

Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Hören

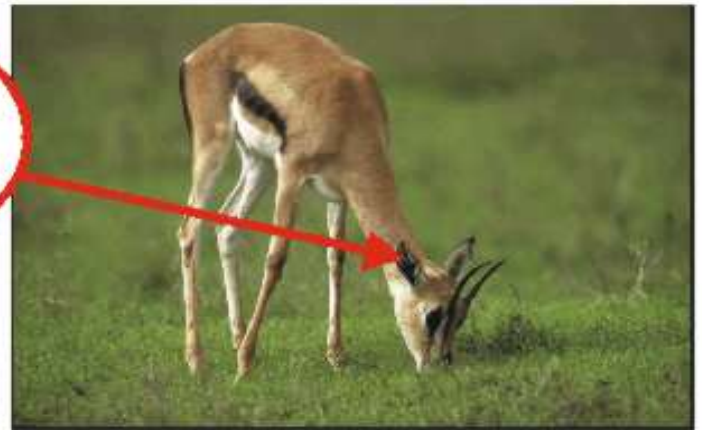
I. Schallanalyse im Innenohr

II. Zentrale Verarbeitung akustischer Signale

Themen:

- [Was das Gehör leisten muss](#)
- [Die Evolution der Cochlea](#)
- [Aufbau der Cochlea](#)
- [Saiteninstrumente und Resonanz](#)
- [Die Stimmung der Basilarmembran](#)
- [Resonanz in der Cochlea](#)
- [Tonotopie und Frequenztrennung](#)
- [Äußere Haarzellen als Servomotoren](#)
- [Innere Haarzellen: die Sensoren](#)
- [Zusammenfassung 1](#)

Was das Gehör leisten muss



10^{-5} N/m^2
 10^{-17} W

Hohe Empfindlichkeit
Richtungshören

Der hohe evolutionäre Druck auf die Optimierung der Hörleistung hat das Gehör in vieler Hinsicht zu einem Hochleistungsorgan werden lassen. Die **Empfindlichkeit** ist so groß, daß unvorstellbar geringe Energiemengen (in Form von Schalldruck) ausreichen, um eine Wahrnehmung auszulösen.

Dazu kommt die Fähigkeit, die Schallquelle auch ohne Hilfe anderer Sinne zu orten. **Richtungshören** ist bei allen Säugern gut entwickelt und ermöglicht es dem Beutetier, in die sichere Richtung zu flüchten.

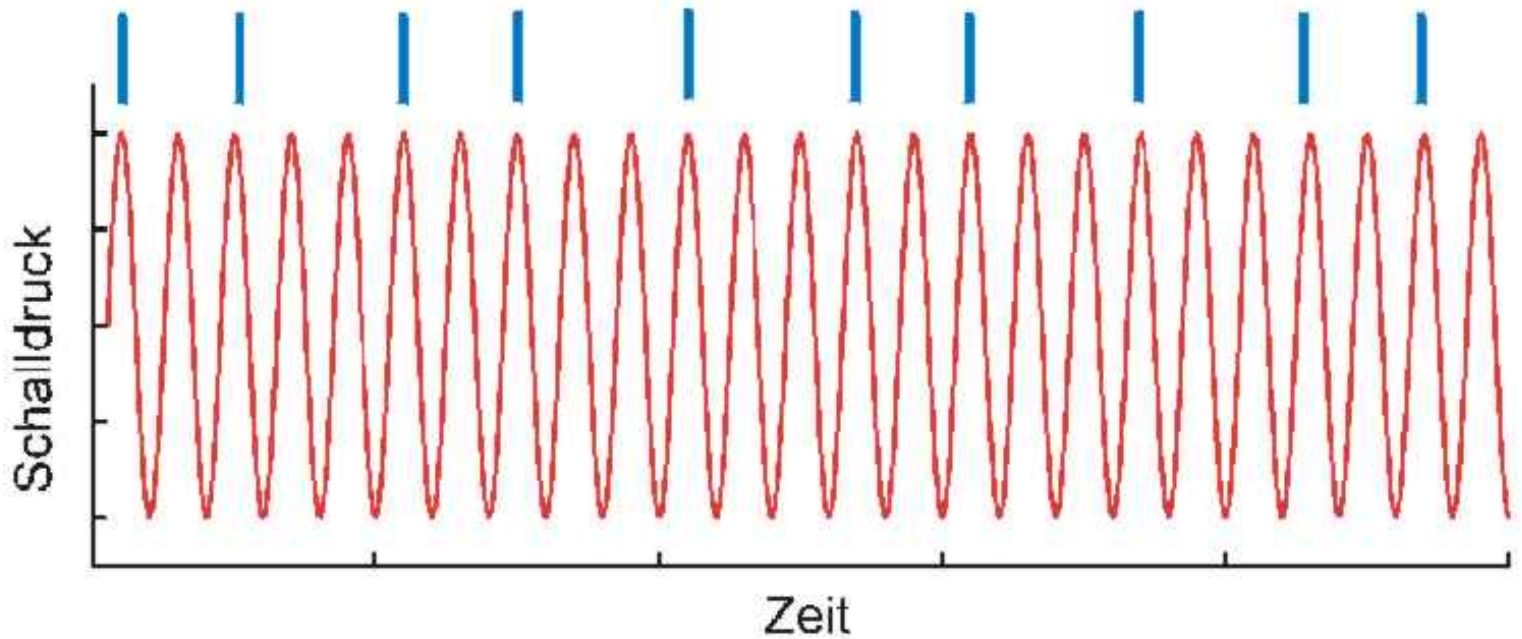
Für die Analyse komplexer Geräusche (Sprache, Tierstimmen, etc) wird die Fähigkeit benötigt, Töne einzelner Frequenzen unterscheiden zu können. **Frequenzanalyse** ist daher eine wichtige Leistung des Hörens.

Einige Hörbereiche (grob geschätzt):

- Fische: 10 - 3000 Hz

- Vögel: 1000 - 10.000 Hz
- Mensch: 20 - 16.000 Hz
- Hund: 20 - 35.000 Hz
- Maus, Fledermaus: 1000 - 100.000 Hz
- Wale, Delphine: 10 - 100.000 Hz

Schließlich gibt es noch das Problem, daß hochfrequente Signale im Nervensystem verarbeitet werden müssen, das nur bis zu einer Frequenz von etw 500 Hz funktioniert. Aktionspotentiale sind durch eine Refraktärzeit von ca 2 ms voneinander getrennt, so daß nur 500 APs pro Sekunde gefeuert werden müssen. Schallverarbeitung kann also nicht so funktionieren, daß zB bei jedem Maximum des Schalldrucks ein Aktionspotential ausgelöst wird. Mit dieser Methode könnte zB ein Ton mit einer Frequenz von 1000 Hz nicht im Nervensystem kodiert werden. Die Lösung für dieses Problem ist die **Tonotopie**, die Umwandlung der Frequenzinformation in räumliche Information.



Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Hören

I. Schallanalyse im Innenohr

II. Zentrale Verarbeitung akustischer Signale

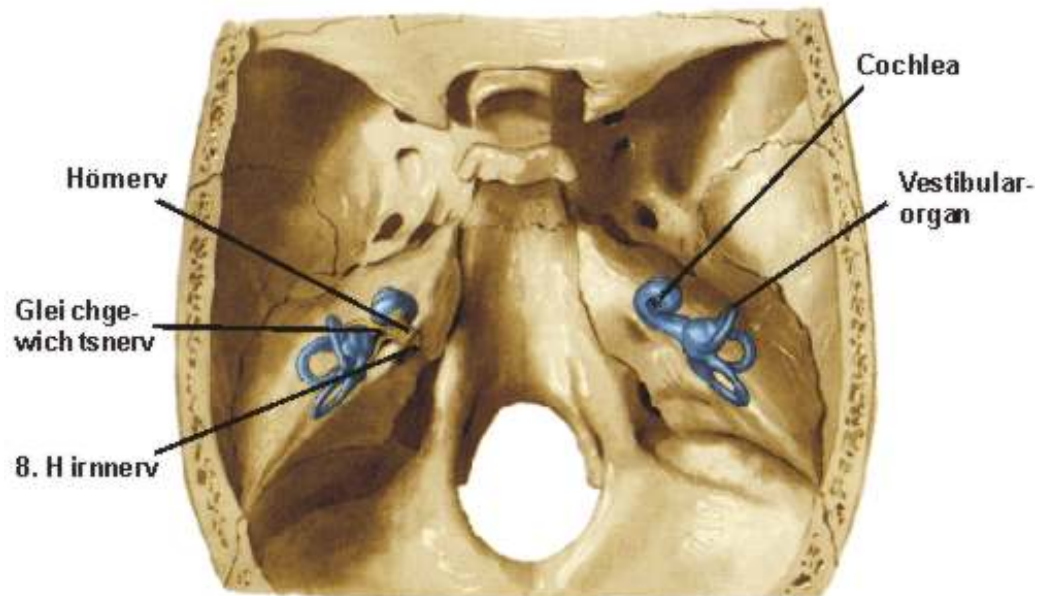
Themen:

- [Vom Innenohr zum Hörnerv](#)
- [Die Hörbahnen im Gehirn](#)
- [Obere Olive: Richtungshören](#)
- [Lage der Hörrinde](#)
- [Komplexität der Hörrinde](#)
- [Zusammenfassung 2](#)

