

Einleitung

Hör- und Gleichgewichtssinn sind entwicklungsgeschichtlich eng miteinander verbunden, wie die Darstellung der beteiligten Innenohrkomponenten unterschiedlicher Wirbeltierklassen in Abb. 1 zeigt:

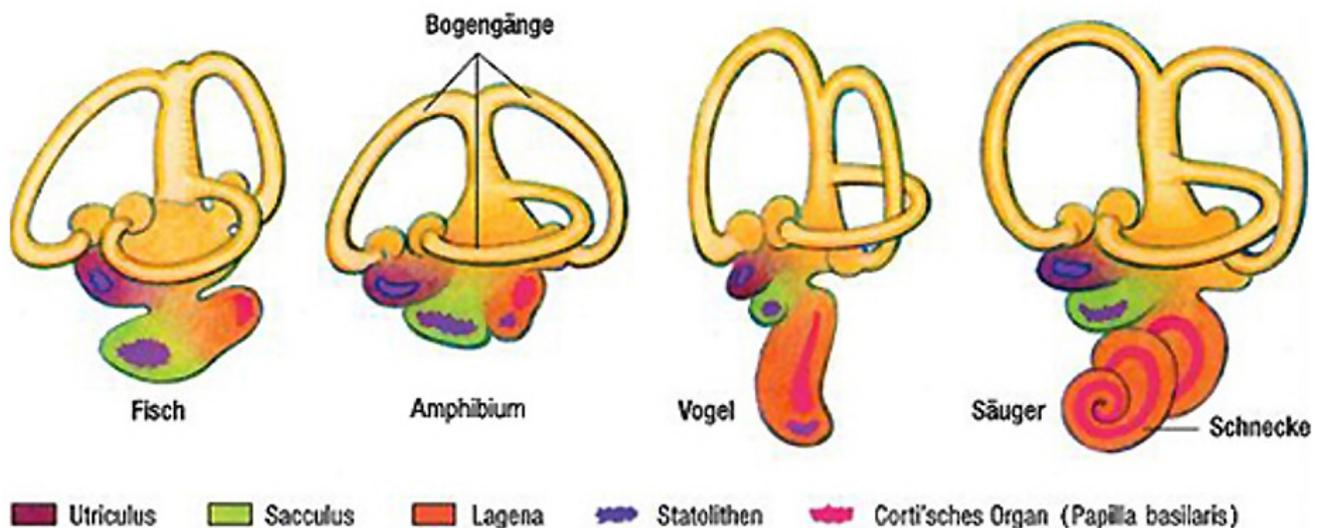


Abb. 1: Entwicklung des Hör und Gleichgewichtssinns

Quelle: www.wissen.de/lexikon/ gehoersinnesorgane

- Der Gleichgewichtssinn dient zur Feststellung der Körperhaltung und Orientierung im Raum. Das Gleichgewicht- bzw. Vestibularorgan hat fünf Bestandteile: Drei Bogengänge und zwei Vorhofsäckchen, Utriculus und Sacculus. Wie man sehen kann ist es die ältere Ohrkomponente des Innenohrs, da die zum Hören notwendigen Komponenten bei den frühen Wirbeltieren Fisch und Amphibium noch fehlen. Aus dem hier jedoch vorhandenen dritten Vorhofsäckchen der Lagena hat sich bei den höheren Tieren der Bereich (Schnecke) entwickelt, der der Schallwahrnehmung dient.
- Die Sinneswahrnehmung von Schall durch Lebewesen wird als Hören, auditive, aurale oder akustische Wahrnehmung bezeichnet. Aufgabe des Hörorgans ist es, Schallwellen aus der Umgebung aufzunehmen, wenn nötig zu verstärken und in Nervenimpulse umzuwandeln, die das Gehirn dann interpretieren kann. Je nach Spezies und deren Abhängigkeit von der Wahrnehmung bestimmter Frequenzbereiche existieren verschiedene anatomische Variationen.

Akustik



Abb. 2: Abhöranlage

Quelle: www.laemspur.ch/laemspur/modul_akustik/index-akustik.htm

Definition: Wikipedia

Die Akustik (gr. ακούειν akoyein "hören") ist die Lehre vom Schall und seiner Ausbreitung. Als Wissenschaftsgebiet umfasst sie sämtliche damit zusammenhängenden Gesichtspunkte, wie die Entstehung und Erzeugung, die Ausbreitung, die Beeinflussung und die Analyse von Schall. Weiterhin sind auch die Wechselwirkung von Schall mit Materialien sowie die Wahrnehmung von Schall durch das Gehör und seine Wirkung auf Menschen und Tiere Gegenstand der Akustik.

Die Akustik ist ein interdisziplinäres Fachgebiet, das auf Erkenntnissen aus zahlreichen anderen Fachgebieten aufbaut, unter anderen der Physik, der Psychologie, der Nachrichtentechnik und der Materialwissenschaft.

Um das Hören zu Verstehen ist ein grundlegendes Verständnis verschiedener physikalischer Grundprinzipien unumgänglich. Auf diese Punkte soll nachfolgend eingegangen werden.

Akustik

Was ist Schall?

- Unter Schall versteht man die Ausbreitung einer mechanischen Schwingung in Raum und Zeit. Als Medium fungiert hier meist die Luft, aber auch unter Wasser und durch Gegenstände kann sich Schall verbreiten. Schwingung ist die periodische Hin- und Herbewegung um eine Ruhelage (Abb. 3).

Anmerkung:

Im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen - hier spielen Photonen eine Rolle - sind Schallwellen an Materie gebunden und breiten sich daher im Vergleich zu Licht relativ langsam aus.

- Damit sich Schall überhaupt bilden kann, ist ein schwingender Körper (Quelle = Emitter) notwendig, von dem die Welle mit einer bestimmten Kraft (Schall-Leistung in Watt) erzeugt wird. Diese wirkt auf die umgebenden Moleküle abhängig von deren Dichte unterschiedlich stark.
- Moleküle mit niedriger Dichte können leichter beschleunigt werden; Moleküle mit höherer Dichte schwerer. Die Dichte wird neben der Masse der Einzelteilchen auch vor Allem von deren Entfernung voneinander bestimmt. In einem Medium mit geringer Dichte werden sich Schallwellen in der Regel langsamer ausbreiten, da eine größere Entfernung der Teilchen überwunden werden muss, bevor der Impuls weitergeleitet werden kann. Je näher die Moleküle beieinander liegen, desto schneller breitet sie sich im Medium aus. Eine hohe Masse der Einzelteilchen erschwert dabei zunächst deren Erregung, bewirkt aber gleichzeitig, dass sich die Welle weit im Raum ausbreiten kann.

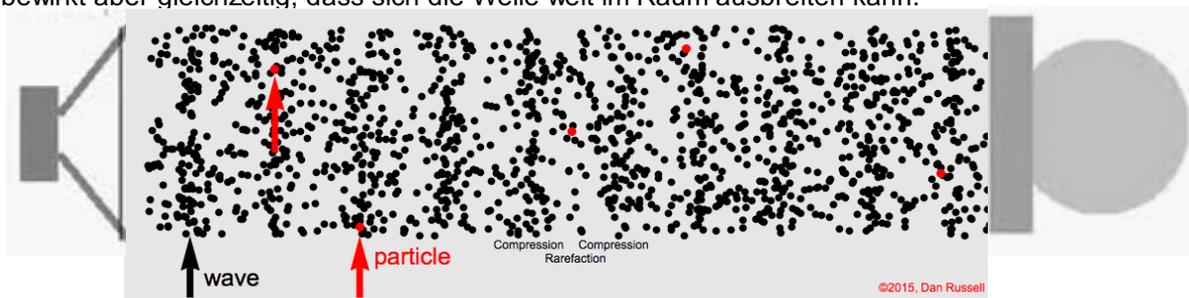


Abb. 3: Schallausbreitung als Longitudinalwelle

Im Schallträger - z.B. Luft - befinden sich kleine Gasmoleküle, die in Abbildung 3 als schwarze Kügelchen dargestellt sind. Die ersten, rechts von der Lautsprechermembran liegenden Luftmoleküle folgen der Bewegung der Membran. Sie stoßen dabei an benachbarte Gasteilchen und prallen zurück. Sie schwingen um den Ort ihrer ursprünglichen Lage (siehe roter Punkt) und bilden auf diese Weise eine sich voranbewegende Wellenfront die man als Longitudinalwelle bezeichnet.



Abb. 4 Wassertropfen u. Wellenausbreitung

Quelle: <http://www.youtube.com/watch?v=m3x7KF4qoVw>

Dieses Verhalten ist mit einer Wasserwelle vergleichbar, die entsteht, wenn man ein beliebiges Objekt auf eine Wasserfläche fallen lässt (Abbildung 4 zeigt einen fallenden Wassertropfen).

Durch Wasserverdrängung entsteht eine Welle, die sich vom Eintrittsort nach aussen ausbreitet und dabei abschwächt.

Je grösser die Masse resp. der Membranausschlag, umso stärker der Verdrängungseffekt und umso weiter breitet sich die Welle in die Umgebung aus.

In einer Schall(druck)welle beliebiger Wellenlänge (griech. Lambda: λ) wechseln sich Bereiche mit hohem und niedrigem Druck (bezogen auf den atmosphärischen Druck) ab (Abbildung 5). Bereiche mit hoher Dichte zeigen sich dabei als Wellenberge, die mit mit niedriger Dichte als Wellentäler. Da unter Wellenlänge der kleinste Abstand zweier Punkte gleicher Phase einer Welle bezeichnet werden, eignen sich diese Punkte besonders gut zur Wellenlängenbestimmung.

Erreichen die sich bewegenden Teilchen die Membran eines Mikrofons, lassen sich die entstehenden Druckveränderungen, die die Verschiebung der "Luftteilchen" verursachen und zu Bereichen mit hoher und niedriger Teilchendichte führen, mit Hilfe eines Oszilloskops sichtbar machen. Die empfangene Schallwelle führt im Gerät zu Spannungsschwankungen, die am Bildschirm als wandernder Lichtpunkt ausgegeben wird. Man erhält eine Kurve die sich mathematisch im einfachsten Fall als Sinusfunktion beschreiben lässt.

