm im Durchmesser.

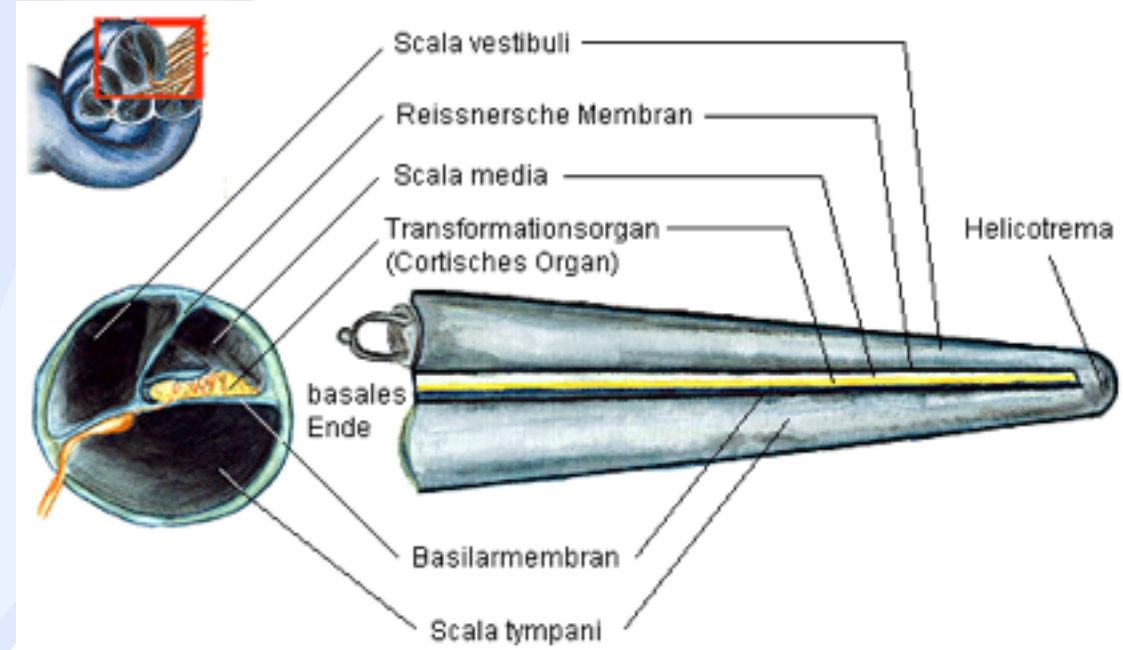
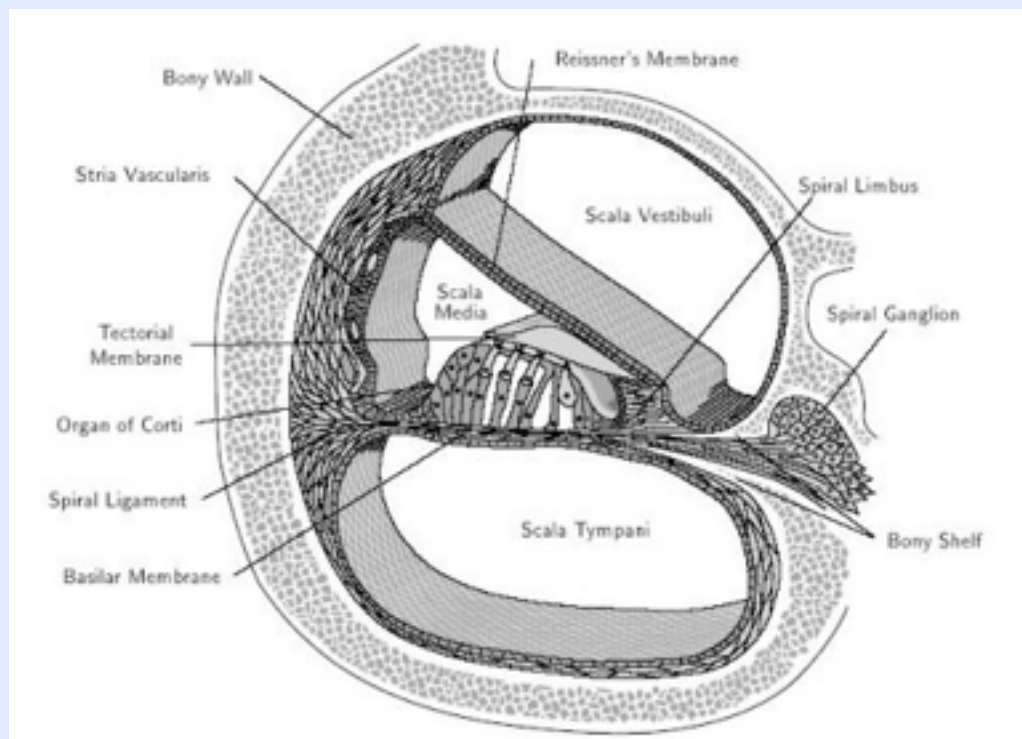
Scala vestibuli und Scala media sind durch die Reissnersche Membran, Scala media und Scala tympani durch die Basilarmembran getrennt.