Vom Innenohr zum Hörnerv

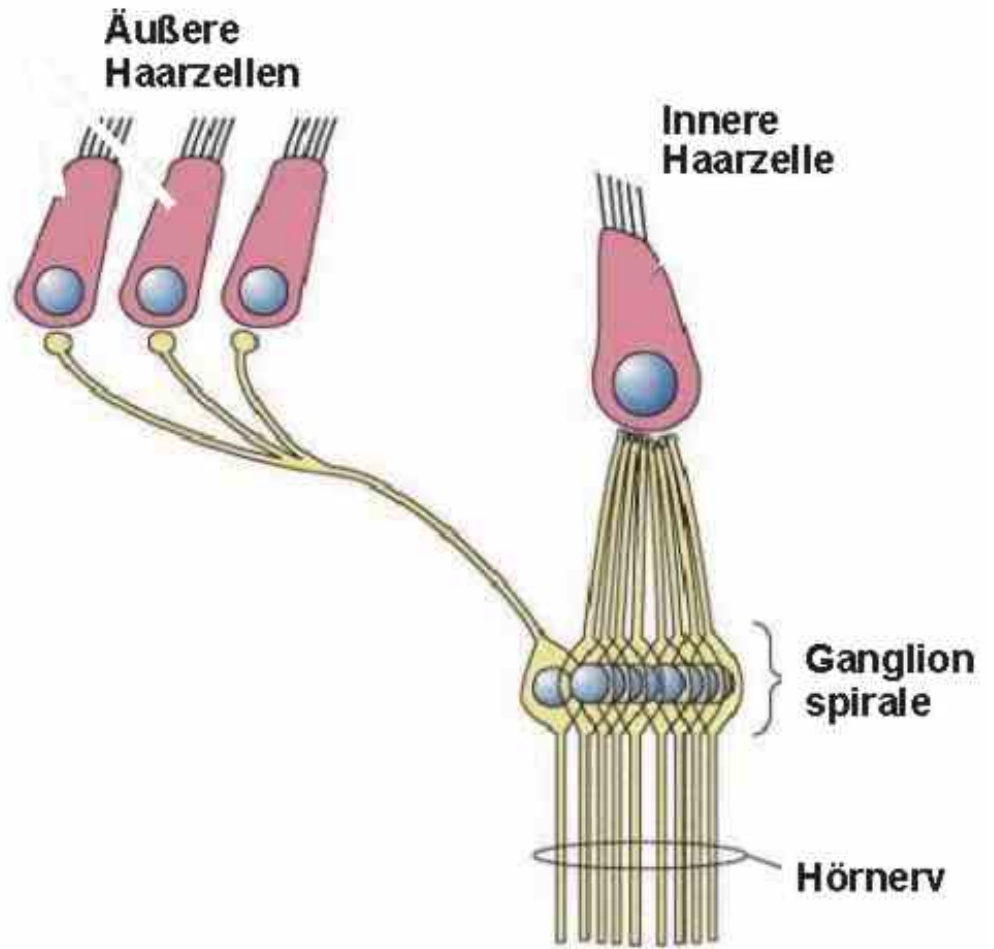
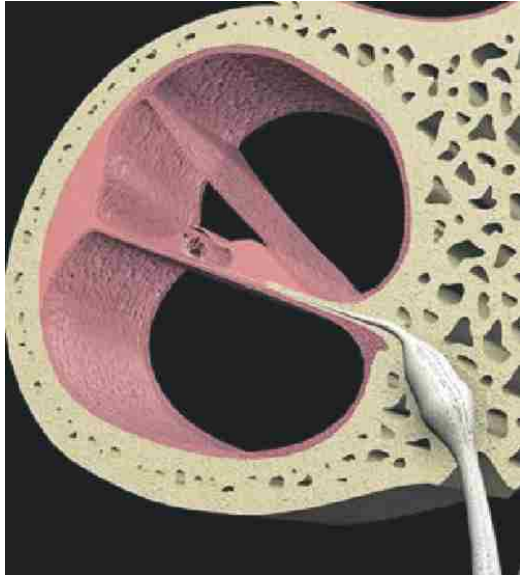
Das Bild rechts zeigt die Lage der beiden Innenohren im Schädel. Blick von oben in den geöffneten Schädel. Die Innenohren sind zur Veranschaulichung blau gefärbt und auf das darunterliegende Felsenbein aufgezeichnet. In Wirklichkeit sind sie in das Felsenbein eingebettet.

Aus: Weitz, B. (1998) Atlas der Anatomie, Weltbild Verlag



Jede innere Haarzelle wird von etwa 20 afferenten Neuronen innerviert, deren Zellkörper in den Spiralganglien liegen. Unten links sieht man die Lage eines Spiralganglions (weiß) in der Wand der Cochlea. Die Neurone werden im Hörnerv gebündelt und ziehen zum Stammhirn, wo sie im Nucleus cochlearis ihre Synapsen bilden. Äußere Haarzellen haben nur wenig afferente Innervation, dafür aber mehrere efferente Fasern, über die sie vom Gehirn gesteuert werden können.

Infolge dieser komplementären Innervation kommen weit über 90% aller afferenten (sensorischen) Fasern von den inneren Haarzellen. Die vielfache Innervation dieser Zellen weist darauf hin, daß ihr Signal über verschiedene Kanäle zu unterschiedlichen Verarbeitungszentren im Gehirn geleitet wird.



Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Hören

I. Schallanalyse im Innenohr

II. Zentrale Verarbeitung akustischer Signale

Themen:

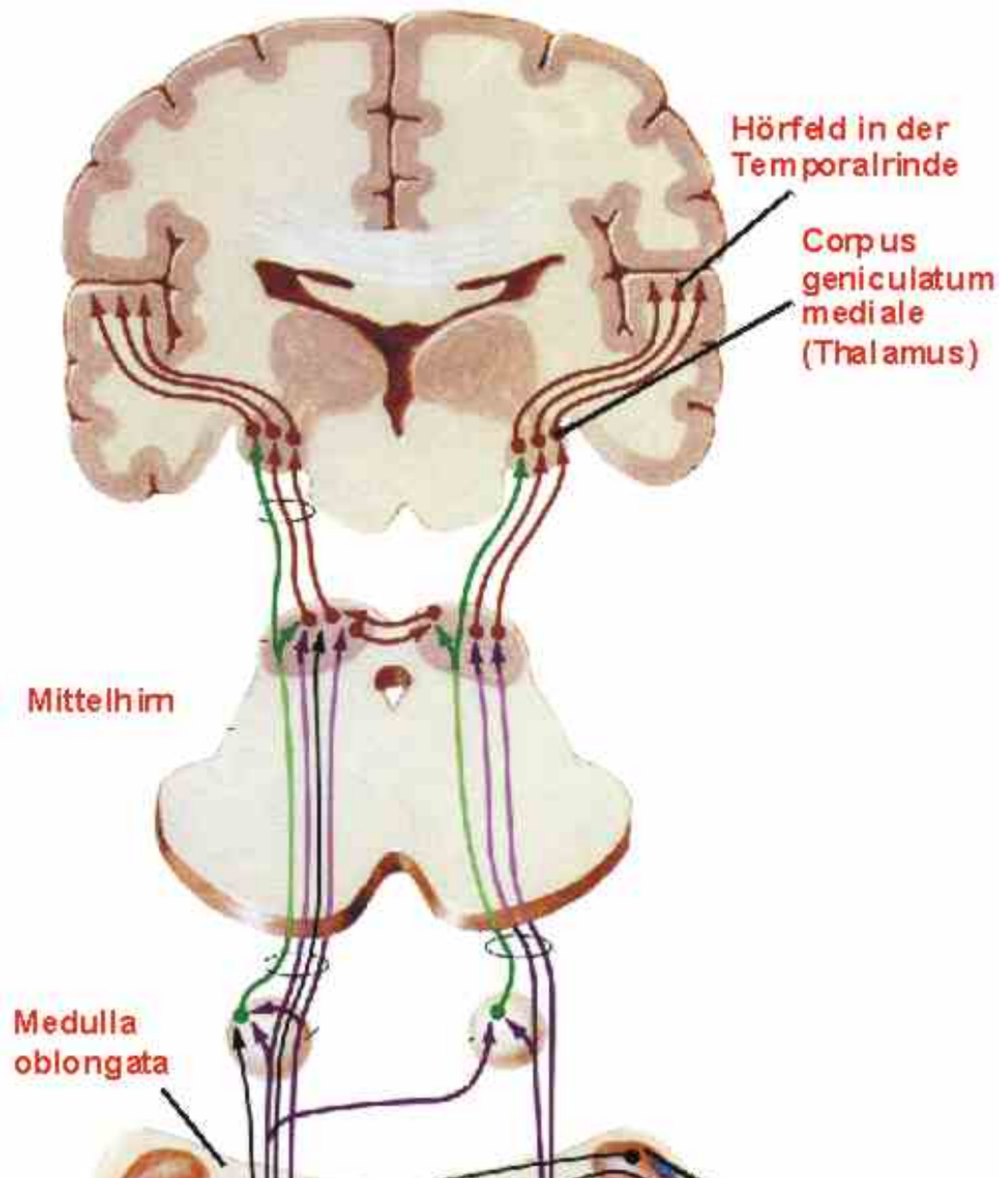
- [Vom Innenohr zum Hörnerv](#)
- [Die Hörbahnen im Gehirn](#)
- [Obere Olive: Richtungshören](#)
- [Lage der Hörrinde](#)
- [Komplexität der Hörrinde](#)
- [Zusammenfassung 2](#)

Die Hörbahnen im Gehirn

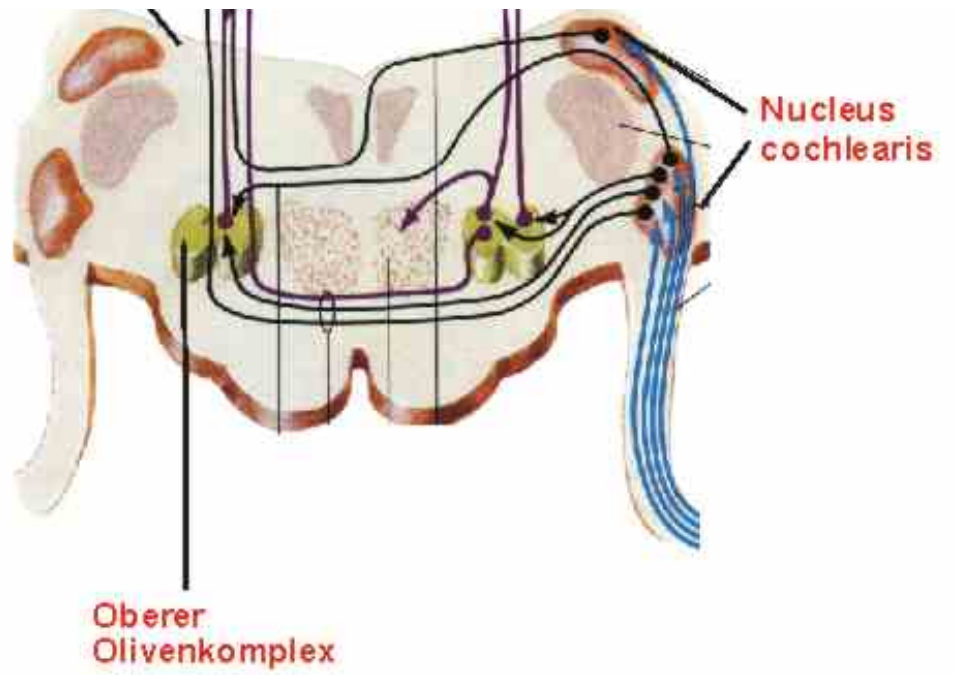
Aus den **Spiralganglien** in der Cochlea laufen die sensorischen Fasern zunächst zum **Nucleus cochlearis** im Stammhirn. Hier wird die akustische Information schon bearbeitet. Ein Beispiel: Laterale Inhibition. Wird eine innere Haarzelle von einem relativ lauten Ton aktiviert, können auch benachbarte 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 und damit das Bewußtsein erreicht wird.