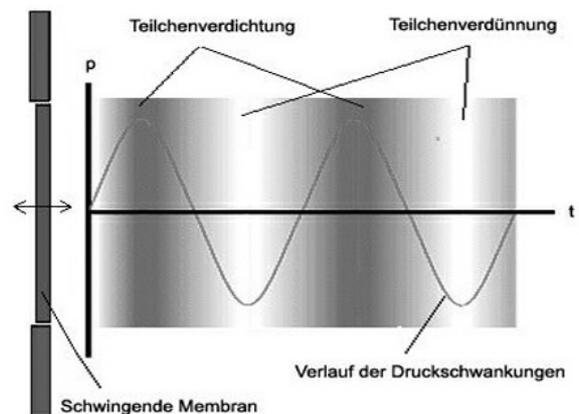
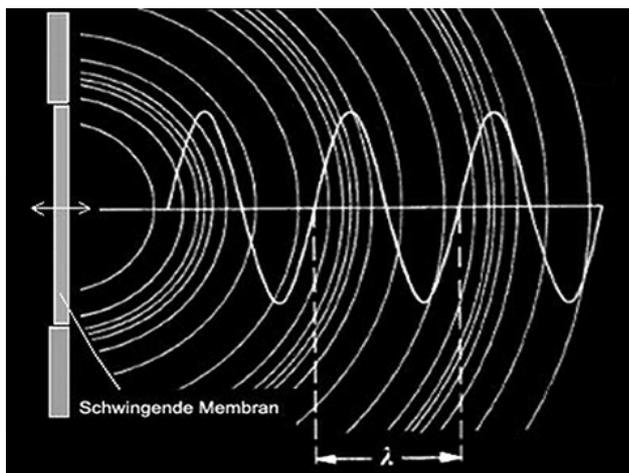


Abb. 5 Schallwellenentstehung / Auszug aus: Sound Waves And Their Sources (1933)

Quelle: <http://www.youtube.com/watch?v=3CYw2z3OPFU> (engl. Fassung)

Anmerkung zum besseren Verständnis:

Stellen Sie sich eine Boje auf dem Meer vor.

Bei stärkerem Wellengang bewegt sich die Boje auf und ab.

Betrachtet man nun einen Bleistift und setzt den an dessen Ende befindlichen Radiergummi der Boje gleich, kann man die auf dem Oszilloskop entstehende Welle wie folgt nachbilden:

- Setzen Sie den Stift so auf ein Blatt Papier als wollten Sie schreiben
- Bewegen Sie den Stift vertikal auf und ab
- Bitten Sie nun einen Komilitonen das Blatt nach links wegzuziehen
- Was sehen Sie auf dem Blatt Papier? (Antwort: eine Welle, ganz wie auf dem Oszilloskop!)

Akustik

Schallcharakterisierung

Schall scheint sich über seine drei hörbaren Eigenschaften Lautstärke, Tonhöhe und Klangfarbe charakterisieren zu lassen. Nicht jede dieser Eigenschaften ist jedoch tatsächlich dafür geeignet.

Lautstärke

...die erste Größe, die dem Betrachter zur Beurteilung von Schall in den Sinn kommt, ist, als innere Empfindung des äusseren Reizes Schall kein geeignetes Maß zur Beschreibung. Sie ist eine psychophysikalische Größe [E(mpfung)] die nur durch das innerliche Erleben eines Menschen bestimmbar und ohne einen empfindsamen Menschen gar nicht existent ist. Doch auch Empfindung ist nicht gleich Empfindung! Beispielsweise hört der erlebende Mensch nicht über sein gesamtes wahrnehmbares Frequenzband gleich gut. So wird der Frequenzbereich, in dem Säuglinge schreien, deutlich besser wahrgenommen, als Andere. Zudem ist die Empfindung von Lautstärke nicht nur subjektiv, sondern auch von Person zu Person unterschiedlich. Sogar bei ein und derselben Person schwankt die Wahrnehmungsfähigkeit in Abhängigkeit von der Tagesform, so werden Töne nach dem Aufstehen i.d.R. lauter empfunden als abends.

Reiz ist nicht gleich Empfindung!

Um "die Fehlerquelle Mensch" bei der Bestimmung von Schall auszuschließen wurden Messgeräte, die vom Sinneseindruck des Menschen unabhängig sind entwickelt. Erst auf diese Weise lässt sich eine Schallwelle objektiv und eindeutig erfassen.

1 Hz = 1 Schwingungsperiode / Sekunde

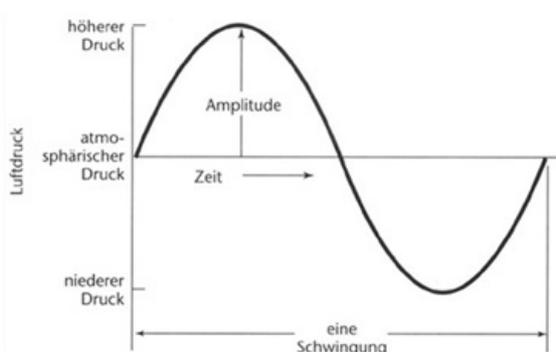


Abb. 6: Parameter zur Charakterisierung von Schall

die

Frequenz

(Anzahl der Schwingung pro Zeit = Tonhöhe)

und die

Amplitude

(Höhe der Schwingung = Schalldruck, laut-leise) beschreiben.

Anmerkung:

Die nähere Erläuterung dieser Parameter folgt auf den nachfolgenden Seiten.

Ob ein Ton hoch oder tief klingt, hängt von seiner Frequenz ab, d.h. wie oft eine Welle pro Zeiteinheit schwingt. Die Amplitude, d.h. die Höhe des Wellenberges bestimmt, wie groß der Druck ist, den eine Welle aufbauen kann, und damit, wie laut wir einen Ton hören. Je größer der Druck der Welle, umso mehr wird die Luft durch sie komprimiert und desto lauter empfinden wir sie. Ein Oszilloskop wandelt Schallwellen bei deren Kontakt mit der Membran eines angeschlossenen Mikrofons über die entstehende Spannungsänderungen in optische Wellenbilder um.

Derartige Wellenbilder lassen sich auch mit einem "virtuellen Tongenerator" erzeugen, an dem Sie die Herzzahl (Frequenz) und die Spannung (Amplitude) verändern und die resultierenden Effekte beurteilen können. Im Versuchsaufbau sehen einen Tongenerator, einen Lautsprecher und das Oszilloskop.

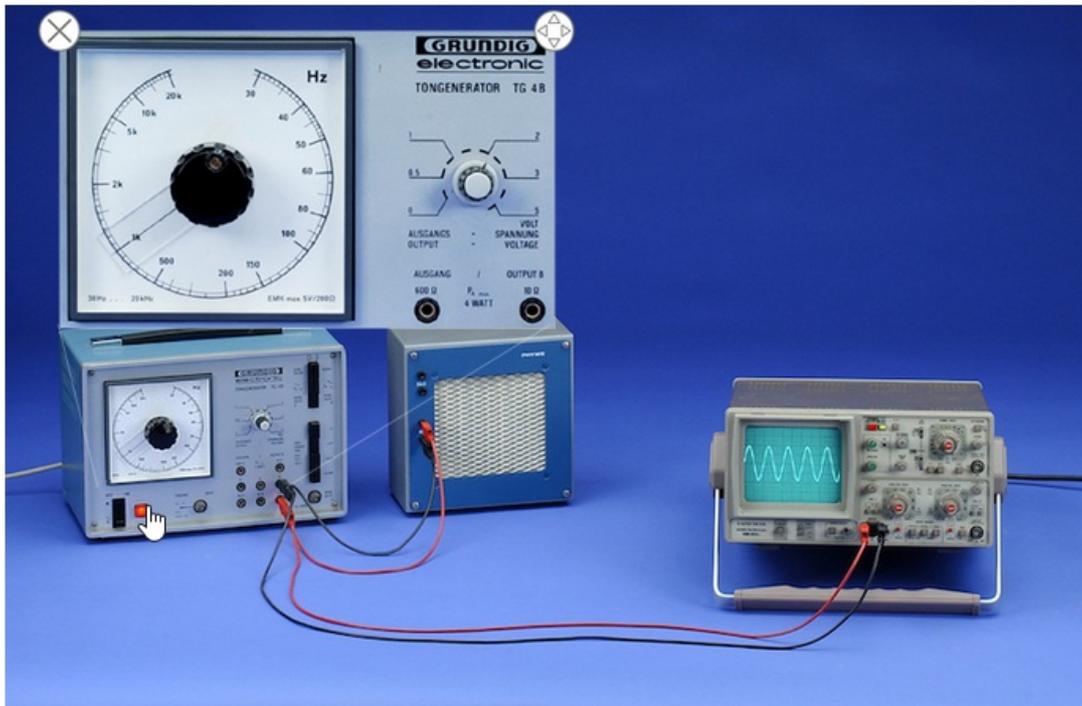


Abb. 7: Schallfrequenz und Amplitude bei 1KHz und 2 Volt Ausgangsspannung
in tetfolio: Interaktives Bildschirmexperiment

Geschwindigkeit



Abb. 8: Schall sichtbar machen

Die Schallgeschwindigkeit (= Ausbreitungs- bzw. Phasengeschwindigkeit von Schall) (Messgröße = c) ist eine unsichtbare Größe, die mittels eines geeigneten Versuchsaufbaus (Abb. 8) sichtbar gemacht werden kann.

Entlang einer ausreichend langen Strecke werden Fahنشwenker postiert.

Am Anfang der Strecke wird ein Ton erzeugt. In dem Moment, in dem der Fahنشwenker den Ton hört, wird die Fahne gehoben. Auf diese Weise zeigt sich dass sich der Schall vom Quellort in einer bestimmten Geschwindigkeit entfernt. Zudem wird deutlich, dass die Schallgeschwindigkeit unabhängig ist von Tonhöhe oder Lautstärke. Diese Parameter haben nur Einfluss die Länge der Strecke, die der Schall zurücklegen kann bis er so weit abgeschwächt ist, dass er nicht mehr wahrgenommen werden kann.