Auf der Basilarmembran befindet sich das **Transformationsorgan (Cortisches Organ)**. Hier findet der eigentliche Hörprozeß, die Umwandlung mechanischer Schwingungen in Nervenimpulse, statt.

Die Basilarmembran verändert ihre mechanischen Eigenschaften während ihres Verlaufs vom basalen zum apicalen Ende.

Auf diesem Weg nimmt die Steifigkeit ab. Gleichzeitig verbreitert sich die Basilarmembran von 1/6 mm auf 1/2 mm.

Die Änderung der mechanischen Eigenschaften ist eine wichtige Voraussetzung für die dem Schallereignis entsprechende **Reizverteilung an die Sinneszellen**.





Wanderwellentheorie

Durch die Bewegungen des Steigbügels im ovalen Fenster wird in der Schnecke eine **Flüssigkeitsverschiebung, bzw. eine Druckänderung** hervorgerufen.

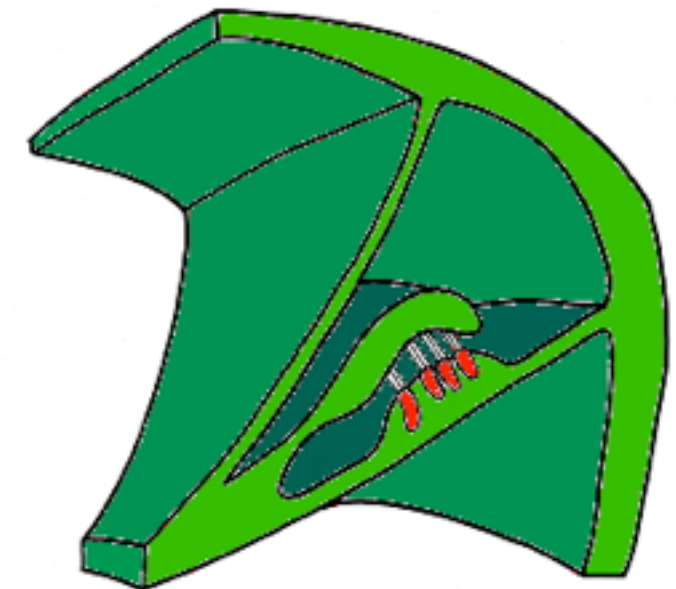
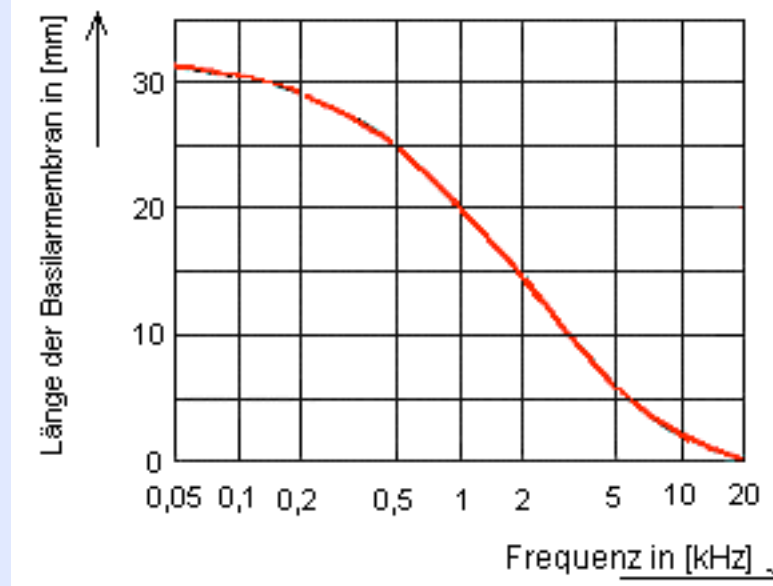
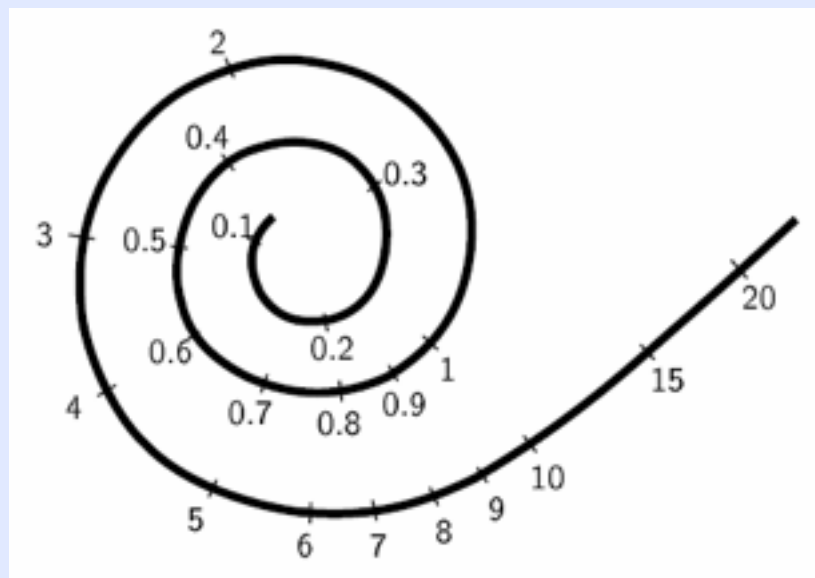
Hierdurch wird die Basilarmembran in Schwingungen versetzt. Aufgrund dieser Schwingungen bilden sich auf der Basilarmembran **Wanderwellen** aus, die sich vom ovalen Fenster zum Helicotrema fortpflanzen und an einer frequenzabhängigen Stelle ihr Amplitudenmaximum ausbilden. Töne hoher Frequenz in der Nähe des ovalen Fensters, Töne niedriger Frequenz in der Nähe des Helicotremas abgebildet. In der nebenstehenden Grafik ist die Zuordnung zwischen der anregenden Frequenz und dem Ort der maximalen Auslenkung dargestellt.