Aus: Netter F.H. (1987) Nervensystem I, Thieme Verlag, Stuttgart



Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Hören

I. Schallanalyse im Innenohr

II. Zentrale Verarbeitung akustischer Signale

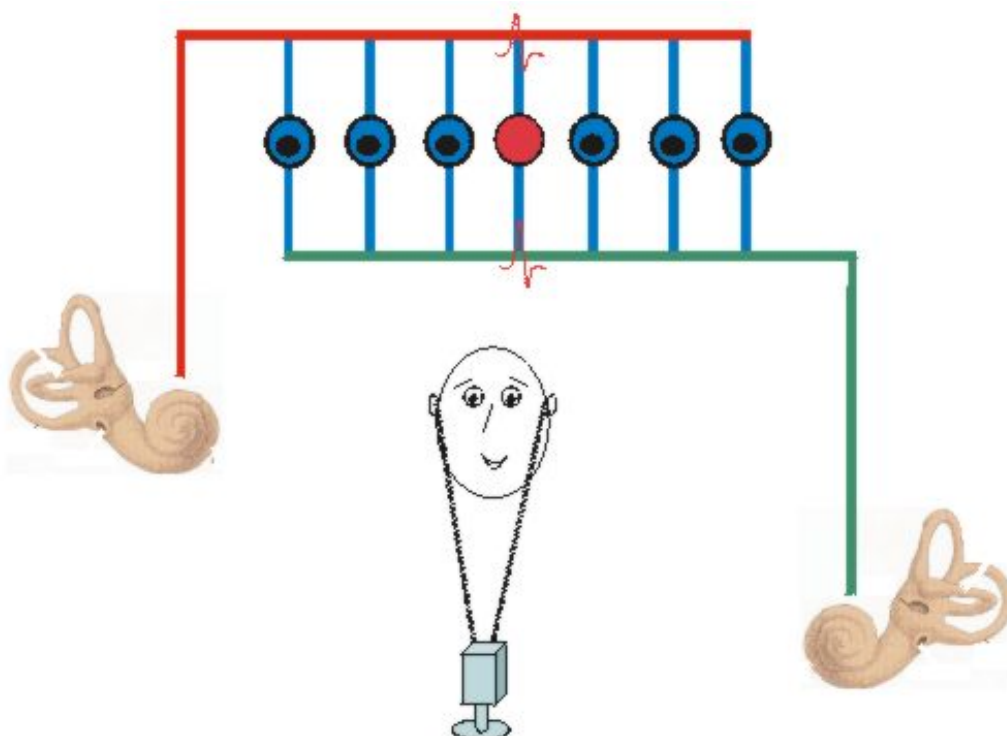
Themen:

- [Vom Innenohr zum Hörnerv](#)
- [Die Hörbahnen im Gehirn](#)
- [Obere Olive: Richtungshören](#)
- [Lage der Hörrinde](#)
- [Komplexität der Hörrinde](#)
- [Zusammenfassung 2](#)

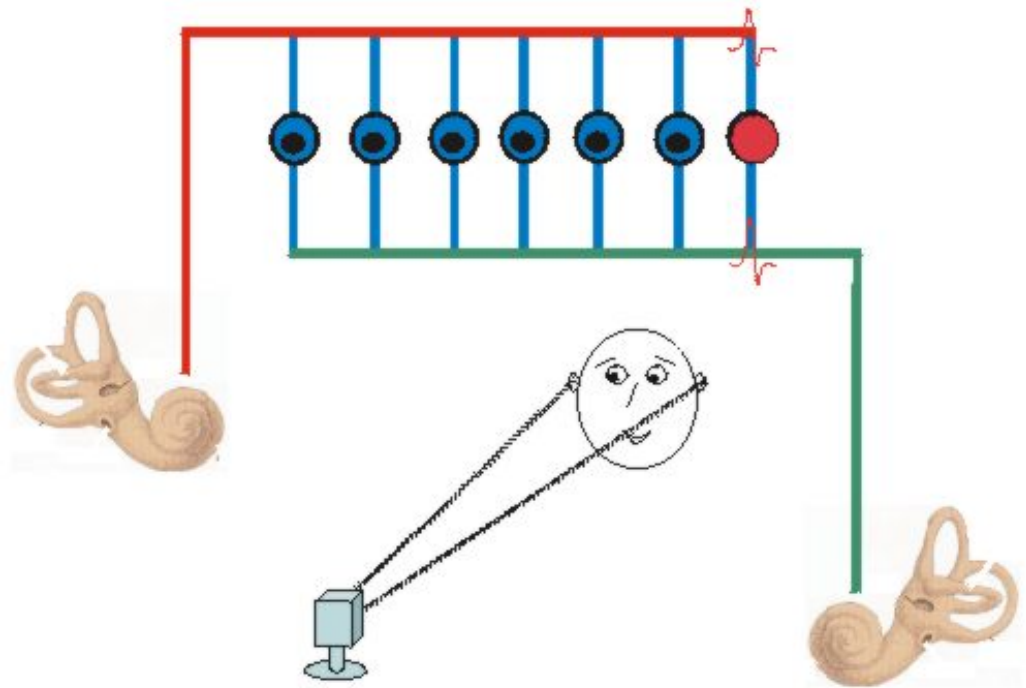
Obere Olive: Richtungshören

Die Position einer Schallquelle relativ zum Kopf kann geortet werden, weil ein von der Seite kommendes akustisches Signal immer ein Ohr vor dem anderen erreicht. Aus dem Unterschied in der Laufzeit des Schalls kann die Richtung zur Schallquelle erstaunlich präzise abgeleitet werden.

Das Prinzip der Schallortung ist rechts gezeigt: Von den beiden Innenohren laufen **gleich lange** Axone in die obere Olive (rot, grün). Dort sind sie mit Neuronen verschaltet, die immer nur dann aktiviert werden, wenn sie von beiden Axonen gleichzeitig synaptischen Input bekommen - wenn also die vom linken und vom rechten Innenohr kommenden Aktionspotentiale genau gleichzeitig ankommen. Solche Neurone nennt man **Koinzidenz-Detektoren** (blau). Wenn die Schallquelle gerade vor dem Kopf liegt, kommen beide APs gleichzeitig in der Olive an **und aktivieren ein Neuron in der Mitte des Netzwerks**.

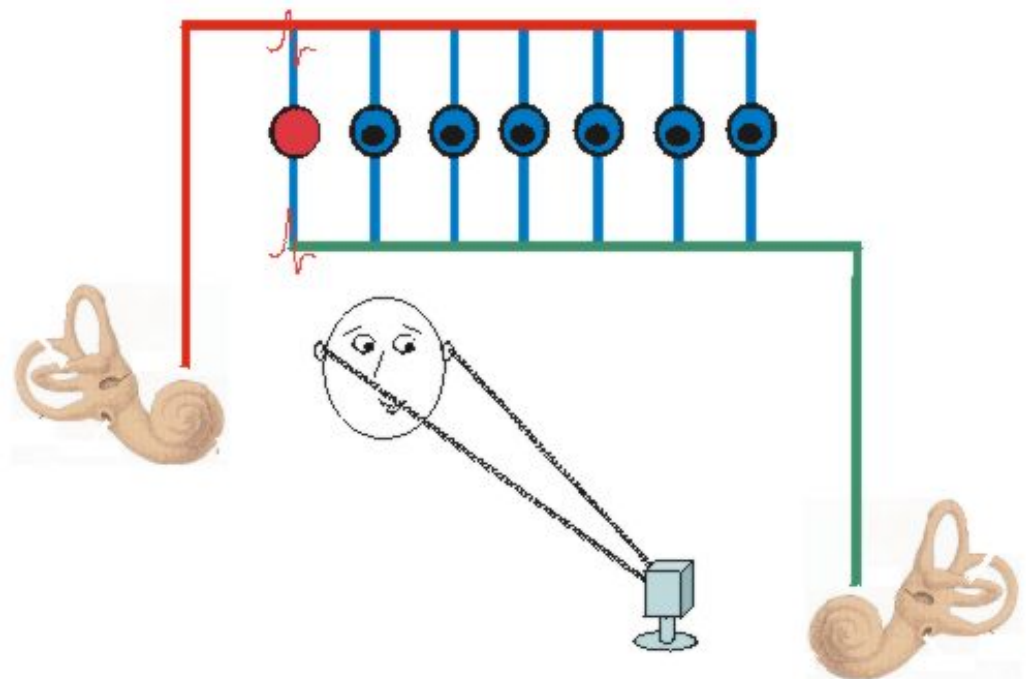


Bei einer rechts-liegenden Schallquelle kommt das AP vom rechten Ohr zuerst in der Olive an, denn der Schall trifft zuerst auf das rechte Ohr. Dabei treten Laufzeitunterschiede im Bereich 0.1 - 0.7 ms auf. Das Zusammentreffen der beiden Axone findet dann nicht in der Mitte des Netzwerks statt sondern an einem weiter links liegenden Koinzidenz-Detektor.



Bei links-liegender Schallquelle hat das AP vom linken Ohr Vorsprung, und ein Neuron im rechten Teil des Netzwerks wird erregt.

Durch diese einfache Verschaltung gewinnt das Gehirn Information zusätzlich zur Frequenzinformation aus der Cochlea. Die Lage eines aktivierten Koinzidenzdetektors innerhalb des Netzwerks gibt direkt die Richtung zur Schallquelle an.



Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"



Hören

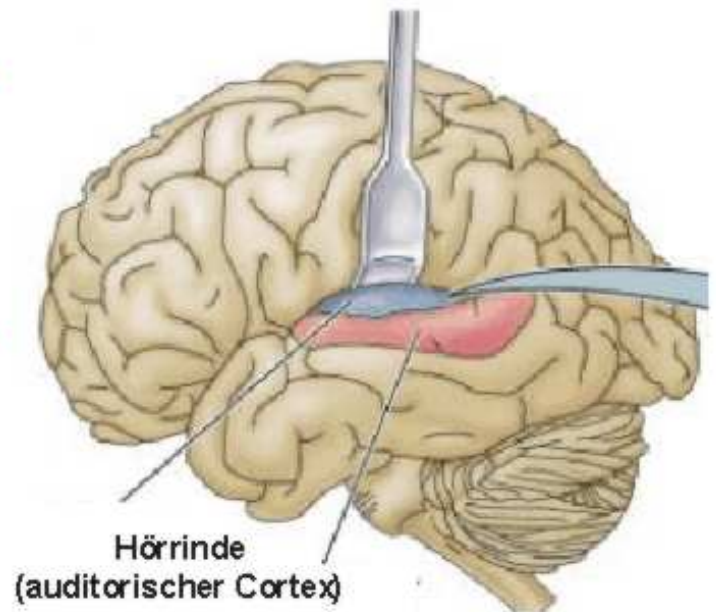
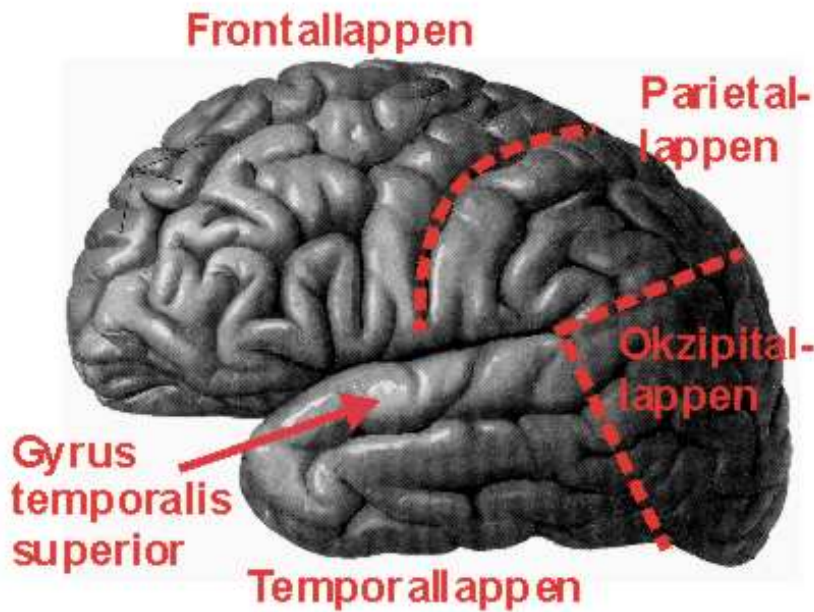
I. Schallanalyse im Innenohr

II. Zentrale Verarbeitung akustischer Signale

Themen:

- [Vom Innenohr zum Hörnerv](#)
- [Die Hörbahnen im Gehirn](#)
- [Obere Olive: Richtungshören](#)
- [Lage der Hörrinde](#)
- [Komplexität der Hörrinde](#)
- [Zusammenfassung 2](#)

Lage der Hörrinde



Der auditorische Cortex liegt an der Innenseite des Gyrus temporalis superior im Temporallappen des Großhirns.

Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Hören

I. Schallanalyse im Innenohr

II. Zentrale Verarbeitung akustischer Signale

Themen:

- [Vom Innenohr zum Hörnerv](#)
- [Die Hörbahnen im Gehirn](#)
- [Obere Olive: Richtungshören](#)
- [Lage der Hörrinde](#)
- [Komplexität der Hörrinde](#)
- [Zusammenfassung 2](#)

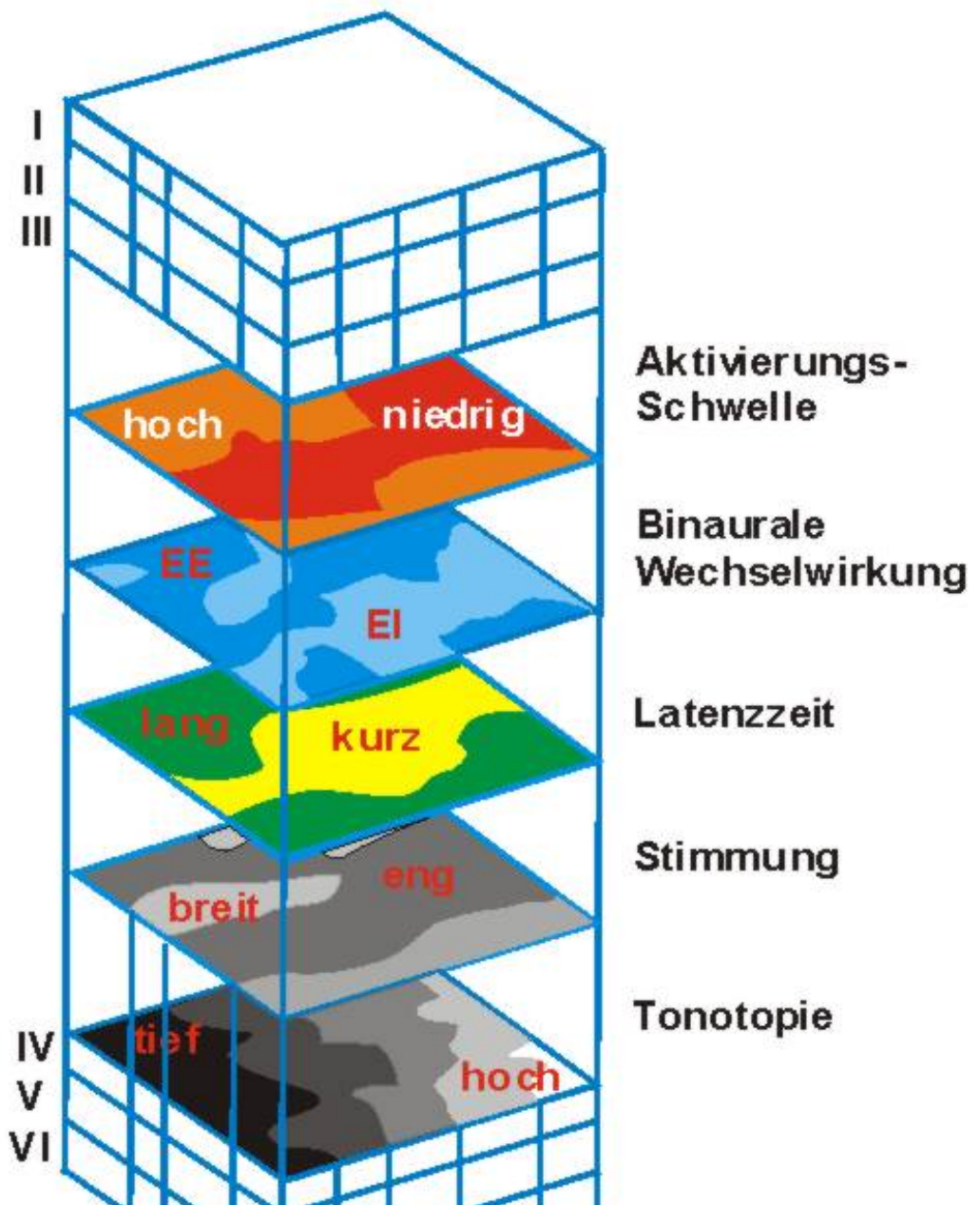
Komplexität der Hörrinde

Die Hörrinde (auditorischer Cortex) zeigt wie der somatosensorische Cortex eine 6-fache Schichtung, und die Fasern der Hörbahn gelangen aus dem Thalamus vor allem in die Schichten III und IV. Im Unterschied zum somatosensorischen Cortex sind die Neurone im auditorischen Cortex aber nach vielen Gesichtspunkten spezialisiert. Die Graphik rechts soll das veranschaulichen.

Zunächst erkennt man in dem untersten Quadrat die **tonotope** Organisation der Schicht IV. Die Neurone auf der linken Seite (schwarz) reagieren auf tiefe Töne, die weiter rechts (grau-weiß) auf höhere Töne. Unter den Neuronen für tiefe Töne gibt es solche die auf ein relativ breites Band tiefer Frequenzen reagieren. Deren Bereiche sind in dem zweiten Quadrat hellgrau dargestellt. Enger gestimmte Neurone, die also auf einen engen Frequenzbereich spezialisiert sind, sind dunkelgrau dargestellt.

Die darüberliegenden Quadrate geben weitere Spezialisierungen der Schicht-IV-Zellen an: Manche Neurone haben relativ lange Latenzzeiten (Zeit vom Eintritt des Schall ins Ohr bis zum Feuern des Neurons in der Hörrinde), ein Hinweis, dass das Signal mehrere Schaltstellen im Gehirn durchlaufen muss, bis es in der Hörrinde ankommt.

Das Quadrat "Binaurale Wechselwirkungen" zeigt, daß die Neurone der Schicht IV von beiden Ohren versorgt werden. Manche



Neuronen werden erregt, wenn ein Ton auf der gleichen Körperseite (ipsilateral) oder im gegenüberliegenden (kontralateralen) Ohr ankommt: EE = ekzitatorisch/ekzitatorisch.

Andere Neurone reagieren unterschiedlich auf die beiden Ohren: EI = exzitatorisch auf das ipsilaterale und inhibitorisch auf das kontralaterale Ohr.



Schließlich haben die Neurone der Schicht IV noch unterschiedliche Aktivierungsschwellen. Manche reagieren auf sehr leise Töne, andere brauchen höhere Lautstärke.

Zusammenfassend kann man sagen, daß die Verarbeitung der akustischen Signale im auditorischen Cortex wesentlich komplexer ist als zB im somatosensorischen Cortex. Das Signal erreicht die Pyramidenzellen in den Schichten III und IV mit vielfältiger Information von spezialisierten Neuronenverbänden in Mittelhirn und Thalamus, die nicht nur Frequenz- und Intensitätsinformation sondern auch abgeleitete, komplexe Informationen (zB Richtung der Schallquelle) zum Cortex bringen.

Nach: Linden, J.F. + Schreiner, C.E. (2003) Columnar transformations in auditory cortex? A comparison to visual and somatosensory cortices. *Cerebral Cortex* 13: 83-89

Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Hören

I. Schallanalyse im Innenohr

II. Zentrale Verarbeitung akustischer Signale

Themen:

- [Vom Innenohr zum Hörnerv](#)
- [Die Hörbahnen im Gehirn](#)
- [Obere Olive: Richtungshören](#)
- [Lage der Hörrinde](#)
- [Komplexität der Hörrinde](#)
- [Zusammenfassung 2](#)

Zusammenfassung 2

- Etwa 20 Neuronen aus den Spiralganglien innervieren jede innere Haarzelle.
- Die Axone der Neurone aus den Spiralganglien bilden den Hörnerv und verlaufen zum Nucleus cochlearis im Stammhirn.
- Im Olivenkomplex (Nucleus olivaris) werden Fasern aus beiden Innenohren miteinander verschaltet. Hier werden Laufzeitunterschiede für das Richtungshören ausgewertet.
- Die Hörbahn verläuft über den Thalamus zur Hörrinde im Temporallappen.
- Neurone in der Hörrinde kodieren eine Vielzahl von unterschiedlichen Informationen über das akustische Signal und ermöglichen damit die Analyse komplizierter Klangmischungen (Sprache).