Je tiefer (langwelliger) und lauter der Ton, umso weiter pflanzt er sich fort.

Obleich von Tonhöhe und Lautstärke unbeeinflusst, ist auch die Schallgeschwindigkeit kein geeigneter Parameter zur Schallcharakterisierung, da eine Schallwelle nicht umgebungsunabhängig, sondern von Temperatur und Dichte des Mediums in dem sie sich ausbreitet beeinflusst wird.

Aus diesem Grund kommt es manchen an lauen Sommerabenden auch so vor als würde man mehr bzw. besser hören. Das liegt daran, dass jede Schallwelle legt bei 20°C Temperatur in Luft 343 Meter/Sekunde zurücklegt. Kühlt die Luft ab, nimmt die Dichte der Luft zu. Aufgrund dieser Dichtezunahme setzt das Medium der sich ausbreitenden Welle mehr Widerstand entgegen und die Schallgeschwindigkeit nimmt ab. Die Schallgeschwindigkeit reduziert sich auf diese Weise bei 0°C kalter Luft auf 331,5 m/s. Die Eselsbrücke 333 Meter/Sekunde gilt bei einer Temperatur von 3°C.

Das widerspricht den Messergebnissen, wonach mit der zunehmende Dichte eines Trägermediums die Schallgeschwindigkeit zunimmt. Hier muss man jedoch die Ausgangskraft berücksichtigen die überwunden werden muss um ein Schallereignis auszulösen. Da sie im oben beschriebenen Fall jedoch nicht in dem Maß zunimmt, wie die Dichte, sondern gleich bleibt, reduziert sich hier die Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Amplitude / Lautstärke

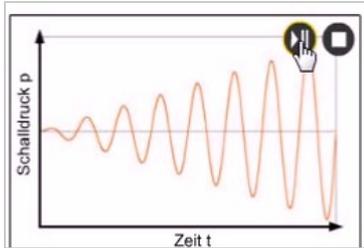


Abb. 9: Einfluss des Schalldrucks auf die Lautstärke

Quelle: <http://www.laemorama.ch>

Jede Schallquelle emittiert Schall mit einer bestimmten Leistung. Diese Leistung wird in Watt pro Fläche (m^2) gemessen. Die Stärke der Leistung, mit der das umgebende Medium mechanisch beeinflusst wird bestimmt die Höhe der entstehenden Welle.

Je größer die Ausgangskraft, desto höher die Welle. Die maximale Auslenkung einer Welle von der Ruhelinie bezeichnet man als Amplitude. Je höher die Amplitude, umso lauter wird ein Schallereignis empfunden.

Die Schallemission als "Ursache" führt im aufnehmenden System z.B. der Membran eines Mikrofons zu einer bestimmten Wirkung. Es kommt zu einer Abweichung vom vorherrschenden atmosphärischen Druck. Dieser Druckunterschied wird als Schalldruck (p = pressure) bezeichnet, der in Pascal = Kraft pro Fläche (Newton/m^2) angegeben wird.

Dabei ist die Wirkung auf das aufnehmende System d.h. der Effekt abhängig vom Abstand zur Schallquelle und den akustischen Eigenschaften des Raums, in dem sich die Wellen ausbreitet. Sie nimmt mit steigender Entfernung von der Quelle ab.

Treffen Wellen aufeinander, beeinflussen sich. Sie können sich ablenken, verstärken, aber auch abschwächen.

Sind die betreffenden Wellen gegeneinander gerichtet [die eine Welle kommt von rechts (cyan), die andere von links (blau)] ansonsten aber gleichartig, sind die Wellen kurzzeitig deckungsgleich (Abb. 1).

In den Zeitbereichen, in denen sie nicht deckungsgleich sind, beeinflussen sich die Vektoren (Ausrichtung) der Wellen wie folgt:

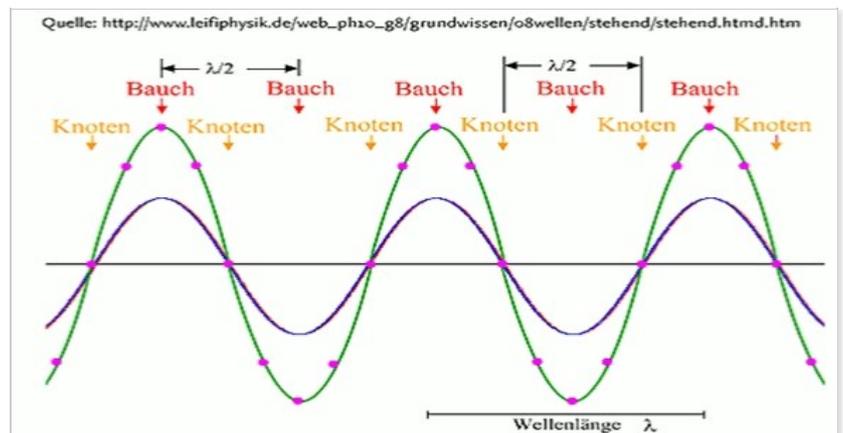


Abb. 10: Prinzip einer stehenden Welle

Es kommt zu einer Verstärkung der Resultierenden (grün).

Derartige Wellen haben eine Besonderheit. An den Punkten, an denen sie sich schneiden, werden die Luftpartikel nicht bewegt.

Die Welle steht!

Dreht man die Schallquellen um 90°, sie strahlen nun von oben nach unten resp. unten nach oben und bringt in den Bereich der Knotenpunkte geeignetes nicht zu schweres Material, hebt die Kraft des Schalls die Erdanziehung auf und der Gegenstand schwebt (Levitation).



Abb. 11: Prinzip der Levitation durch Schall

Quelle: <http://www.3sat.de/mediathek> - Schweben per Schall

Akustik - Schallcharakterisierung

Frequenz / Tonhöhe

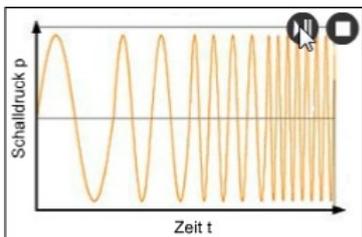


Abb. 12: Einfluss der Frequenz auf die Tonhöhe
 Quelle: <http://www.laemorama.ch>

Die Frequenz (f) = die Zahl der Wellen pro Zeiteinheit bestimmt, wie hoch oder tief ein Ton klingt.

Die Frequenz wird in der Einheit **Hertz (Hz)** - benannt nach dem deutschen Physiker Heinrich Hertz (1857-1894) - angegeben. Durchläuft eine Welle ein Medium einmal pro Sekunde spricht man von einem Hertz.

1 Hz = 1 Schwingung/Sekunde

Im Abbildung 13 wird der Einfluss der Größe einer Stimmgabel d.h. die Zunahme der Wellenlänge dargestellt.

Die große obere Stimmgabel bildet eine längere Welle, die Kleine untere eine kurze.
 Je kürzer die Welle d.h. je höher die Frequenz, desto höher wird ein Ton wahrgenommen.

Je länger die Welle, d.h. je niedriger die Frequenz, desto tiefer klingt der Ton.

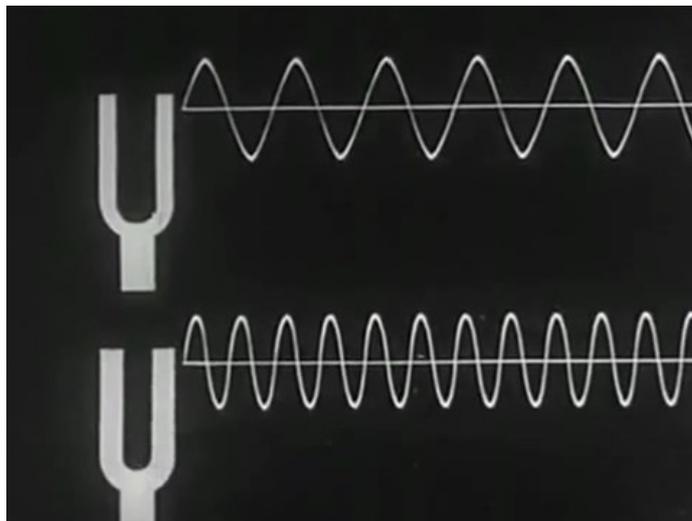


Abb. 13: Zusammenhang Wellenlänge und Tonhöhe
 Auszug aus: Sound Waves and Their Sources
 Quelle: <http://www.youtube.com/watch?v=3CYw2z3OPFU>

**Die Änderung der Frequenz hat keinen Einfluß auf die Schallgeschwindigkeit.
 Die Schallgeschwindigkeit ist für jedes Schallereignis gleich!**

Die Änderung der Frequenz hat jedoch Auswirkung auf die Wellenlänge und damit auf die Reichweite einer Schallwelle. Je langwelliger (tieftoniger) eine Welle ist, umso weniger leicht schwächt sie sich bei ihrer Ausbreitung ab und umso weiter wird sie übertragen; je kurzwelliger (hochtoniger), umso stärker schwächt sie sich ab und umso weniger weit wird sie übertragen (Bsp. Kommunikation zwischen Blauwalen).

Beispiel:

Betrachtet man eine Welle mit der Frequenz von 1 Hz, so hat diese eine Wellenlänge von 343 m, eine Welle von 1000 Hz dagegen nur 0,343 m. Beide Wellen breiten sich jedoch mit der gleichen Geschwindigkeit (c) im betreffenden Medium aus.

Sie können sich den Zusammenhang mathematisch verdeutlichen.

Über $f = \frac{c}{\lambda}$ bzw. $\lambda = \frac{c}{f}$ lässt sich aus der Frequenz die Wellenlänge und der Wellenlänge die Frequenz bestimmen; vorausgesetzt die Umgebungsbedingungen z.B. Ausbreitungsgeschwindigkeit $c = 343$ m/s bei 20°C sind bekannt.