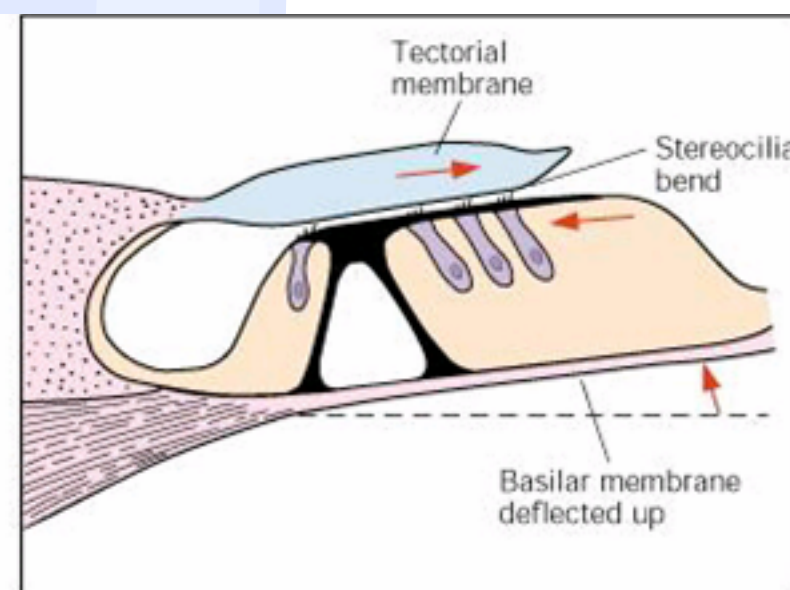
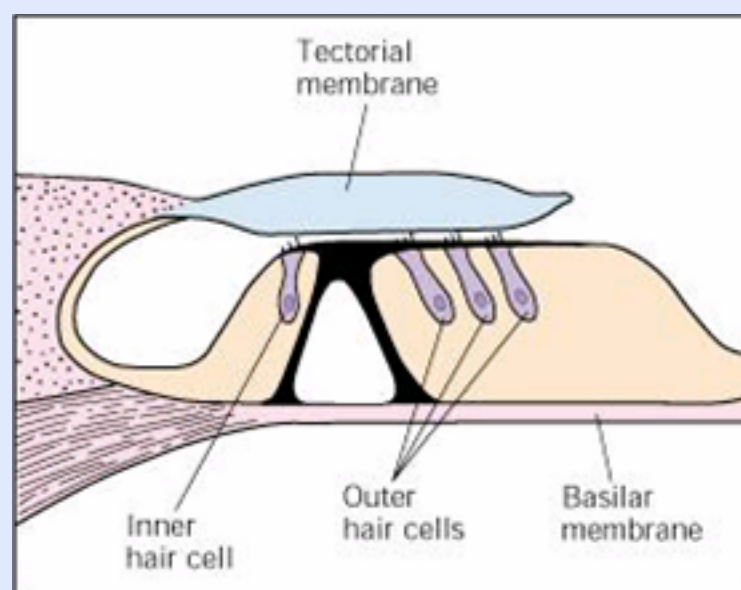
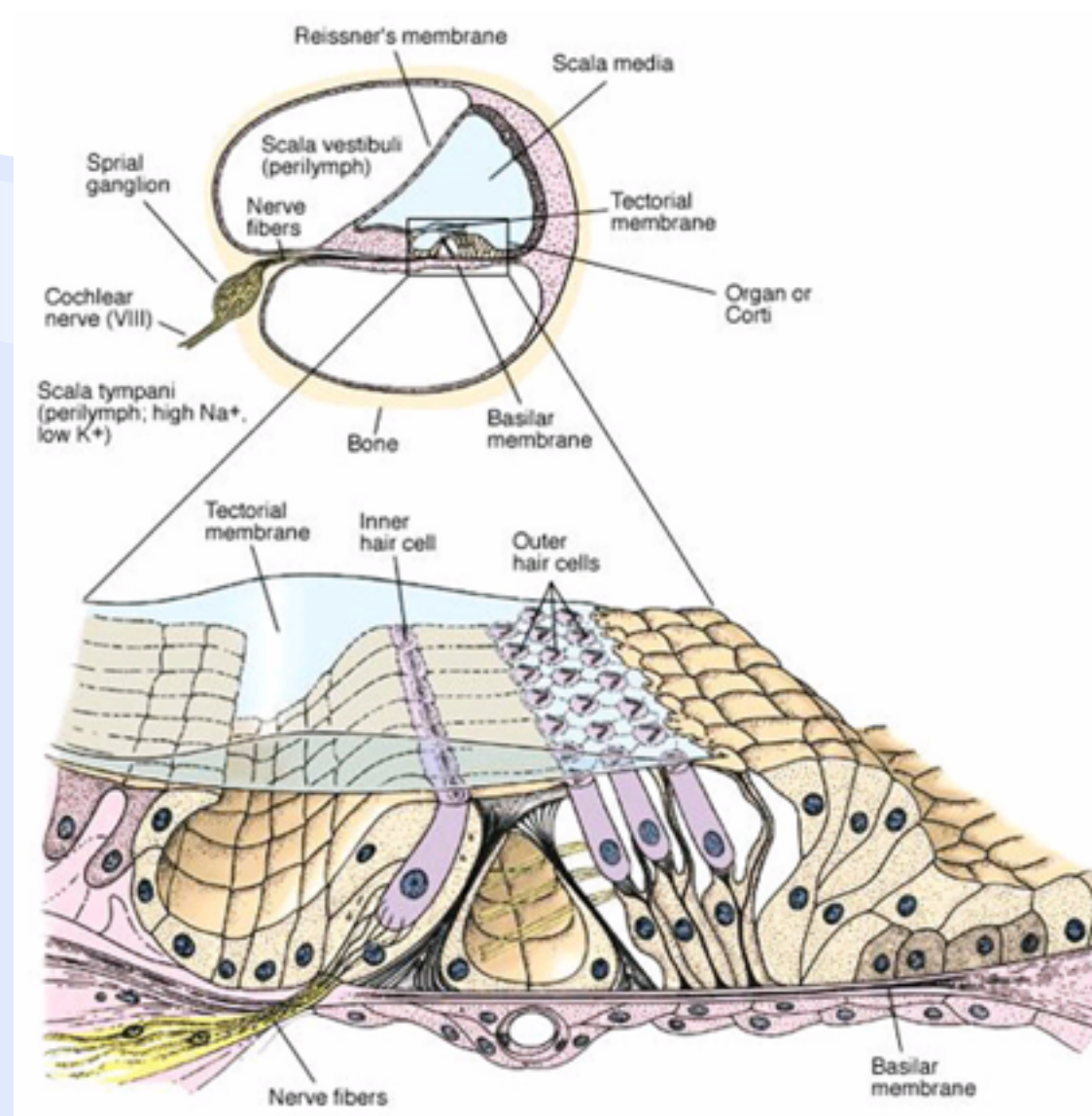
An der Stelle der Amplitudenmaxima kommt es zur Relativbewegung zwischen der Basilarmembran und der Tektorialmembran. Dies führt zu einer tangentialen Abscherung der Haarzellen. Die Haarzellen reagieren darauf mit der Freisetzung von Nervenimpulsen, die über die Fasern des Hörnerven zu den neuronalen Verarbeitungsstufen im Gehirn geleitet werden.