Stephan Frings, Uni Heidelberg,

[Abt. Molekulare Physiologie](#)

Mai 2003

s.frings@zoo.uni-heidelberg.de

Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Hören

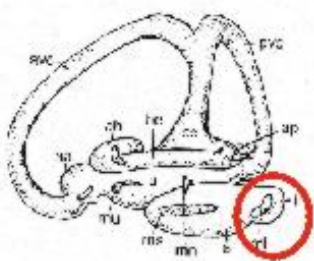
I. Schallanalyse im Innenohr

II. Zentrale Verarbeitung akustischer Signale

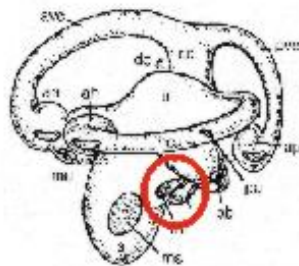
Themen:

- [Was das Gehör leisten muss](#)
- [Die Evolution der Cochlea](#)
- [Aufbau der Cochlea](#)
- [Saiteninstrumente und Resonanz](#)
- [Die Stimmung der Basilarmembran](#)
- [Resonanz in der Cochlea](#)
- [Tonotopie und Frequenztrennung](#)
- [Äußere Haarzellen als Servomotoren](#)
- [Innere Haarzellen: die Sensoren](#)
- [Zusammenfassung 1](#)

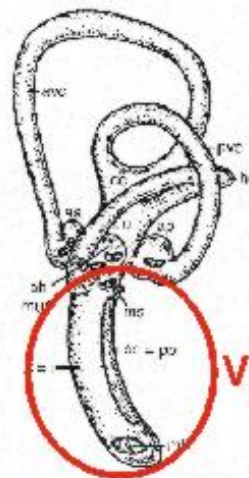
Die Evolution der Cochlea



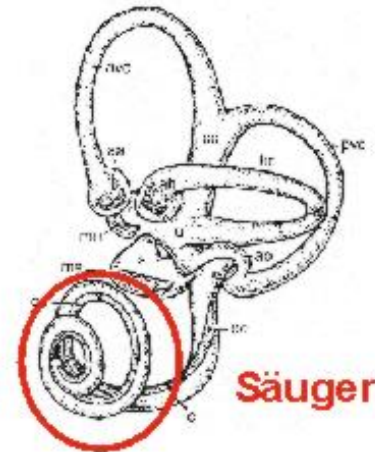
Fisch



Frosch



Vögel



Säuger

Bei diesen Darstellungen von Innenohren verschiedener Tiere erkennt man bei allen Strukturen die Bogengänge, die zur Wahrnehmung der Drehbeschleunigung dienen. Die Makulaorgane (Sacculus und Utriculus) messen die Linearbeschleunigung bei allen vier Organen. Auffällig ist die extreme Verlängerung der **Lagena** (rote Kreise) bei den Vögeln. Die Lagena enthält das Corti-Organ zur Schallwahrnehmung. Im hochentwickelten Hörsystem der Säuger ist die Lagena zur Cochlea aufgerollt.

Aus: Smith, C.U.M. (2000) Biology of sensory systems. Wiley, Chichester.

Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Hören

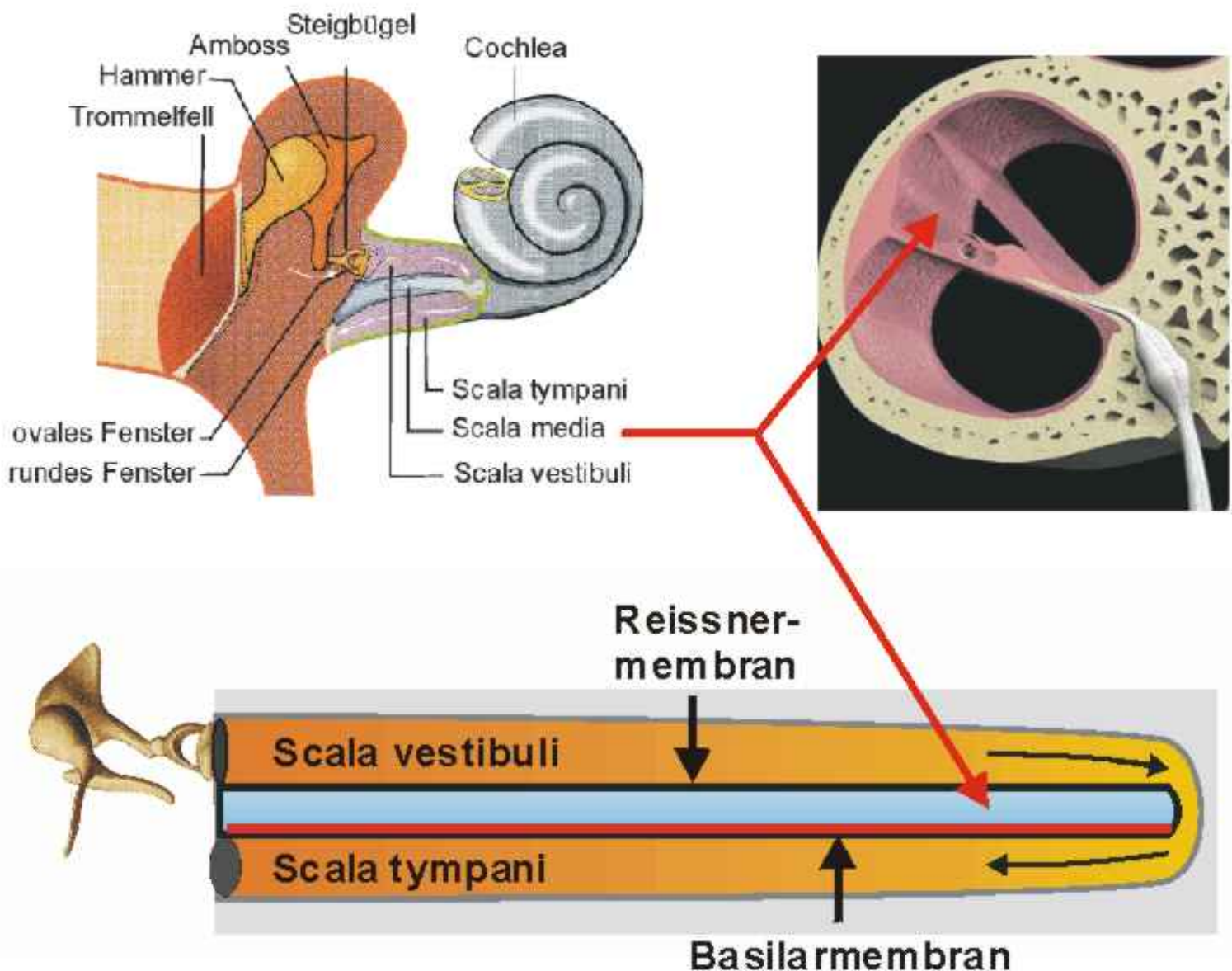
I. Schallanalyse im Innenohr

II. Zentrale Verarbeitung akustischer Signale

Themen:

- [Was das Gehör leisten muss](#)
- [Die Evolution der Cochlea](#)
- [Aufbau der Cochlea](#)
- [Saiteninstrumente und Resonanz](#)
- [Die Stimmung der Basilarmembran](#)
- [Resonanz in der Cochlea](#)
- [Tonotopie und Frequenztrennung](#)
- [Äußere Haarzellen als Servomotoren](#)
- [Innere Haarzellen: die Sensoren](#)
- [Zusammenfassung 1](#)

Aufbau der Cochlea



Basilarmembran mit Corti Organ

Die Cochlea ist aufgebaut wie ein dreistöckiger Schneckengang. Den mittleren Gang (Scala media) bildet die schallempfindliche Struktur: die **Basilarmembran** mit dem Cortiorgan und die Reissnermembran. Die Scala media ist mit Endolymphe gefüllt. In der Modellvorstellung einer aufgerollten Cochlea (unteres Bild) sieht die Scala media aus wie ein geschlossener Schlauch, der von der Basis der Cochlea bis zu ihrer Spitze (dem Helikotrema) führt.

Stephan Frings, Uni Heidelberg,

[Abt. Molekulare Physiologie](#)

Mai 2003

s.frings@zoo.uni-heidelberg.de

Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Hören

I. Schallanalyse im Innenohr

II. Zentrale Verarbeitung akustischer Signale

Themen:

- [Was das Gehör leisten muss](#)
- [Die Evolution der Cochlea](#)
- [Aufbau der Cochlea](#)
- [Saiteninstrumente und Resonanz](#)
- [Die Stimmung der Basilarmembran](#)
- [Resonanz in der Cochlea](#)
- [Tonotopie und Frequenztrennung](#)
- [Äußere Haarzellen als Servomotoren](#)
- [Innere Haarzellen: die Sensoren](#)
- [Zusammenfassung 1](#)

Saiteninstrumente und Resonanz

Die unterschiedlichen Töne von Saiteninstrumenten können auf zwei unterschiedliche Arten erzeugt werden. Bei Harfen verwendet man unterschiedlich lange Saiten um tiefe und hohe Töne zu bekommen. Bei Streichinstrumenten sind alle Saiten gleich lang. Die unterschiedliche Stimmung beruht hier darauf, daß die einzelnen Saiten unterschiedlich dick und unterschiedlich flexibel sind.

Allgemein gilt:

Lange, weiche und dicke Saiten geben tiefe Töne.

Kurze, harte und dünne Saiten geben hohe Töne.