Akustik - Schallcharakterisierung

Ton / Klang (-farbe) / Geräusch

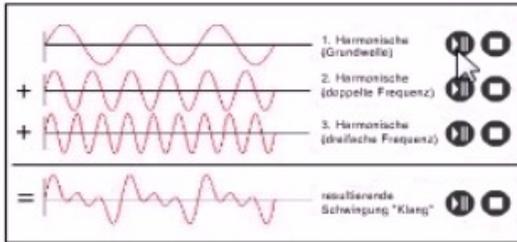


Abb. 14: Vom Ton zum Klang
Quelle: <http://www.laemorama.ch>

Aus einem Grundton = der periodischen Wiederholung einer Frequenz (monofrequent = Sinuston) entsteht in Kombination mit seinen Obertönen ein Klang. Derartig reine Töne lassen sich nur elektronisch generieren.

Der von einem Instrument z.B. einer Geigenseite entwickelte Ton setzt sich immer aus verschiedenen Tönen, dem Grundton und seinen Obertönen zusammen und ist daher im eigentlichen Sinn kein Ton mehr sondern bereits ein Klang. Da die meisten Menschen diesen Klang aber einfrequent wahrnehmen, spricht man im musikalischen Umfeld auch hier (eigentlich unkorrekt) von Ton.

Eine Seite schwingt nie nur in Ihrem Grundton, sondern immer auch mit einem ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz. Auf diese Weise entstehen die sog. Obertöne (Abb. 15).

- Die Verdoppelung der Grundfrequenz erhöht einen Ton um eine Oktave.
- Die Vervielfachung um zwei Oktaven.
- Eine Verdreifachung bildet die Quinte.

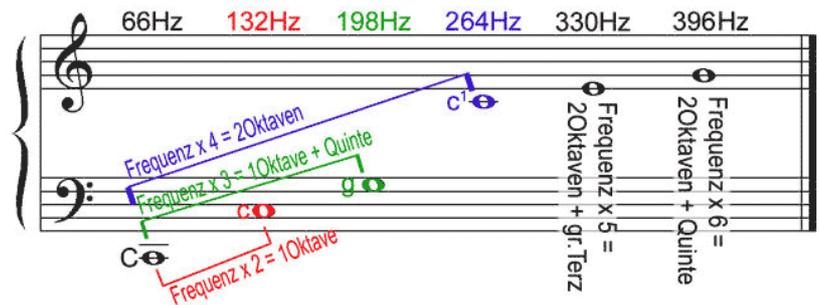


Abb. 15: Obertonentstehung



Abb. 16: Klangfarbe in Abhängigkeit vom Material
Auszug aus: Sound Waves And Their Sources (1933)
Quelle: <http://www.youtube.com/watch?v=3CYw2z3OPFU>

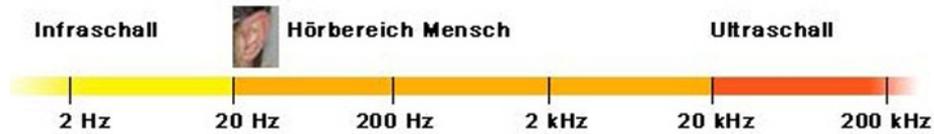
Werden Töne aneinandergerei entsteht eine Tonfolge; man spricht von Melodie. In Abhängigkeit von der Art der Tonbildung und des an der Tonbildung beteiligten Werkstoffs entwickelt sich die Klangfarbe.

Im Gegensatz zu Ton oder Klang sind Geräusche nicht-periodische Frequenzkombinationen des täglichen Lebens, d.h. Wellen, deren Struktur sich zeitlich ändert.

Akustik

Hörbereiche

Unter Hörbereich wird der Frequenzbereich verstanden, in dem das Gehör Schall wahrnimmt. Dabei ist der Hörbereich jedes Menschen individuell verschieden, d.h. nicht jeder Mensch hört jede Frequenz gleich gut resp. schlecht. Junge Menschen hören von unter 20 bis deutlich über 16.000 Hz.



Quelle: http://mediaserver.planet-schule.de/data/richmedia/filme_multimedial/swr_ohren/

Abb. 17: Schallarten und Hörbereich des Menschen

Quelle: <http://www.laemorama.ch>

Um ein Gefühl für die eigene Hörfähigkeit zu bekommen, kann man mit einfachen Tests die Eckwerte der eigenen Hörfähigkeit bestimmen.

Neben den individuellen Wahrnehmungsunterschieden gibt es auch bei den verschiedenen Tierarten gewaltige Unterschiede, die der Mensch oftmals sogar zu seinem Vorteil nutzt. So hören Hunde die Hundepfeife (16.000 Hz bis 22.000 Hz), die den meisten von uns (ausgenommen Säuglinge und Kleinkinder!) verborgen bleibt.

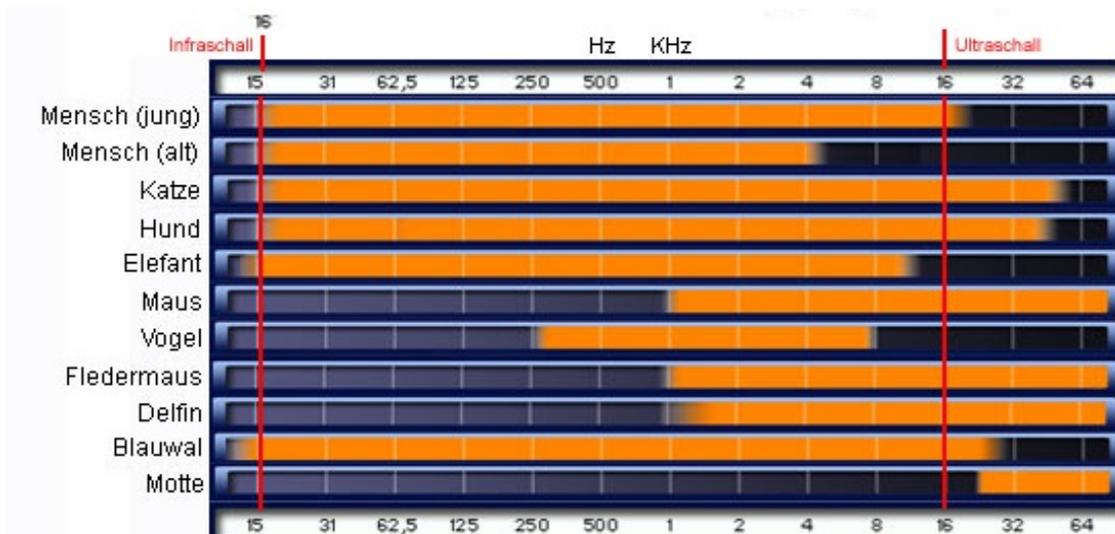


Abb. 18: Übersicht über die verschiedenen Hörbereiche von Mensch und Tier

Quelle: <http://www.laemorama.ch>

Mäuse nutzen den Bereich über 16 KHz (ab 20 kHz = Ultraschall) den auch Hunde und Katzen hören können (Jagd) zur Verständigung. Blauwale, aber auch Elefanten, kommunizieren im Bereich unter 16 Hz (unter 20 Hz = Infraschall) Weder zur Wahrnehmung von Ultra- noch Infraschall benötigen die betreffenden Tierarten zusätzliche Hörorgane! Die Wahrnehmung auch dieser für den Menschen i.d.R. unhörbaren Schallvarianten erfolgt durch das "normale" Gehör!

Wie Tiere im Vergleich zum Menschen ihre Umwelt über das Gehör wahrnehmen, kann man in Simulationsversuchen im virtuellen Hörlabor auf den Grund gehen.



Abb. 19: Hörlabor
in tet.folio: interaktive Flashanimation
Quelle: www.planet-schule.de

Im in Abbildung 19 dargestellten virtuellen Hörlabor werden unsere tierischen Artgenossen einem Hörtest unterzogen und ihre Hörleistung mit der unseren verglichen.

Erster Testkandidat ist die Maus (= das 3. Lebewesen der Serie) und als Geräusch ein Paukenschlag ausgewählt. Der Startknopf löst die Generierung des gewählten Geräuschs aus. Der zwischen den Lautsprechern befindliche schwarze Block bleibt leer. D.h. die Maus kann diesen Frequenzbereich (es liegt in einem Frequenzspektrum zwischen ca. 100 und 480 Hz.) nicht hören.

Anstelle verschiedener Geräusche kann man auch die verschiedenen Hz bzw. kHz-Vorgaben wählen und den Effekt auf die gewählte Tierart beobachten.

Innerhalb des Hörlabors können folgenden Lebewesen an dem Test teilnehmen:

Mücke, Motte, Maus, Vogel, Fledermaus, Katze, Hund, Elefant, Delfin und Blauwal.

Akustik

Die Mathematik der Sinneswahrnehmung

Obgleich jedes Empfinden subjektiv ist, gibt es doch für manche Fragestellungen objektive Gesetzmäßigkeiten.



Abb. 20:
Ernst Heinrich Weber
(1795-1878)

Der Physiker Gustav Theodor Fechner, der Begründer der "Psychophysik" war 1850 der Erste, dem es gelang, der innerlichen Empfindung (E) eine sinnvolle Meßskala zuzuordnen. Er griff hierzu auf die Arbeiten des Physiologen und Anatomen Ernst Heinrich Weber zurück, der 1834 Versuche anstellte, um den Messbereich und die Empfindlichkeit der menschlichen Sinnesorgane zu erfassen. Ihm gelang es die von Weber experimentell gewonnenen Daten mathematisch zu beschreiben.



Abb. 21:
Gustav Theodor Fechner
(1801-1887)

In den nachfolgenden Seiten wird näher auf ihre Arbeit und den mathematischen Zusammenhang der Sinneswahrnehmung eingegangen.

