

2024-10-13, weitgehend von ChatGPT 4o verfasst, von Jörn Loviscach gepromptet und redigiert

Das hier Genannte ist Allgemeingut, deshalb stehen hier keine Quellenangaben. Die Primärquellen sind *Hunderte von Jahren alt* und oft in Vergessenheit geraten.

In **Fett** geschriebene Begriffe und deren Zusammenhänge sollten für die Prüfung bekannt sein. Die lateinischen Namen stehen hier nur zur Information.

Das menschliche Ohr

Das menschliche Ohr lässt sich in drei Hauptbereiche unterteilen: das **Außenohr**, das **Mittelohr** und das **Innenohr**. Jeder dieser Bereiche hat eine spezifische Funktion, die das Hören ermöglicht, indem Schallwellen in Nervenimpulse umgewandelt werden, die das Gehirn interpretieren kann.

Außenohr (Auricula)

Das Außenohr ist der äußerste Teil des Gehörsystems, der Schallwellen auffängt und sie in den Gehörgang leitet. Es besteht aus:

- **Ohrmuschel** (Auricula, auch Pinna genannt): Die Ohrmuschel ist der sichtbare Teil des Ohrs. Sie besteht aus elastischem Knorpel und hat eine charakteristische, gewundene Form.
- **Äußerer Gehörgang** (Meatus acusticus externus): Dieser Kanal verbindet die Ohrmuschel mit dem Trommelfell. Er ist mit Haut ausgekleidet, die Haarfollikel und Drüsen enthält, die Ohrenschmalz (Cerumen) produzieren. Das Ohrenschmalz schützt vor Fremdkörpern und Infektionen, kann aber auch zu Verschmutzungen führen, die das Hören beeinträchtigen können.
- **Trommelfell** (Membrana tympani): Das Trommelfell ist eine dünne, flexible Membran, die den Gehörgang vom Mittelohr trennt. Es vibriert, wenn es von Schallwellen getroffen wird, und überträgt diese Vibrationen weiter ins Mittelohr.

Mittelohr (Auricula media)

Das Mittelohr befindet sich hinter dem Trommelfell und dient als Übertragungsmechanismus (eine Art Impedanzanpassung) für die Vibrationen des Trommelfells auf die Innenohrstrukturen. Es besteht aus:

- **Gehörknöchelchen**: Im Mittelohr befinden sich drei wenige Millimeter große Knochen, die als **Gehörknöchelchen** bezeichnet werden. Diese Knochen heißen:
 - **Hammer** (Malleus): Er ist am Trommelfell befestigt und überträgt dessen Schwingungen auf den Amboss.
 - **Amboss** (Incus): Der Amboss befindet sich zwischen dem Hammer und dem Steigbügel und überträgt die Schwingungen weiter.

- Steigbügel (Stapes): Der Steigbügel überträgt die Schwingungen auf das ovale Fenster des Innenohrs. Er ist der kleinste Knochen des menschlichen Körpers.
- Ovale Fenster: Das ovale Fenster ist eine Membranöffnung, die eine Verbindung zwischen Mittelohr und Innenohr darstellt. Der Steigbügel überträgt seine Bewegungen auf diese Membran.
- Eustachische Röhre (Ohrtrumpete): Die Eustachische Röhre verbindet das Mittelohr mit dem Nasenrachenraum. Sie dient dazu, den Druck im Mittelohr auszugleichen und sorgt dafür, dass der Gleichanteil des Drucks auf beiden Seiten des Trommelfells identisch ist. Dies gewährleistet die Beweglichkeit des Trommelfells und ermöglicht eine normale Hörfunktion. Beim Starten und Landen eines Flugzeugs entsteht häufig ein Druckgefühl im Ohr, das durch die Eustachische Röhre ausgeglichen werden kann, indem man sich zum Beispiel die Nase zuhält und bei fest geschlossenem Mund mit der Lunge saugt (beim Start) oder drückt (bei der Landung).

Innenohr (Auricula interna)

Das **Innenohr** ist der komplexeste Teil des Gehörsystems und enthält die Strukturen, die Schallwellen in Nervenimpulse umwandeln. Es besteht aus:

- **Cochlea (Hörschnecke)**: Die Cochlea ist ein schneckenförmiges, flüssigkeitsgefülltes Organ, etwa so groß wie eine Erbse, das Schallwellen in elektrische Signale umwandelt. In den zweieinhalb Umdrehungen der Schnecke winden sich **drei parallele Gänge**: Einer führt vom ovalem Fenster in die Spitze hinein; ein in der Spitze damit verbundener Gang führt von dort wieder heraus zum runden Fenster, das als Gegenstück zum ovalen Fenster einen Druckausgleich schafft; zwischen diesen beiden Membranen verläuft getrennt ein dritter Gang. Die beiden Membranen zwischen den drei Gängen zeigen ein **komplexes, teils aktives Schwingungsverhalten**; es trennt in gewissem Rahmen die Frequenzen: An der Basis der Cochlea (nahe dem ovalen Fenster) reagiert dieses System auf **hohe Frequenzen** (bis zu etwa **20.000 Hz**). In Richtung der Schneckenspitze (Apex) auf **tiefe Frequenzen** (bis hinunter zu etwa **20 Hz**). Auf der **Basilarmembran**, einer der beiden Membranen, befinden sich die Haarzellen. Deren Name stammt daher, dass sie mit winzigen Härchen ausgestattet sind, die mit der umgebenden Flüssigkeit wechselwirken. Haarzellen wachsen nicht nach; ein Verlust ist dauerhaft. Es gibt hier zwei Sorten an Haarzellen:
 - **Innere Haarzellen**: Diese Zellen sind die hauptsächlichen Sensoren, die Schwingungen in Nervenimpulse umwandeln. Sie befinden sich entlang der Basilarmembran in einer Reihe. Es gibt im gesunden jungen Ohr etwa 3.500 innere Haarzellen.
 - **Äußere Haarzellen**: Diese Zellen können die Schwingungen der Basilarmembran aktiv verstärken, was die Sensitivität des Gehörs erhöht. Zusätzlich können die äußeren Haarzellen laute Signale ab-

schwächen, ihre Wirkung ähnelt damit dem Dynamik-Kompressor aus der Audiotechnik. Es gibt im gesunden jungen Ohr etwa **12.000** äußere Haarzellen, in drei Reihen angeordnet.

- **Vorhof** (Vestibulum) und **Bogengänge**: Der Vorhof und die Bogengänge sind ebenfalls Teil des Innenohrs und sind hauptsächlich für den **Gleichgewichtssinn** verantwortlich. Der **Vorhof** besteht aus zwei Strukturen, dem Sacculus und dem Utriculus, die lineare Beschleunigungen und (mittels der Richtung der Schwerkraft) die Position des Kopfes registrieren. Die Bogengänge sind drei halbkreisförmige, flüssigkeitsgefüllte Kanäle, die in etwa senkrechten Ebenen zueinander stehen und Rotationsbewegungen des Kopfes erfassen. Die Haarzellen in diesen Strukturen reagieren auf die (Relativ-)Bewegungen der Flüssigkeit, die durch Kopfbewegungen verursacht werden, und senden entsprechende Signale an das Gehirn. Das Gleichgewichtssystem des Innenohrs erinnert in seiner Funktionsweise an ein dreiaxsiges Gyroskop und ein dreiaxsiges Accelerometer, wobei die drei Bogengänge die Rotationsbewegungen um die drei Raumachsen erfassen und Sacculus und Utriculus lineare Beschleunigungen messen. Diese komplexen Bewegungsinformationen helfen dem Gehirn, die Lage des Körpers im Raum zu bestimmen und das Gleichgewicht zu halten. Eine Konsequenz daraus: Gerät die Flüssigkeit im Inneren in Bewegung (zum Beispiel, indem man sich mehrfach schnell um die eigene Achse dreht), führt dies zur Schwindelempfindungen.

Die Cochlea und andere Teile des Innenohrs befinden sich in einem knöchernen Gehäuse, dem sogenannten **knöchernen Labyrinth**, das im Felsenbein liegt – einem der härtesten Knochen des menschlichen Körpers. Man darf die Abbildungen des Innenohrs nicht so missverstehen, als ob die Gänge zugänglich wären wie die Organe und Blutgefäße etwa im Bauch. Stattdessen handelt es sich um Höhlen im Knochen, was evolutionär an dem Schutz durch die Knochen und der aufgrund der Starre sauberen Schwingungsübertragung auf die empfindlichen sensorischen Strukturen liegen kann. Medizinische Untersuchungen und Eingriffe sind durch diese verborgene Anordnung und die winzigen Abmessungen extrem schwierig bis unmöglich.