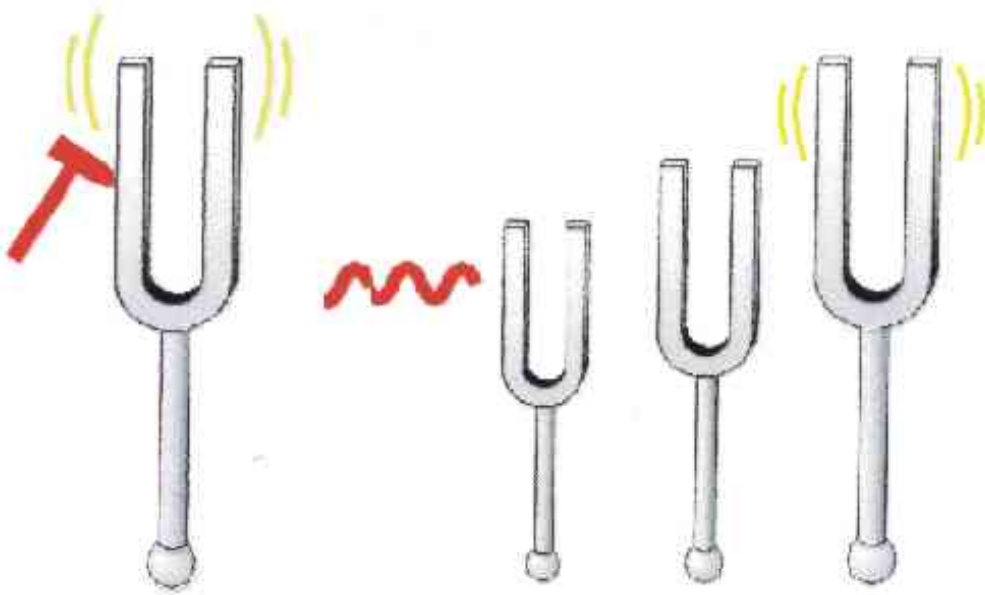
Beim Flügel sind beide Bauprinzipien kombiniert: Baßsaiten sind lang und dick, Saiten für hohe Töne sind kurz und dünn.

In der Cochlea wird das gleiche Prinzip für die Stimmung der Basilarmembran angewendet.





Resonanz: Beim Anschlagen einer Stimmgabel klingen eine gleichgestimmte Stimmgabel und die gleichgestimmte Saite der Harfe mit. Wenn bekannt ist, welche Harfensaite auf welchen Ton gestimmt ist, dann kann aus der **Lage** einer durch Resonanz schwingenden Saite die Stimmung (**Frequenz**) der angeschlagenen Stimmgabel abgeleitet werden. Dieses Prinzip - aus einer räumlichen Information auf eine Frequenz zu schließen - wird in der Cochlea für die Frequenzanalyse verwendet.



Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Hören

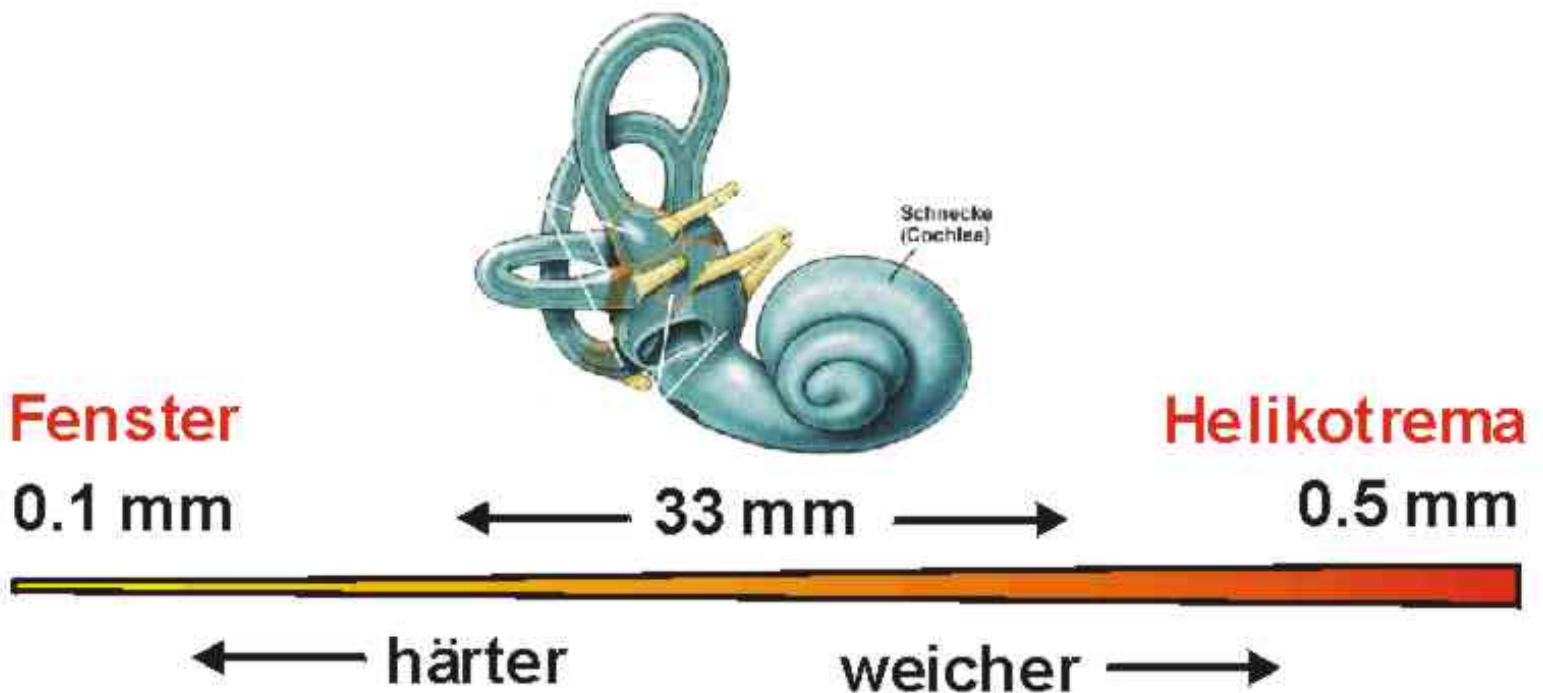
I. Schallanalyse im Innenohr

II. Zentrale Verarbeitung akustischer Signale

Themen:

- [Was das Gehör leisten muss](#)
- [Die Evolution der Cochlea](#)
- [Aufbau der Cochlea](#)
- [Saiteninstrumente und Resonanz](#)
- [Die Stimmung der Basilarmembran](#)
- [Resonanz in der Cochlea](#)
- [Tonotopie und Frequenztrennung](#)
- [Äußere Haarzellen als Servomotoren](#)
- [Innere Haarzellen: die Sensoren](#)
- [Zusammenfassung 1](#)

Die Stimmung der Basilarmembran



Man kann sich die Basilarmembran wie eine über einen weiten Frequenzbereich gestimmte Harfe vorstellen. Die Saiten für hohe Töne (kurz, hart, bis 16.000 Hz) liegen in der Basis der Cochlea, in der Nähe der Fenster. Die Baßsaiten (lang, weich, bis 20 Hz) liegen nahe der Cochleaspitze, dem Helikotrema. Die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften werden dadurch erreicht, daß das Proteingewebe der Basilarmembran im unteren Teil der Cochlea dichter und dicker ist als im oberen. Die oben angegebenen Maße gelten für die Basilarmembran des Menschen.

Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Hören

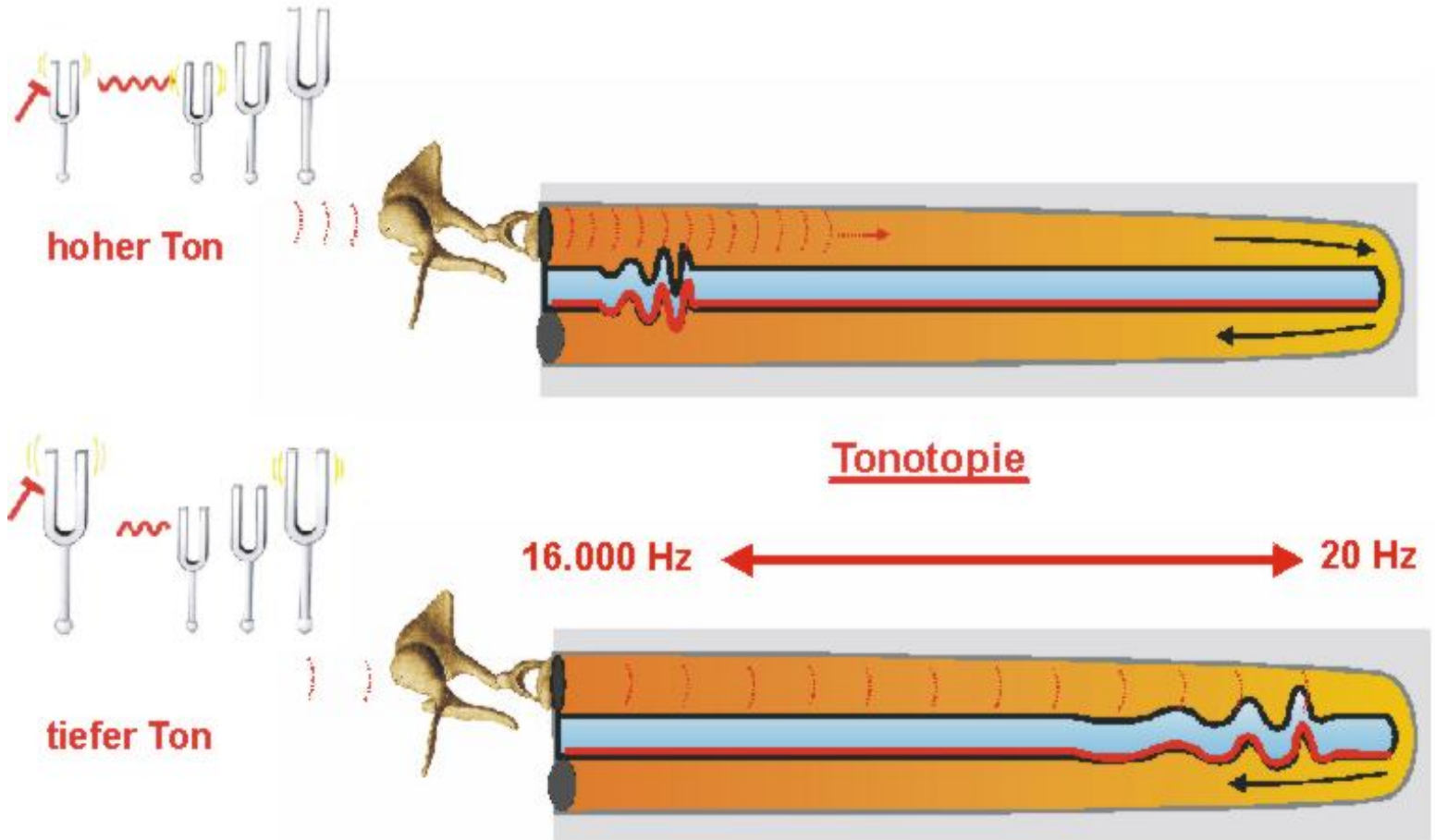
I. Schallanalyse im Innenohr

II. Zentrale Verarbeitung akustischer Signale

Themen:

- [Was das Gehör leisten muss](#)
- [Die Evolution der Cochlea](#)
- [Aufbau der Cochlea](#)
- [Saiteninstrumente und Resonanz](#)
- [Die Stimmung der Basilarmembran](#)
- [Resonanz in der Cochlea](#)
- [Tonotopie und Frequenztrennung](#)
- [Äußere Haarzellen als Servomotoren](#)
- [Innere Haarzellen: die Sensoren](#)
- [Zusammenfassung 1](#)

Resonanz in der Cochlea



Durch die Stimmung der Basilarmembran von hoch (Cochlearbasis) bis tief (Helikotrema) kommt es zu einer räumlichen Anordnung von Resonanzschwingungen (**Tonotopie**). Hohe Töne erzeugen Resonanzwellen nahe dem ovalen Eintrittsfenster in die Scala vestibuli (oben). Tiefe Töne erzeugen nahe der Cochleaspitze Resonanz (unten). Um festzustellen, welche Frequenz ein wahrgenommener Ton hat, muß das Gehirn also nur nachschauen, an welcher Stelle der Basilarmembran Resonanzschwingungen auftreten. Dieses "Nachschauen" machen Haarzellen.

Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Hören

I. Schallanalyse im Innenohr

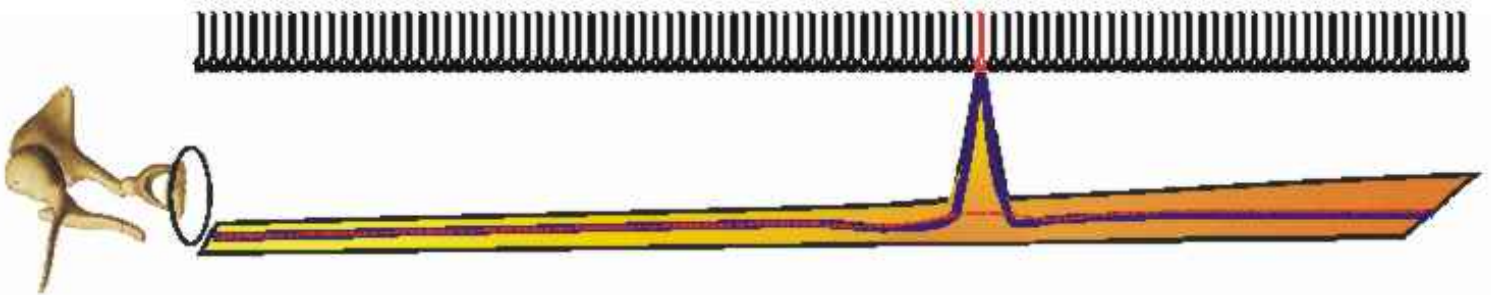
II. Zentrale Verarbeitung akustischer Signale

Themen:

- [Was das Gehör leisten muss](#)
- [Die Evolution der Cochlea](#)
- [Aufbau der Cochlea](#)
- [Saiteninstrumente und Resonanz](#)
- [Die Stimmung der Basilarmembran](#)
- [Resonanz in der Cochlea](#)
- [Tonotopie und Frequenztrennung](#)
- [Äußere Haarzellen als Servomotoren](#)
- [Innere Haarzellen: die Sensoren](#)
- [Zusammenfassung 1](#)

Tonotopie und Frequenztrennung

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

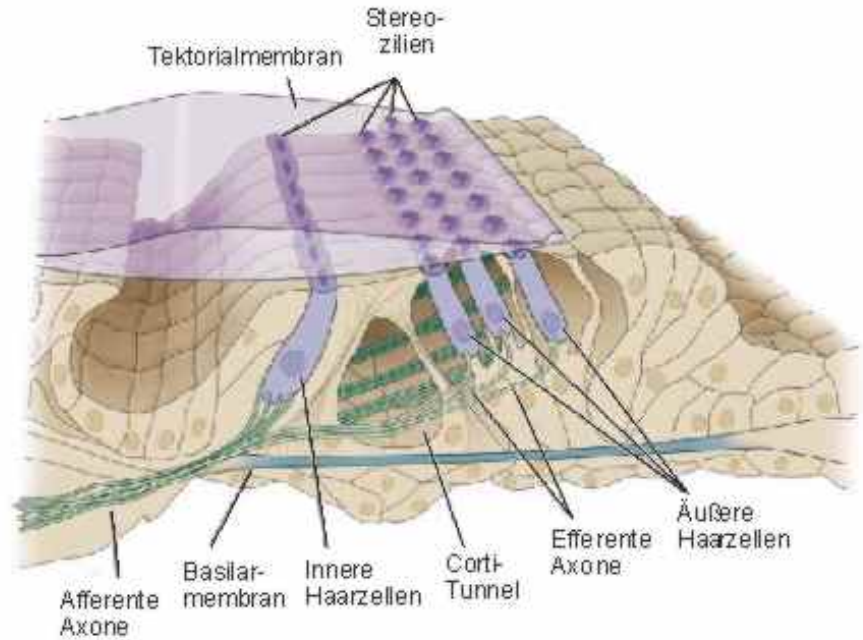


Das Innenohr hat nur wenig Platz (33 mm), um ein Instrument unterzubringen, das über einen Frequenzbereich von 20 - 16.000 Hz hinweg eine möglichst gute Frequenzauflösung bietet. Zwei besondere Fähigkeiten des Corti- Organs machen das möglich:

1. **Die Resonanzschwingung wird punktgenau verstärkt**, und zwar genau an der Stelle der Basilarmembran, an der die Schwingung (Vibration) ihr Maximum hat. Denn diese Stelle entspricht genau der Frequenz des wahrgenommenen Tons. Die Vibration wird etwa um den Faktor 1000 verstärkt und erst dadurch hörbar gemacht.
2. **Die so verstärkten Schwingungen werden an etwa 3500 Stellen der Basilarmembran abgegriffen.** Damit entspricht das Corti-Organ einer Harfe mit 3500 Saiten.

Diese beiden Funktionen werden von zwei unterschiedlichen Populationen von Haarzellen im Corti-Organ geleistet: **Äußere Haarzellen** leisten die punktgenaue Verstärkung, und **innere Haarzellen** stellen die 3500 Sensoren entlang der gesamten Länge der Basilarmembran (rechts).

Die Haarzellen sind im Corti-Organ auf der Basilarmembran unterhalb der Tektorialmembran angeordnet. Bei einer Resonanzschwingung der Basilarmembran verschieben sich Basilar- und Tektorialmembran gegeneinander. Dies führt zunächst zur Erregung der äußeren Haarzellen, deren Stereozilien im Kontakt mit der Tektorialmembran stehen.



Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Hören

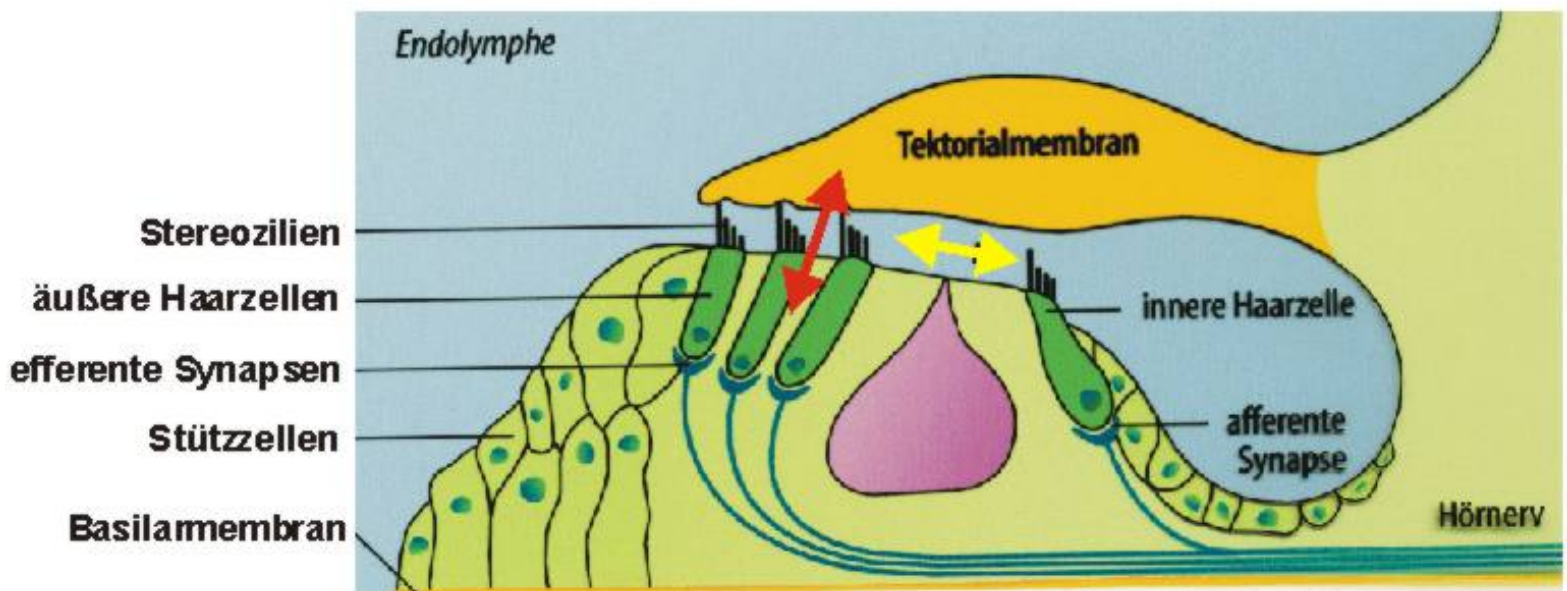
I. Schallanalyse im Innenohr

II. Zentrale Verarbeitung akustischer Signale

Themen:

- [Was das Gehör leisten muss](#)
- [Die Evolution der Cochlea](#)
- [Aufbau der Cochlea](#)
- [Saiteninstrumente und Resonanz](#)
- [Die Stimmung der Basilarmembran](#)
- [Resonanz in der Cochlea](#)
- [Tonotopie und Frequenztrennung](#)
- [Äußere Haarzellen als Servomotoren](#)
- [Innere Haarzellen: die Sensoren](#)
- [Zusammenfassung 1](#)