Weber

Weber erkannte, dass die Unterschiedsschwelle = der eben merkbare Reizunterschied d.h. der kleinste noch wahrnehmbare Unterschied eines Sinneseindrucks - nicht konstant, sondern vom Ausgangsreiz abhängig ist. Er stellte fest, dass Reizveränderung zu Ausgangsreiz in einem bestimmten Verhältnis stehen muss, um vom Individuum auch als Veränderung erkannt zu werden.

Weber'sches Gesetz:

Die Unterschiedsschwelle zweier Reize ist proportional zur Größe des Standardreizes; d.h. je größer der Standardreiz umso größer muss auch der notwendige Unterschied zum Vergleichsreiz sein um als Abweichung (Reizschwankung) erkannt werden zu können.

Weber's Gesetz am Beispiel der Gewichtsbeurteilung

Weber fand bei seinen Untersuchungen zur Gewichtsempfindung den Quotienten $k = 1/50 = 0,020$. Dieser besagt, dass im Falle von zwei Gewichten, die beiden Gewichte um 2% differieren müssen, damit man sie noch als verschieden schwer erkennen kann.

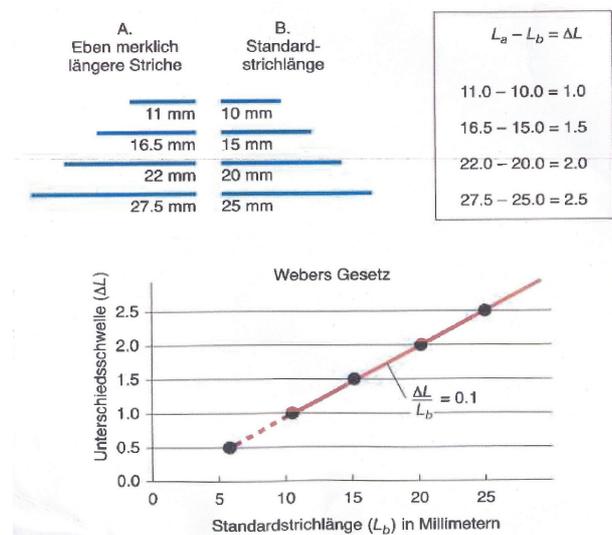
Hebt man beispielsweise ein Gewicht von 1 kg muss das zweite Gewicht 2% d.h. 20 g schwerer sein, hebt man 10 kg müssen es 200 g mehr sein um einen Gewichtsunterschied wahrnehmen zu können. Die Unterschiedsschwelle (= der kleinste noch wahrnehmbare Unterschied) von 1000 g nach 1020 g ist genauso groß bzw. hat das gleiche Verhältnis wie von 10.000 g nach 10.400 g!

Der gerade noch wahrnehmbare Unterschied zwischen zwei Gewichten ist also - bei mittleren Intensitäten (d.h. nicht zu schwer oder zu leicht) - in einem (annähernd) konstanten Verhältnis zur Größe des Referenzgewichts.

Weber's Gesetz am Beispiel der Strichlängenbeurteilung

Je länger der Referenzstrich, desto größer ist die hinzuzufügende Länge (ΔL) von Vergleichsstrichen, um einen eben merklichen Unterschied zu erzielen. Die Unterschiedsschwelle ist die jeweils zu addierende Länge, damit in je der Hälfte der Fälle ein Unterschied erkannt wird. Wenn dieser Zuwachs gegen die steigende Länge der Referenzstriche aufgetragen wird, bleibt der Quotient gleich. Der benötigte Zuwachs ist immer ein Zehntel der Standardlänge. Die Beziehung ist linear, was sich in Abbildung als Gerade ausdrückt.

Danach kann man vorhersagen, dass ΔL bei einem Referenzstrich von 5 Millimetern 0,5 Millimeter betragen wird.



Tab. 2: Eben merkliche Unterschiede und Webers Gesetz

In welchem Verhältnis die beiden Reize zueinander stehen, ist für jede Reizmodalität unterschiedlich. Weber gibt das jeweilige Verhältnis mit Hilfe des Wertes k , der Weber-Konstante an.

$$k = \frac{\Delta p}{p} = \textit{konstant}$$

Δp = Reizunterschied, relative Reizzunahme
 p = Reiz

Gleichung: 1: Weberkonstante k

Für jeden Sinn hat sich ein anderer Wert als zutreffend erwiesen (Tab. 1).

Hinweis zur Interpretation des k -Wertes:
 Je größer die Weber-Konstante, umso mehr Veränderung ist nötig, um einen Unterschied zu spüren.

Reiz	Weber-Konstante	
Gewicht	$k = 0,020$	2,0 %
Lautstärke	$k = 0,048$	4,8 %
Helligkeit	$k = 0,079$	7,6 %
Salzgeschmack	$k = 0,083$	8,3 %
60 Hz	$k = 0,036$	3,6 %
120 Hz	$k = 0,046$	4,6 %

Tab. 1:
 Weberkonstante bei verschiedenen Sinnen

Akustik - Die Mathematik der Sinneswahrnehmung

Fechner

Fechner leitete aus Webers Ansatz die fundamentale Gesetzmäßigkeit ab, wie ein Mensch die Welt erlebt. Er drückte das mit seinen Worten wie folgt aus:

"Ein Thaler hat viel weniger Wert für einen Reichen als für einen Armen und wenn er den Bettler einen Tag lang glücklich macht, so wird er als Zuwachs zum Vermögen eines Millionärs gar nicht merklich von diesem gespürt."

Schlussfolgerung:

Die Empfindung "Reichsein" wächst nicht gleichmäßig mit der Geldmenge, die man besitzt!

Reiz-Empfindungs-Funktion
p(E)

bezogen auf die Reizschwelle: $E = 0$

$$p(E) = p(0) * (1 + k)$$

p_0 = Reizstärke der Empfindung zum Nullpunkt
 k = Weberkonstante

Gleichung: 2: Reiz-Empfindungs-Funktion

Basierend auf den Arbeiten von Weber gefundenen Gesetzmäßigkeiten erkannte Fechner, dass eine durch Reiz ausgelöste Empfindung gemessen werden kann, indem die direkt messbare Reizstärke mit einer Skala von Empfindungsgrößen in Bezug gebracht wird

Unter besonderer Berücksichtigung der Weberkonstanten k entwickelte Fechner die Weber-Fechnersche "Reiz-Empfindungs-Funktion" ausgedrückt als $p(E)$, bei der $p(0)$ die Reizstärke eines gewählten Nullpunkts der Empfindungsstärke (E) d.h. dem Punkt ist, ab dem ein Reiz gerade nicht mehr empfunden wird (**absolute Reizschwelle = Nullpunkt**) ist. D.h. alle alle Reize die unterhalb dieser Reizschwelle liegen, haben die Empfindung $E = 0$ zur Folge.

Bei starken Empfindungen muss der äussere Reiz sehr stark vergrößert werden, um eine Zunahme der Empfindung zu bewirken.

Beispiel zum besseren Verständnis:

Soll die Helligkeit in einem Zimmer vergrößert werden, hat bei dämmriger Beleuchtung eine Kerze eine große Wirkung; ist der Raum dagegen hell wird die Kerze nicht bemerkt

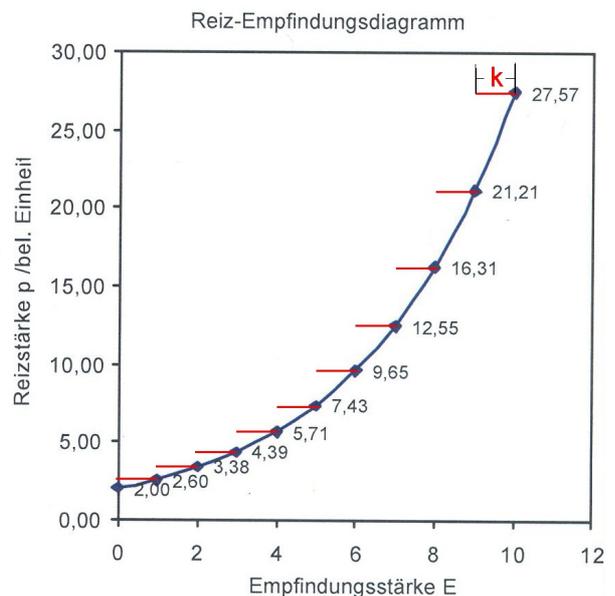


Abb.: 22: Reiz-Empfindungsdiagramm

Im täglichen Leben interessiert meist die Umkehrfunktion ausgedrückt als $E(p)$ des obigen Zusammenhangs also die Aussage, wie groß die Empfindungsstärke (E) bei vorgegebener Reizgröße (p) ist.

Empfindungs-Reiz-Funktion $p(E)$

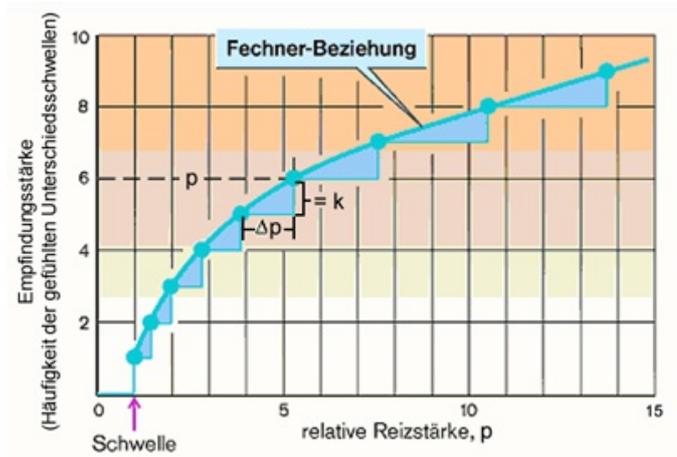
$$E(p) = \frac{1}{\log(1+k)} \log \frac{p(E)}{p(0)}$$

$$E(p) = K * \log \frac{p(E)}{p(0)}$$

Gleichung: 3: Empfindungs-Reiz-Funktion

das Schaubild macht deutlich, dass bei kleinen Reizstärken die Sinnesorgane sehr empfindlich sind:

Eine kleine Zunahme der Reizstärke (p) hat eine starke Zunahme der Empfindung (E) zur Folge. Bei großen Reizstärken verhält es sich genau umgekehrt. Hier muss, um eine Verstärkung der Empfindung zu erreichen, der Reiz **erheblich** verstärkt werden.