Dieser Vorgang kann durch eine **Animation** verdeutlicht werden..

Da der Ort des Amplitudenmaximums auf der Basilarmembran abhängig von der Frequenz des Schallereignisses ist, wird auf die hier beschriebene Weise jede Frequenz eindeutig auf eine bestimmte Stelle der Basilarmembran abgebildet.

Die sich auf der Basilarmembran ausbildende Wanderwelle ist das letzte Ereignis des Hörvorgangs, bei dem sich der aus der Umwelt aufgenommene Schall noch als mechanische Schwingung nachweisen lässt. Nach der Transformation beginnt die komplizierte neuronale Verarbeitung, deren Arbeitsweise bis heute noch nicht in allen Einzelheiten geklärt ist.







Neuronale Verarbeitung

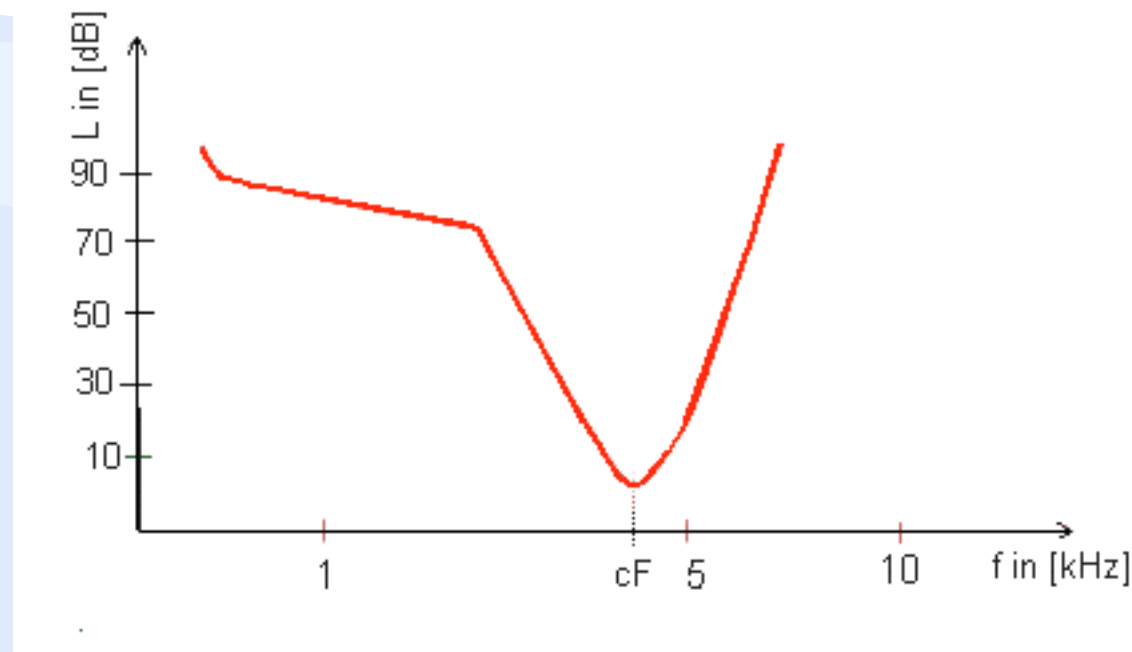
Nachdem das Schallereignis den Weg des Schalltransportes durch Außen- und Mittelohr sowie die Transformation in elektrische Nervenimpulse im Innenohr durchlaufen hat, schließt sich nun der letzte und komplizierteste Teil des Hörvorgangs an, die neuronale Verarbeitung.

Alle Informationen, die auditiv verarbeitet werden, werden durch den Hörnerv übertragen. In gleicher Weise, wie ein akustischer Reiz vollständig durch seine physikalischen Eigenschaften beschrieben werden kann, kann man ihn theoretisch auch durch die Angabe aller Aktivitäten des Hörnerven beschreiben.

Die Sinneszellen der Basilarmembran liefern an das Nervensystem Muster neuronaler Erregungen. In diesen Mustern sind die physikalischen Eigenschaften des Schallsignals decodiert. Diese werden nun durch das Nervensystem aufgearbeitet, damit sie dem Menschen als Wahrnehmung bewußt und auf ihren Informationsgehalt hin analysiert werden können.



Übertragungsfunktionen der Reiztransformation



Leitet man die Aktionspotentiale, also die Nervenimpulse der einzelnen Nervenfasern ab, die die inneren Haarzellen kontaktieren, so zeigt sich, daß die Anzahl der pro Zeiteinheit auftretenden Impulse stark von der Frequenz des anregenden Tones abhängig ist. Jede Faser des Hörnerven, die eine innere Haarzelle auf der Basilarmembran kontaktiert, weist eine sogenannte Bestfrequenz (charakteristische Frequenz **cF**) auf. Die charakteristische Frequenz ist die Frequenz, bei welcher ein Sinuston eine maximale Impulsfolgefrequenz bei minimaler Amplitude hervorruft.

Zeichnet man die Schwellenkurve einer Nervenfaser in Abhängigkeit des Schalldruckpegels auf, so erhält man die sogenannte Tuning-Kurve der Nervenfaser.

Die Nervenfasern sind hochgradig frequenzselektiv. Wird das Ohr mit einer Frequenz beschallt, die von der charakteristischen Frequenz abweicht, so läßt sich die Faser entweder überhaupt nicht oder nur unter Verwendung eines höheren Schallpegels aktivieren wenn die anregende Frequenz hinreichend nahe an der charakteristischen Frequenz liegt.

Zeichnet man die Reaktion der Einzelfasern auf ein komplexes Schallereignis, als Tuning-Kurven auf, so erhält man eine Darstellung der Spektralanalyse des Schallsignals. Die Cochlea ist demnach ein Frequenzanalysator.

Zwischen Steigbügel und jedem Punkt auf der Basilarmembran existiert eine Übertragungsfunktion mit Bandpaßcharakter, so daß man jeden Punkt der Basilarmembran durch die **Durchlaßfrequenz** des zugehörigen **Bandpasses** charakterisieren kann.

Eine geschlossene Beschreibung dieser Vorgänge ist allerdings nicht möglich.



Das Nervensystem

Physiologisch bezeichnet man als Nervensystem den von Rückenmark und Gehirn gebildeten Komplex. Das Nervensystem dient dem Empfang, der Organisation und der Auswertung von Nachrichten aus der Umwelt. Aufgrund der aus diesen Nachrichten gewonnenen Informationen steuert es in einem komplexen Prozeß die Wahrnehmung, Lernprozesse, Bewegungsabläufe und das Handeln des Organismus. Technisch gesehen, kann man das Nervensystem daher als eine informationsverarbeitende Maschine auffassen, die innerhalb eines Bruchteils einer Sekunde Zehntausende Signale von den Sinnesorganen empfängt und Tausende von Signalen an das Gehirn sendet. Die Verarbeitung der Signale erfolgt durch ein kompliziertes System neuronaler Schaltkreise, die durch die Verknüpfung der Nervenzellen (Neurone) gebildet werden. Eine Nervenzelle ist hierbei nur ein Bestandteil einer Kombination von über 10 Milliarden Nervenzellen im menschlichen Gehirn, die durch sehr **komplexe, größtenteils dynamische Strukturen** untereinander verbunden sind.