Innere Haarzellen: die Sensoren

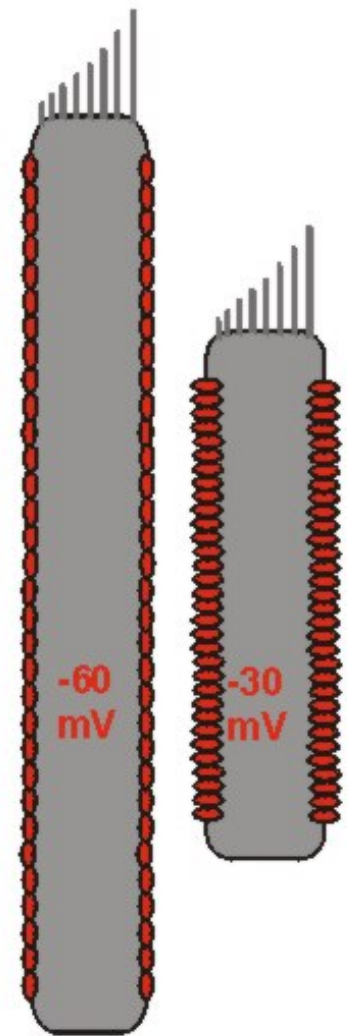


Schematische Darstellung der Funktion des Corti-Organes. Die Tektorialmembran berührt die Stereozilien der äußeren, nicht aber der inneren Haarzellen. Bei Eintreffen eines Schallsignals werden Basilarmembran und Tektorialmembran gegeneinander verschoben. Dies stimuliert die äußeren Haarzellen zu Längenänderungen, die die lokalen Bewegungen im Cortiorgan extrem (ca 1000-fach) verstärken. Die äußeren Haarzellen wirken so als Signalverstärker. Die verstärkte Bewegung führt zur Stimulierung der inneren Haarzellen, die das eigentliche sensorische Signal produzieren und zum Gehirn schicken.

Bei Eintreffen der Wanderwelle werden die äußeren Haarzellen, die direkten Kontakt mit der Tektorialmembran haben, depolarisiert. Die Zellen reagieren darauf mit Kontraktion. Da Schallsignale im allgemeinen oszillieren (Schallwellen), wird auch das Membranpotential der äußeren Haarzellen (und damit ihre Länge) periodisch verändert: die Zellen "vibrieren" mit der Frequenz des eintreffenden Tones und verstärken damit die Auslenkungen der Tektorialmembran. Man kann vielleicht sagen: Die äußeren Haarzellen schütteln die Tektorialmembran im Takt des Schallsignals. Dadurch schaukelt sich die Signalintensität um ca das 1000-fache der ursprünglichen Signalintensität auf - und erst durch diese Verstärkung werden leise bis mittlere Töne hörbar. Die Fähigkeit der äußeren Haarzellen, ihre Länge unter der Kontrolle des Membranpotentials zu verändern, beruht auf einem besonderen Protein, dem **Prestin**. Man nimmt an, dass Prestin spannungsabhängige Konformationsänderungen ausführt. Da Prestin in großen Mengen in der Plasmamembran vorliegt, kann es die Zelle auseinanderdrücken oder zusammenziehen, je nach Konformation. Diese spannungsgesteuerte Längenänderung ist sehr schnell: sie kann sich bis zu 20.000-mal pro Sekunde vollziehen (Töne mit Frequenzen über 20 kHz können wir nicht hören).

Zur Internetseite:

[Die tanzende äußere Haarzelle](#)



Aus: Schmidt & Thews (1997) Physiologie des Menschen, Springer Verlag, Berlin

Stephan Frings, Uni Heidelberg,

[Abt. Molekulare Physiologie](#)

Mai 2003

s.frings@zoo.uni-heidelberg.de

Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Hören

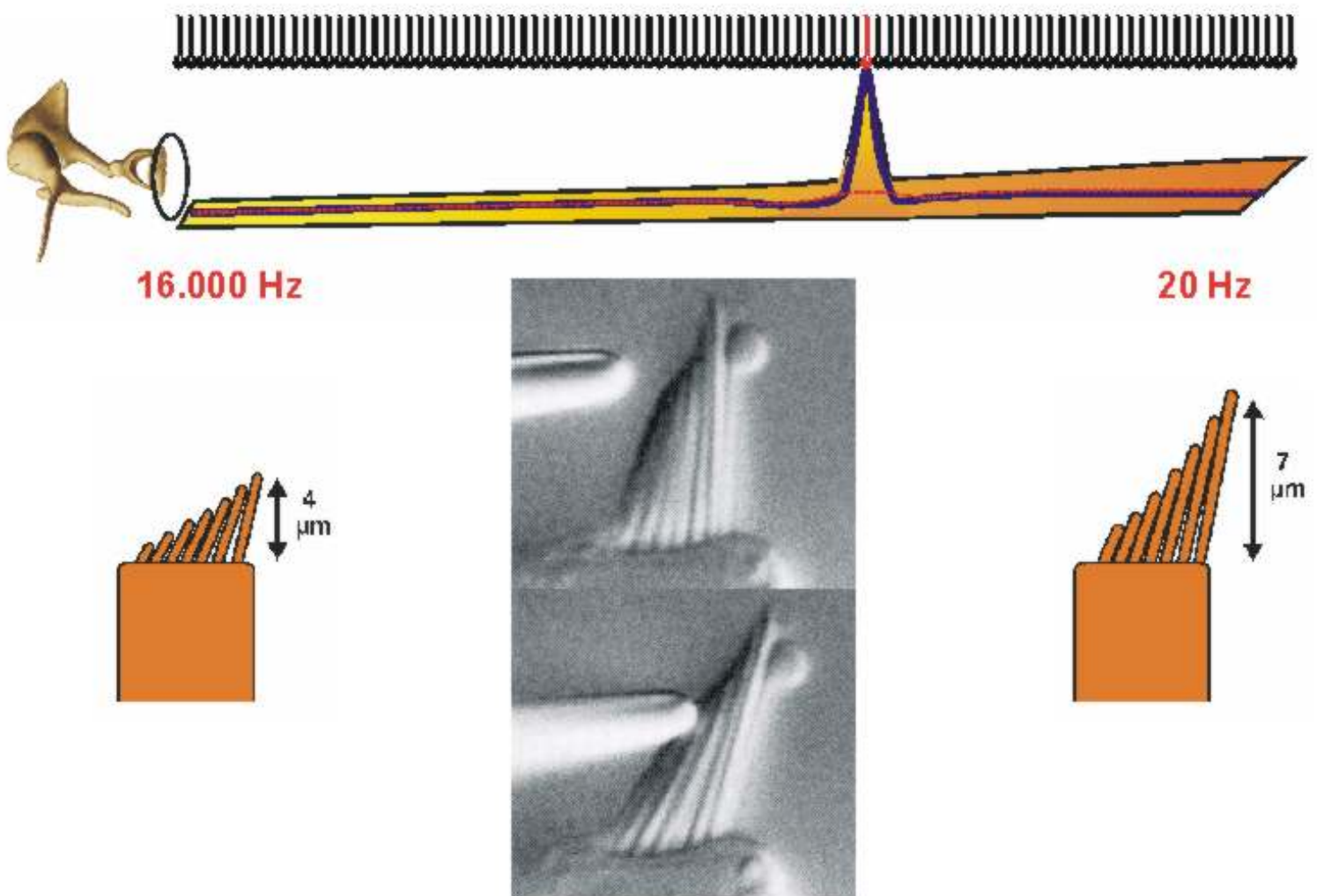
I. Schallanalyse im Innenohr

II. Zentrale Verarbeitung akustischer Signale

Themen:

- [Was das Gehör leisten muss](#)
- [Die Evolution der Cochlea](#)
- [Aufbau der Cochlea](#)
- [Saiteninstrumente und Resonanz](#)
- [Die Stimmung der Basilarmembran](#)
- [Resonanz in der Cochlea](#)
- [Tonotopie und Frequenztrennung](#)
- [Äußere Haarzellen als Servomotoren](#)
- [Innere Haarzellen: die Sensoren](#)
- [Zusammenfassung 1](#)

Innere Haarzellen: die Sensoren



Etwa 3500 innere Haarzellen sind in einer Reihe entlang der Basilarmembran angeordnet. Sie sind die Sensoren der Cochlea, denn sie leiten Information über die Position der Resonanzschwingung der Basilarmembran an das Gehirn weiter. Bei leisen bis mittleren Lautstärken werden die inneren Haarzellen nur dann erregt, wenn die äußeren Haarzellen die Resonanzschwingung verstärken.

Bei Versuchen mit isolierten Haarzellen kam heraus, daß diese Zellen auf bestimmte Frequenzen "gestimmt" sind. Wenn man die Stereozilien mit verschiedenen Testfrequenzen mechanisch auslenkt, findet man, daß die elektrische Reaktion der Haarzellen in dem Frequenzbereich am stärksten ist, der ihrer Position in der Cochlea entspricht. Zu dieser Stimmung tragen wohl zwei Faktoren bei: Die Stereozilien der Haarzellen aus dem Hochfrequenzbereich sind kürzer als die der Haarzellen aus der Nähe der Cochleaspitze. Außerdem sind elektrischen Eigenschaften der Haarzellen unterschiedlich: Durch unterschiedliche Ionenkanäle ist die mechano-elektrische Transduktion dem jeweiligen Frequenzbereich angepasst.

Stephan Frings, Uni Heidelberg,

[Abt. Molekulare Physiologie](#)

Mai 2003

s.frings@zoo.uni-heidelberg.de

Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Hören

I. Schallanalyse im Innenohr

II. Zentrale Verarbeitung akustischer Signale

Themen:

- [Was das Gehör leisten muss](#)
- [Die Evolution der Cochlea](#)
- [Aufbau der Cochlea](#)
- [Saiteninstrumente und Resonanz](#)
- [Die Stimmung der Basilarmembran](#)
- [Resonanz in der Cochlea](#)
- [Tonotopie und Frequenztrennung](#)
- [Äußere Haarzellen als Servomotoren](#)
- [Innere Haarzellen: die Sensoren](#)
- [Zusammenfassung 1](#)

Zusammenfassung

- Das Corti-Organ in der Cochlea des Innenohrs analysiert Schall.
- Ein Ton einer bestimmten Frequenz erzeugt Resonanz an einer bestimmten Stelle der Basilarmembran.
- Diese Resonanz wird 1000-fach verstärkt durch die äußeren Haarzellen
- Strömung von Endolymphe zwischen Tektorial- und Basilarmembran aktiviert die inneren Haarzellen.
- Die Position einer aktivierten Haarzelle auf der Basilarmembran gibt dem Gehirn die Frequenzinformation: Tonotopie.
- Etwa 3500 innere Haarzellen in jeder Cochlea decken einen Frequenzbereich von 20 Hz bis 16.000 Hz ab.