Fechner ermittelte, dass die Intensität eines Tons verzehnfacht werden muss, um eine Verdoppelung des Lautstärkeempfindens um eine Einheit zu erhalten.

$$E(p) = K * \frac{10^5 * p(0)}{p(0)}$$

für $p_0 = 100.000 = 10^5$ mal größer als die Reizschwelle $p(0) = K * 5$ also die 5-fache Empfindung

Bezogen auf nebenstehendes Beispiel bedeutet das, dass ein Ton um das 100.000-fache verstärkt werden muss, um eine 5-fach lautere Empfindung zu bewirken!

Er erkannte erstmals den logarithmisch / linearen Zusammenhang zwischen Reiz und Empfindung. Nicht der Reiz wird empfunden, sondern der Logarithmus des Verhältnisses der Reizgröße zu seinem Schwellenwert

= Weber-Fechner'sches Gesetz

Was bedeutet logarithmieren hier?

Eine Stufe / 10-er Potenz auf der Reizwerteskala entspricht einer Verdoppelung auf der dezimalen Empfindungsskala.

Akustik - Die Mathematik der Sinneswahrnehmung

Bel / Dezibel

Da Empfindung an sich keine Maßeinheit hat, aber nach dem weber-fechnerschen Gesetz gleichmäßig mit dem Logarithmus des Reizverhältnisses wächst, wurde das erstmals bereits in der Telefonie als Dämpfungmaß verwendete Bel (B) als Hilfsmaßeinheit herangezogen.

Beim Bel handelt es sich um den dekadischen Logarithmus des Verhältnisses zweier gleichartiger physikalischer Größen.

Das Bel definiert das Verhältnis **p** (engl. proportion) zweier Leistungen P1 zu P0 (engl. Power) nach der Formel $p = \log(P1/P0)B$. Da es sich im Umfeld der Akustik um ein Pegel- (engl. level) verhältnis handelt, wird hier das Buchstabenkürzel (**L**) verwendet.

$$L = \log\left(\frac{p_1}{p_0}\right) = 1B$$

Hat der Logarithmus des Reizverhältnisses den Wert 1 bei
 $p_1 = 10 = 10^1$
 $p_0 = 1 = 1$
 so ist $p_1 10^1$ * größer als p_0

$$L = \log\left(\frac{p_1}{p_0}\right) = 2B$$

Hat der Logarithmus des Reizverhältnisses den Wert 2 bei
 $p_1 = 100 = 10^2$
 $p_0 = 1 = 1$
 so ist $p_1 10^2$ * größer als p_0

$$L = \log\left(\frac{p_1}{p_0}\right) = nB$$

Hat der Logarithmus des Reizverhältnisses den Wert n bei
 $p_1 = 10 = 10^n$
 $p_0 = 1 = 1$
 so ist $p_1 10^n$ * größer als p_0

Gleichung: 4:
 Auswirkung verschiedener Pegelverhältnisse auf die Werteausgabe in Bel

$$L = \log\left(\frac{p_1}{p_0}\right) = B = 10\log\left(\frac{p_1}{p_0}\right) dB$$

Gleichung: 5:
 Ausgabe des Schalldruckpegels ins Dezibel

Ein Dezibel ist ein Zehntel eines Bel
 $1dB = 0,1B$ bzw. $1B = 10dB$

Dezibel und Schalldruck

Da das Ohr einen sehr großen Schalldruckbereich (0,00002 Pa bis über 20 Pa) d.h. 6 Potenzen / Größenordnungen verarbeiten kann, ist die Arbeit mit der für (Schall-)Druckmessung üblicherweise verwendete Einheit Pascal unpraktisch.

Um leichter handhabbare dezimale Werte zu erhalten - diese korrespondieren gemäß Weber-Fechner mit der Lautstärkeempfindung - wird logarithmiert; d.h. eine Stufe / 10-er Potenz auf der Pa-Skala entspricht einer Verdoppelung auf der dezimalen Skala.

In linearen Systemen (das Gehör funktioniert linear) verhalten sich die Leistungsgrößen (p) proportional zu den Quadraten der einwirkenden Effektivwerte von Feldgrößen (hier: Schalldruck).

Aus diesem Grund wird quadriert:

Die so erhaltene Zahlenreihung wird als Dezibel(Db)-Skala bezeichnet.

Von der Hör- bis nahe der Schmerzschwelle umfasst diese Skala Dezibel-Werte von 0 bis 130 dB.

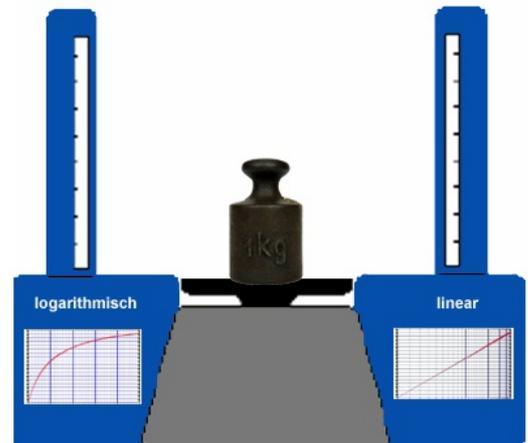


Abb.: 23: Druck linearisiert und logarithmiert

$$L = 10 \log \left(\frac{p_1^2}{p_0^2} \right) \text{ dB} = 20 \log \left(\frac{p_1}{p_0} \right) \text{ dB}$$

Gleichung: 7: Schalldruck in Dezibel

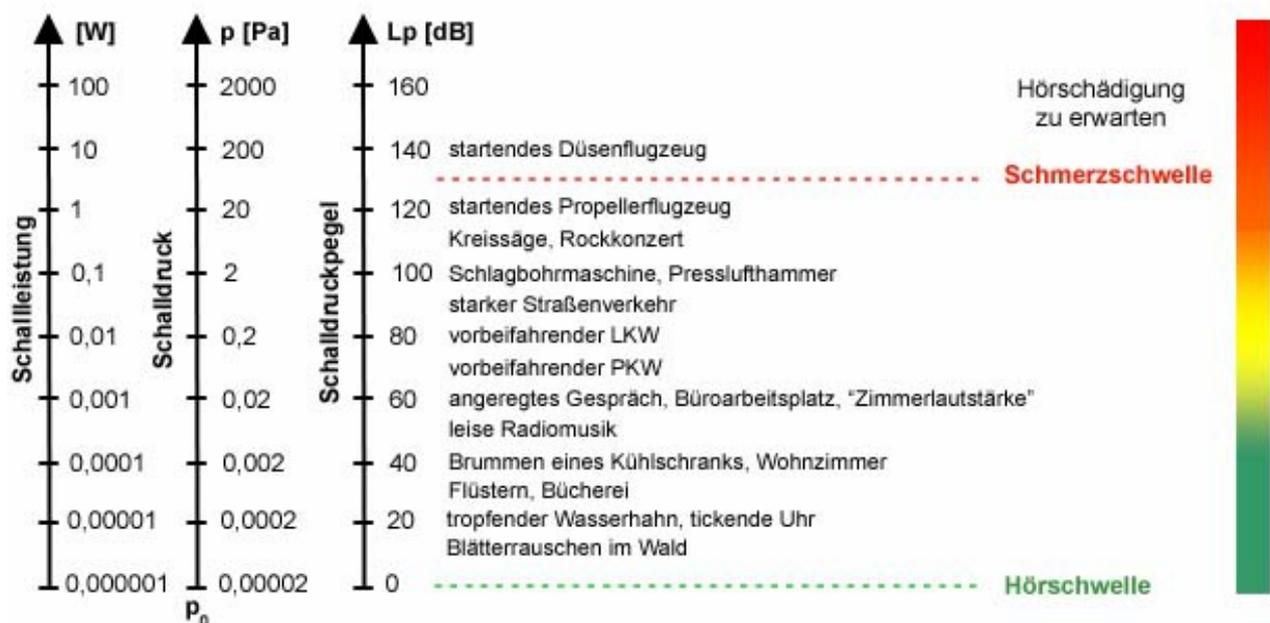


Abb.: 24: Dezibelskala mit korrespondierenden Umweltgeräuschen

Werte über 160 dB wirken nicht nur zerstörerisch auf das Gehör, sie können bis hin zu Ohnmacht und Tod führen. Bei 190 dB ist der Umgebungsdruck erreicht.

Der höchstmögliche Schalldruck, der unter normalen Umständen nicht überschritten werden kann, da der mittlere Luftdruck von 1013,25 hPa erreicht wird, ist für $L = 20 \log (101325 / 0,00002) = 194 \text{ dB}$
 Als Nullpunkt d.h. Bezugsschalldruck (p_0) = 0 dB wird der Druck herangezogen, den ein gerade noch wahrnehmbarer Ton bei 1 kHz ausübt = 0,00002 Pa.
 Der effektive Schalldruck (p) beschreibt die jeweilige Druckzunahme.

$$Schall(druck)pegel L = 20 * \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ dB}$$

p: effektiver Schalldruck [Pa]
 p₀: Bezugsschalldruck (p₀=0,00002 Pa)
 (p₀=0,00002 Pa]

Abb.: 6: Schall(druck)pegel in Dezibel

Tab.: 3:
 Einfluss der Pegeländerung auf die Lautstärke/Lautheit

Pegel-Änderung	Lautstärke Lautheit
+ 40 dB	16-fach
+ 30 dB	8-fach
+ 20 dB	4-fach
+ 10 dB	2-fach \triangleq Verdoppelung
+ 6 dB	1,52-fach
+ 3 dB	1,23-fach
± 0 dB	1-fach

Über das Dezibelmaß ergibt sich eine bessere Übereinstimmung von Schalldruck und Lautstärkeindruck eines Signals.

Merkregel:
 Der Mensch nimmt eine Erhöhung des Lautstärkepegels einer Frequenz um 10 dB immer in etwa als Verdoppelung der Lautstärke war.