Das Neuron stellt die funktionelle und strukturelle Einheit des Nervensystems dar. Neurone sind spezialisierte Körperzellen, welche die besondere Eigenschaft besitzen, Nervenimpulse (neuronale Erregungen) leiten zu können. Sie dienen somit der Nachrichtenübermittlung und der Nachrichtenverarbeitung im Organismus. Aus diesen Aufgaben geht hervor, daß die Nervenzelle in der Lage sein muß Nachricht, also neuronale Erregungen, von anderen Nervenzellen zu empfangen, als auch zu diesen weiterzuleiten. Zu diesem Zweck ist die Nervenzelle mit zwei Arten von Ausläufern, den Dendriten und dem Axon versehen. Das Axon erfüllt die Leitungsfunktion der Erregung zwischen den Nervenzellen, die Dendriten und das Soma stellen die Empfänger der Nervenzelle dar. Die Übertragung der Nachricht zwischen den Nervenzellen wird durch die Synapsen erfüllt.

Die fundamentale neuronale Ausgangsbotschaft ist durch den einzelnen neuronalen Impuls gegeben. Diese Nervenimpulse sind elektrische Spannungsimpulse und werden als Aktionspotentiale (AP) bezeichnet.

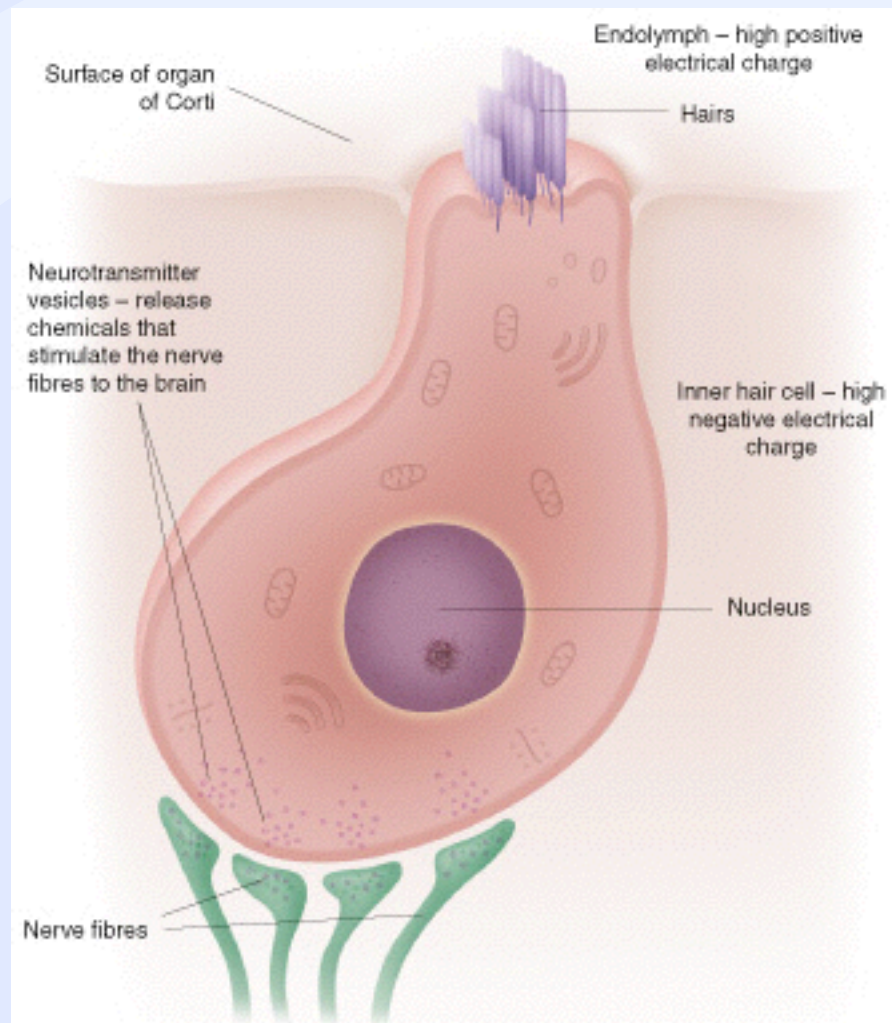
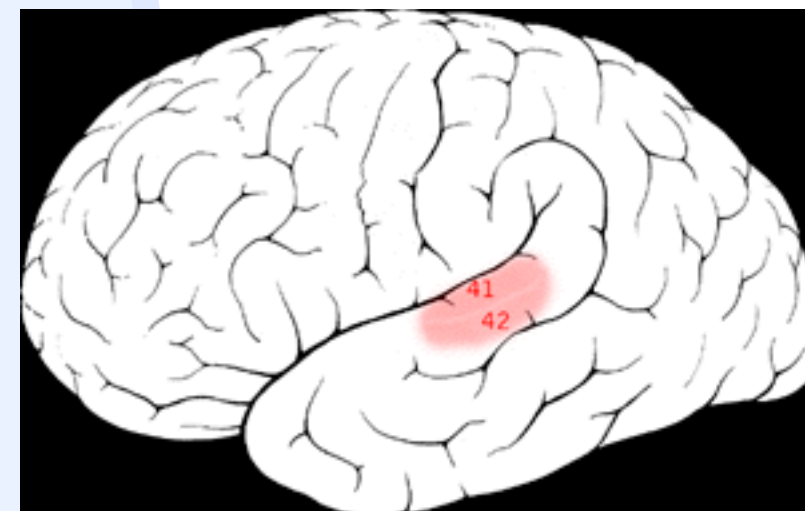
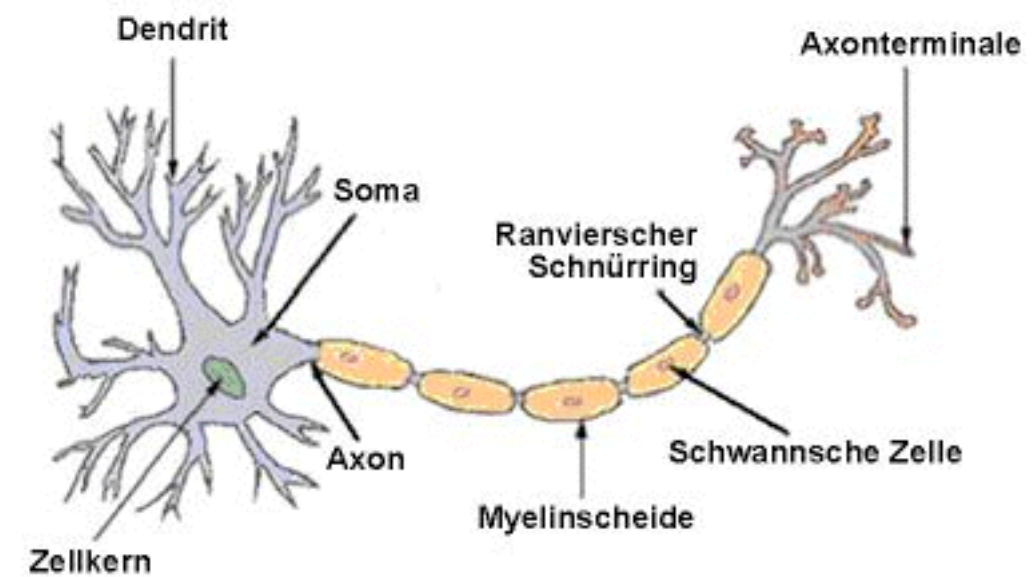
Das Signal eines Neurons, also das einzelne AP hat jedoch noch keinerlei Bedeutung. Erst das komplexe Signal, das sich durch die Aussendung neuronaler Impulse eines ganzen Faserbündels ergibt, kann zu einer sinnvollen Wahrnehmung verarbeitet werden. Eine neuronale Botschaft ist durch die Häufigkeit oder die zeitliche Verteilung bestimmt, mit der die einzelnen Impulse freigesetzt werden.