Technische Aspekte

Die Basiliarmembran liefert nur eine unscharfe Frequenzanalyse (hohe Frequenzen am Eingang, niedrige Frequenzen in der Spitze der Hörschnecke). Ein lautes Signal ein bestimmten Frequenz führt damit dazu, dass leise Signale benachbarter Frequenzen verdeckt werden, unhörbar werden. Dies ist einer der **Maskierungseffekte**. Andere Maskierungseffekte betreffen leise Signale, die lauten Signalen vorausgehen oder nachfolgen. Technisch erlaubt das, Audioaufzeichnungen massiv vereinfacht und damit datenreduziert zu speichern: Man kann aus einer Kurzzeit-FFT ein (Nyquist-bandbreitenbeschränktes) Signal perfekt rekonstruieren, wenn man die Werte der Fourier-Koeffizienten exakt kennt; aber für Menschen ist es unhörbar, wenn diese Werte mehr oder minder stark gerundet

oder teils sogar auf null gesetzt werden, solange der so bedingte Fehler von lauten Signalanteilen verdeckt wird. Diese Idee liegt vielen **verlustbehafteten Audio-Datenformaten** zu Grunde, begonnen mit dem klassischen MP3-Standard über die BlueTooth-Audioformate bis hin zu Video-Tonformaten wie Dolby Digital und DTS.

Das komplex geformte Außenohr spielt eine entscheidende Rolle bei der **richtungsabhängigen Filterung** des Schalls, wodurch wir einen besseren räumlichen Höreindruck erhalten. Dies geschieht nicht nur durch den **Laufzeit- oder Phasen- und Intensitätsunterschied zwischen den beiden Ohren**, sondern auch durch die besondere Form des Außenohrs, die die Schallwellen je nach Einfallrichtung unterschiedlich filtert. Hierauf beruht die klassische Kunstkopfstereophonie; ebenfalls erklärt sich so, warum wir unnatürliche Pieptöne nicht gut orten können (Problem im Halbschlaf: Welcher der drei Wecker ist am Läuten?). Beschrieben durch eine **Head-Related Transfer Function (HRTF)** wird die richtungsabhängige Filterung in der digitalen Audiotechnik angewendet, um mit einem herkömmlichen Kopfhörer Raumklang zu simulieren. Damit sich das virtuelle Klangbild bei Kopfbewegungen nicht unrealistisch mitdreht, muss die aktuelle Orientierung des Kopfes im Raum gemessen und eingerechnet werden (Head-Tracking). Viele Systeme benutzen vorgefertigte, allgemeine HRTFs; da das Außenohr bei jedem Menschen unterschiedlich geformt ist, müsste allerdings eine individuelle Messung durchgeführt werden, um eine realistische Nachahmung zu ermöglichen.

Schwerhörigkeit tritt häufig im Alter auf oder kann durch Lärm, durch Gifte oder als Nebenwirkung von Medikamenten ausgelöst werden. Meist sind die äußeren und/oder inneren Haarzellen geschädigt, vor allem die im vorderen Teil der Cochlea, also die hohen Frequenzen betreffend. **Hörgeräte** helfen, indem sie den Pegel frequenzabhängig verstärken oder sogar, indem sie verloren gegangene Frequenzbereiche **auf andere, oft tiefere Frequenzbereiche verschieben**, was allerdings ein Hörtraining verlangt und Musik ungenießbar macht. Ein Verlust der äußeren Haarzellen führt schon vor der ausgeprägten Schwerhörigkeit dazu, dass leise Geräusche als zu leise und laute Geräusche als zu laut (!) empfunden werden.

Cochlea-Implantate sind eine weitere wichtige Technik, die Menschen mit schwerer bis vollständiger Schwerhörigkeit helfen kann. Anders als Hörgeräte, die den Schallreiz ändern (ihn insbesondere verstärken), übernehmen Cochlea-Implantate die Funktion der Haarzellen, indem sie die Schallwellen in elektrische Signale umwandeln und diese direkt an den Hörnerv weiterleiten. Sie bestehen aus einem externen Mikrofon und einem Signalprozessor sowie Elektroden, die chirurgisch in die Cochlea eingesetzt werden, um die Nerven zu stimulieren. Cochlea-Implantate ermöglichen es vielen Menschen, wieder oder sogar erstmals Geräusche wahrzunehmen und Sprache zu verstehen, obwohl die Reize, die das Hirn erhält, sehr von denen des natürlichen Hörens verschieden sind. Das Hirn lernt, diese Reize trotzdem mit Bedeutung zu füllen.

Die äußeren Haarzellen können durch äußere Anregung, aber auch spontan selbst

Schall erzeugen (otoakustische Emissionen), der sich mit hochempfindlichen Messgeräten nachweisen lässt. Dies wird zum Beispiel benutzt, um Neugeborene auf Hörbeeinträchtigungen zu prüfen.

Hörgeräte werden anders als die Smartphone-üblichen Ohrhörer tief in den Gehörgang eingesetzt. Sie müssen deshalb hinreichend robust gegenüber Cerumen (Ohrenschmalz) konstruiert sein und auch die wegen des Cerumen nötige regelmäßige Reinigung viele Jahre lang überstehen.