Im Akustiklabor (Abb. 25) können Sie sich den Einfluss des Schalldrucks den verschiedene Töne auf Körper ausüben und welcher Schalldruckpegel wie auf ihre Lautstärkeempfindung wirkt verdeutlichen.



Abb. 25: Akustiklabor
 in tet.folio: interaktive HTML-animation
 Quelle: www.planet-schule.de

Reiz und Empfindung

Übertragen auf die Fragestellung "Wie hängt die äussere Sinneswelt mit der inneren Empfindung zusammen?" stellte Fechner also fest, dass die Empfindung (= die subjektiv empfundene Stärke eines Sinneseindrucks) mit dem Logarithmus der Reizstärke (= der objektiven Intensität des physikalischen Reizes) wächst. Das Weber-Fechner-Gesetz gilt dabei angenähert in den Mittelbereichen fast aller Sinnesgebiete.

Physiologisch bedeutet das: Damit ein Mensch Reizempfindungen als linear ansteigend empfindet, muss sich die Intensität des Reizes nach einer geometrischen Reihe ändern. Auf diese Weise kann der Mensch einen großen Messbereich mit hoher Empfindlichkeit im unteren Messbereich wahrnehmen. Im oberen Bereich wird dadurch verhindert, dass es zu einer "Übersteuerung" der Sinnesorgane kommt.

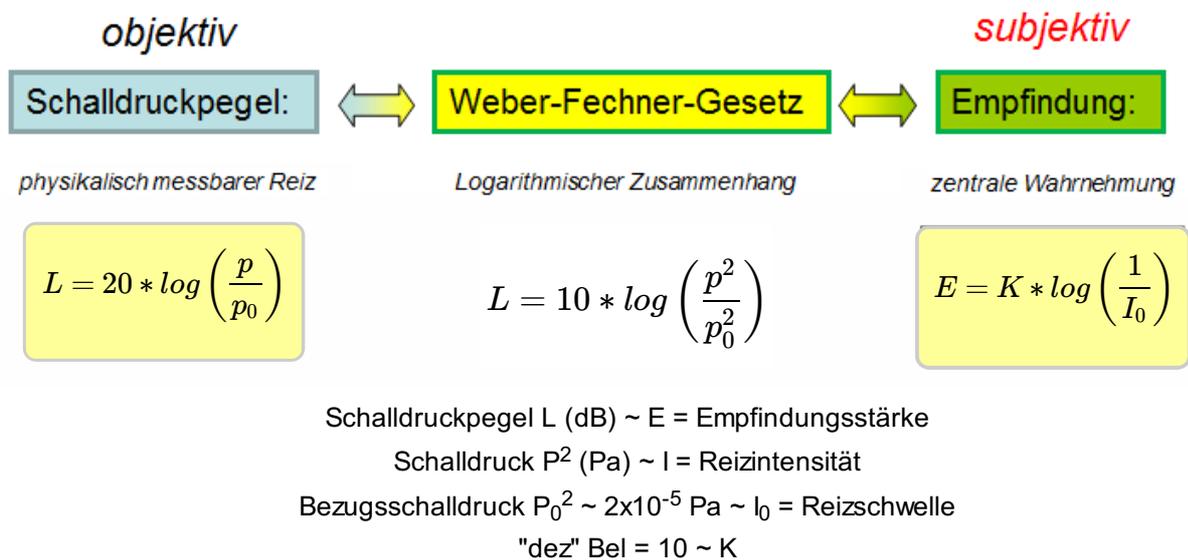


Abb.: 26: Zusammenhang Reiz - Empfindung

Akustik

Lautstärkepegel und Lautheit

Während sich die Lautstärke über den Schalldruck physikalisch und damit objektiv und eindeutig messen lässt, kann man darüber, wie laut etwas das "normale" Ohr empfindet, nur subjektive Aussagen machen. Hierzu muss die Empfindung im Rahmen von Messreihen erfasst und nachfolgend statistisch ausgewertet werden. Um Lautstärke und Empfindung in Zusammenhang zu bringen wurden die Begriffe "Lautstärkepegel" und "Lautheit" eingeführt.

Lautstärkepegel = subjektiv empfundene Vergleichsgröße für die Lautstärke

Ein Phon entspricht dabei der subjektiv empfundenen Lautstärke eines (physikalisch messbaren) Schalldruckpegels von 1db bei 1000 Hz.

gemäß dieser Definition entsprechen sich Phon- und dB-Wert bei 1000 Hz (und nur dieser Hz-Zahl)

Erläuterung:

Ausgehend von diesem Referenzsignal wird die Lautstärke anderer Schallsignale durch Vergleich ermittelt. Während ein Schalldruckpegel von 40 dB bei 1000 Hz eine Empfindung von 40 Phon bedeutet, ist diese Einheitlichkeit bei anderen Frequenzen nicht gegeben! So sind z.B. bei 3000 Hz (höhere Empfindlichkeit des Gehörs) nur 30db Schalldruck notwendig um die Empfindung von 40 Phon zu bewirken (siehe nachstehende Grafik).

Welcher Schalldruckpegel für einen Einzelton (Sinuston) bei welcher Frequenz erforderlich ist, um einen jeweils identischen Lautstärkeeindruck zu erzielen, ist in den "Kurven gleicher Lautstärkepegel" den sog. Isophonen beschrieben

Die Hörschwelle ist die niedrigste Isophone und liegt bei 0 Phon. Die 60-Phonkurve läuft durch den Sprachbereich. Die 130-Phonkurve liegt an der Schmerzgrenze.

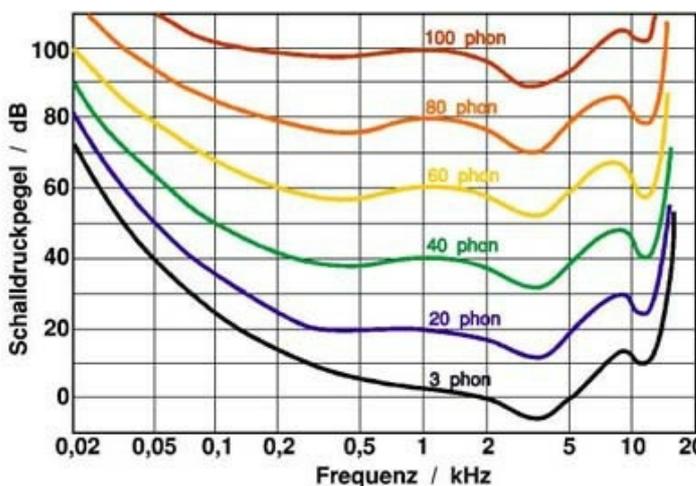


Abb. 27: Isophone

Der Lautstärkepegel unterliegt starken individuellen Schwankungen. Zwar eignet sich der Lautstärkepegel gut zur Kennzeichnung der wahrgenommenen Lautstärke eines Geräusches, doch sind Lautstärkeunterschiede damit nur unbefriedigend zu beschreiben. Während sich nämlich der Lautstärkeeindruck bei Lautstärkepegeln von mehr als etwa 40 phon bei einer Erhöhung um ungefähr 10 phon verdoppelt, bewirken unter 20 phon bereits Zunahmen um ca. 5 phon eine Verdopplung. Um diesem Umstand gerecht zu werden, wurde der Begriff Lautheit eingeführt. Einem Lautstärkepegel von 40 phon wurde willkürlich die Lautheit 1 sone zugeordnet.

Gehör

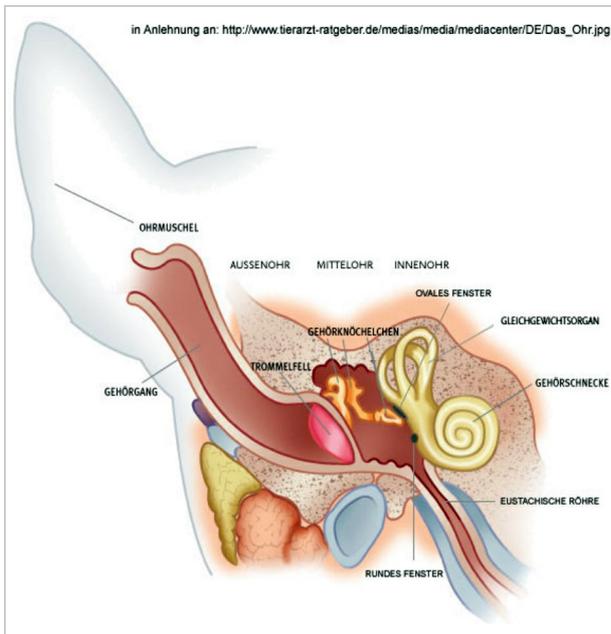


Abb. 28: Aufbau des Ohres

Um das Hören zu verstehen ist neben der Kenntnis der physikalischen Grundlagen (siehe Kapitel Akustik) das Wissen um den anatomischen Bau des Ohres, seiner beteiligten Anteile, deren Funktion und Zusammenspiel unabdingbar. Als Gehör oder auditive Wahrnehmung bezeichnet man die Sinnesempfindung, die akustische Reize bzw. den Schall wahrnimmt. Die auditive Wahrnehmung des Menschen obliegt dem Ohr bzw. dem Hörorgan. Das auditive System unterteilt sich in ein peripheres und ein zentrales auditives System. Das periphere auditive System umfasst die anatomischen Strukturen des Außenohrs, Mittelohrs und Innenohrs. Sie dienen der Schallaufnahme, der Schallweiterleitung und der Schallverarbeitung.