Die Entscheidung, ob ein Neuron aufgrund der ankommenden Informationen ein AP freisetzt oder nicht, wird durch einen **Integrationsprozeß** entschieden.

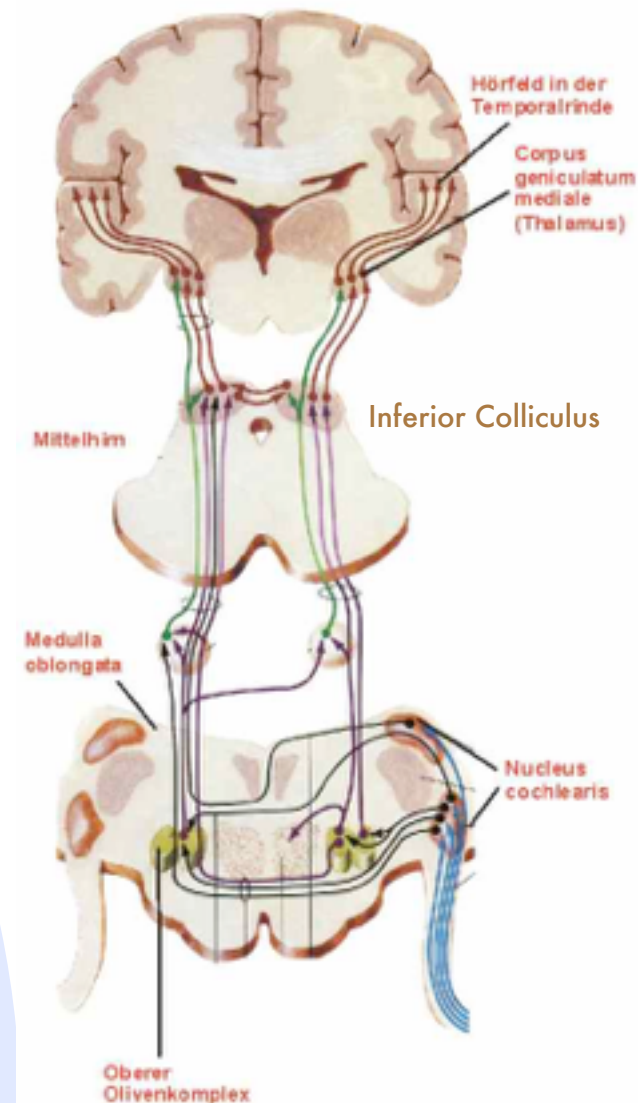
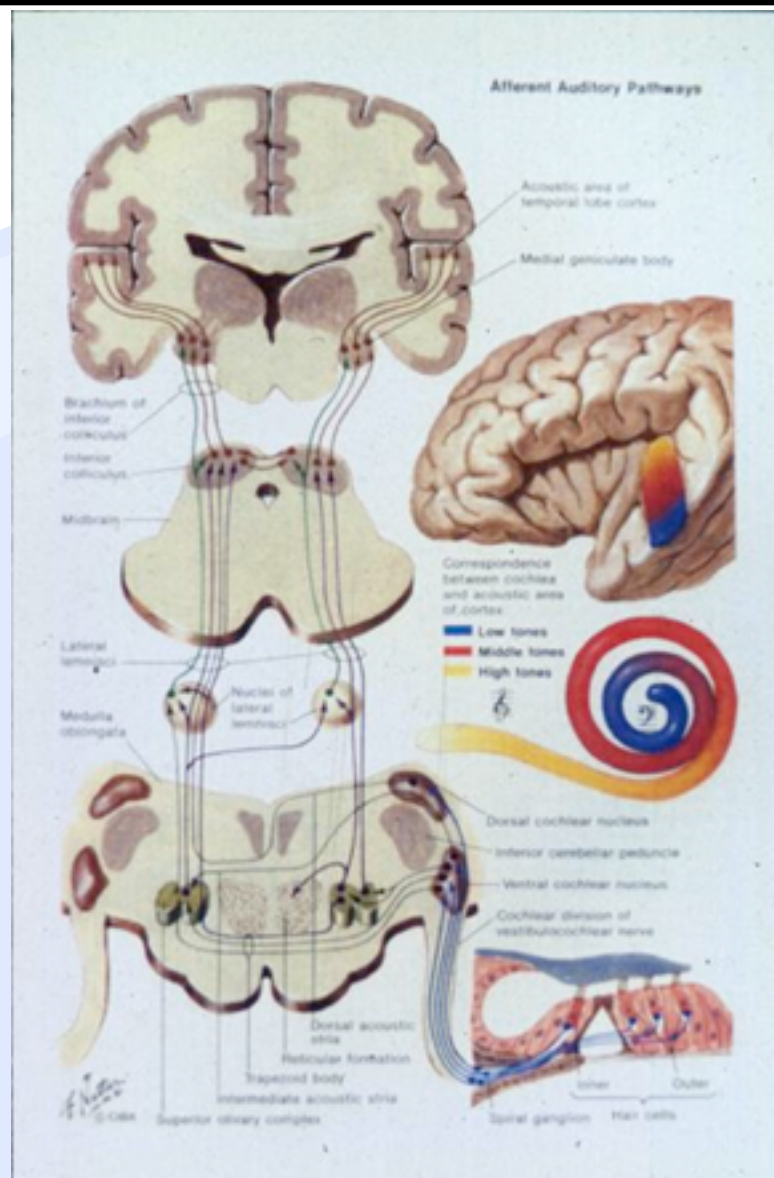


Abbildungen und Links

Typische Struktur eines Neurons



http://en.wikipedia.org/wiki/Action_potential



Aus den Spiralganglien in der Cochlea laufen die sensorischen Fasern zunächst zum Nucleus cochlearis im Stammhirn. Hier wird die akustische Information schon bearbeitet. Ein Beispiel: Laterale Inhibition. Wird eine innere Haarzelle von einem relativ lauten Ton aktiviert, können auch benachbarte Zellen (die eigentlich höhere und tiefere Frequenzen kodieren) mitaktiviert werden. Im Nucleus cochlearis kann die Weitergabe des Signals dieser mitaktivierten Zellen unterdrückt werden. Dadurch wird die Frequenztrennung verbessert.

In der nächsten Station, im oberen Olivenkomplex, laufen Informationen aus beiden Innenohren zusammen. Hier werden Laufzeitunterschiede zwischen den Fasern aus beiden Ohren ausgewertet, um die Richtung einer Schallquelle zu orten.

Nach der Passage durch das Mittelhirn, wo unter anderem das Richtungshören im Colliculus inferior verbessert wird, erreicht die Hörinformation den Thalamus (Corpus geniculatum mediale), von wo die Hörrinde (primärer und sekundärer auditorischer Kortex) und damit das Bewußtsein erreicht wird.