- Außenohr: Schallaufnahme
- Mittelohr: Schallweiterleitung
- Innenohr: Schallverarbeitung

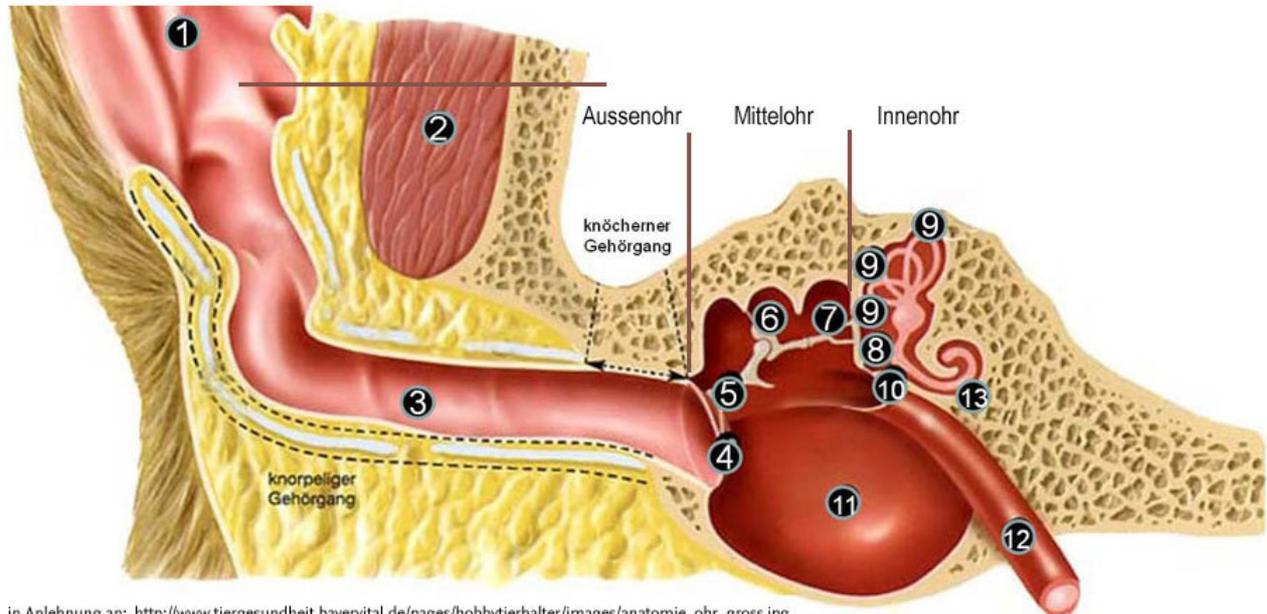
Der Reiz, der die Signaltransduktion im auditorischen System auslöst, ist eine Veränderung des Luftdrucks, welcher durch Schallwellen hervorgerufen werden. Im Folgenden laufen verschiedene neurophysiologische Prozesse ab, an deren Ende in der Hörbahn eine fertige akustische Information für die höheren Gehirnzentren steht. Das Innenohr wandelt Schallreize in neuronale Impulse um, die vom Nervus vestibulocochlearis in das ZNS weitergeleitet werden. In der Hörbahn erfolgt die Prozessierung und Filterung der auditiven Signale. Die Auswertung findet schließlich im Bereich der Hörrinde (auditiver Cortex) statt. Dieses zentrale auditive System beginnt mit dem Hörnerv und umfaßt alle mit der weiteren Signalverarbeitung befaßten Regionen des Gehirns. Es wird hier nicht behandelt.

Die nähere Erläuterung der Vorgänge im peripheren auditiven System entnehmen Sie den nachfolgenden Seiten.

Gehör

Anatomische Strukturen

Bei den physiologischen Vorgängen, die Einfluss auf das Hören nehmen, spielen anatomische Strukturen eine wichtige Rolle. Nachfolgend haben Sie die Gelegenheit Ihre Kenntnisse in diesem Bereich aufzufrischen.



in Anlehnung an: http://www.tiergesundheit.bayervital.de/pages/hobbytierhalter/images/anatomie_ohr_gross.jpg
<http://www.tiergesundheit.bayervital.de/pages/ihrhund/anatomie/ohr/index.jsp>

Fettdruck = gebräuchliche Bezeichnung

1	Ohrmuschel	Auricula auris
2	Schläfenmuskel	Musculus temporalis
3	Äußerer Gehörgang	Meatus acusticus externus
4	Trommelfell	Membrana tympani
5	Hammer	Malleus
6	Amboß	Incus
7	Steigbügel	Stapes
8	Ovales Fenster	Fenestra ovalis
9	Gleichgewichtsorgan	Oregon vestibulae = Vestibularorgan
10	Rundes Fenster	Fenestra cochleae rotunda
11	Paukenhöhle	Cavum tympani
12	Ohrtrumpete	Tuba auditiva Eustachii = Eustachi(sche) Röhre
13	Hörschnecke	Cochlea = Kochlea bzw. Kochlearorgan

Abb.29: Querschnitt durch das Hundeohr mit Bezeichnungen

Gehör

Aufbau und Funktion



Abb. 30: Schallwellenübertragung im Ohr

Quelle: <http://www.arte.tv/de/3086472,CmC=3086380.html> - aus der Sendereihe: Xenius - Titel: Klang im Ohr (04.02.2011)

Beim gesunden Ohr fängt die Ohrmuschel des Aussenohres die Schallwellen wie ein Trichter auf, bündelt sie und leitet sie zum Trommelfell - eine durchscheinende Membran - das das Aussenohr vom Mittelohr trennt.

Diese Membran wird in mechanische Schwingungen versetzt und an die anliegenden Gehörknöchelchen, die als Hebelsystem im Mittelohr fungieren, übergeben die ihrerseits das Ovale Fenster in Bewegung versetzen.

Diese am Eingang zur mit Flüssigkeit gefüllten Cochlea (Hörschnecke) liegende Membran trennt das Mittelohr an dieser Stelle vom Innenohr. Das Ovale Fenster, dessen Fläche um ein Vielfaches kleiner ist als die des Trommelfells zum Einen und die Flüssigkeit innerhalb der Cochlea zum Anderen setzen der Schallausbreitung einen großen Widerstand entgegen, haben also eine hohe Impedanz.

Die Gehörknöchelchen sind in der Lage diese Impedanz mittels ihrer Hebelkraft zu überwinden. Aus einer großen Membranauslenkung für die seitens des auftreffenden Schalls relativ wenig Kraft aufgewendet werden muss, wird eine kleine mit großer Kraft, die die Flüssigkeit in der Cochlea bewegt, wodurch die Schallinformation nicht nur einfach ins Innenohr weitergegeben, sondern darüber hinaus deutlich verstärkt und die Informationsübertragung zudem beschleunigt wird.

Anmerkung aus dem Bereich Akustik:

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle in Luft ist deutlich langsamer als in Wasser!

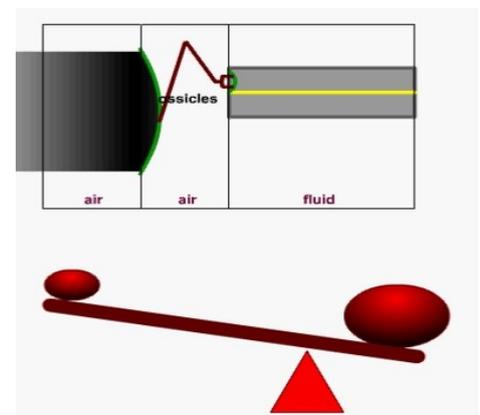


Abb. 31: Verstärkungsfunktion der Gehörknöchelchen

Quelle: <http://www.tutis.ca/NeuroMD/L7Aud/Aud.swf>
Neurophysiology of hearing

Gäbe es diesen Mechanismus nicht, würde der Schall ohne Vermittlung der Gehörknöchelchen des Mittelohres direkt auf das Ovale Fenster treffen. Dies hätte aufgrund der geringen Kraft kaum eine Wirkung. Die Flüssigkeit in der Cochlea würde nicht oder nur kaum in Bewegung versetzt. Mensch und Tier wären generell schwerhörig.

Zum Schutz vor übermäßigem Schall haben sich im Mittelohr zwei Mechanismen zur Impedanzerhöhung = Verfahren, wodurch der Widerstand, der dem eintreffenden Schall entgegengesetzt wirkt, entwickelt:

- Der Musculus tensor tympani, der am am Hammer ansetzt und bei Bedarf das Trommelfell anspannt und so versteift, wodurch Schall zurückgeworfen und die Schallweitergabe an das Mittelohr verschlechtert wird.

- Der Musculus stapedius, der am Steigbügel ansetzt und die Steigbügelplatte bei hohem Schalldruck im ovalen Fenster verkantet. Dieser als Stapediusreflex bezeichnete Wirkmechanismus setzt beim Menschen bei Schallpegeln von 70-95 dB ein und greift nach etwa 50 ms. Er wirkt auf beide Ohren, auch dann, wenn nur ein Ohr beschallt wird.

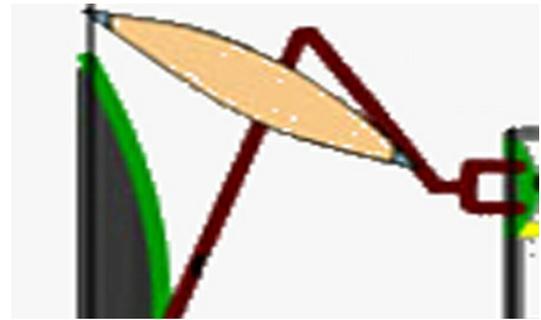


Abb. 32: Stapediusreflex als Hörschutz

Quelle: <http://www.tutis.ca/NeuroMD/L7Aud/Aud.swf>
Neurophysiology of hearing

Die über das Ovale Fenster initiierte Druckwelle wirkt auf bestimmte Bereiche der Kochlea, die in charakteristischer Weise zu schwingen beginnen. Es kommt zur Bewegung der dort beheimateten "Haare" spezialisierter Haarsinneszellen, die die Überführung und Umwandlung der mechanischen in elektrische Impulse vornehmen. Über den angeschlossenen Hörnerv werden diese Impulse ans Gehirn weitergegeben, wo Sie als akustische Information interpretiert werden.

Hinweis:

Eine genauere Beschreibung der Vorgänge in der Kochlea finden Sie auf den nachfolgenden Seiten

Gehör

Wellenweitergabe

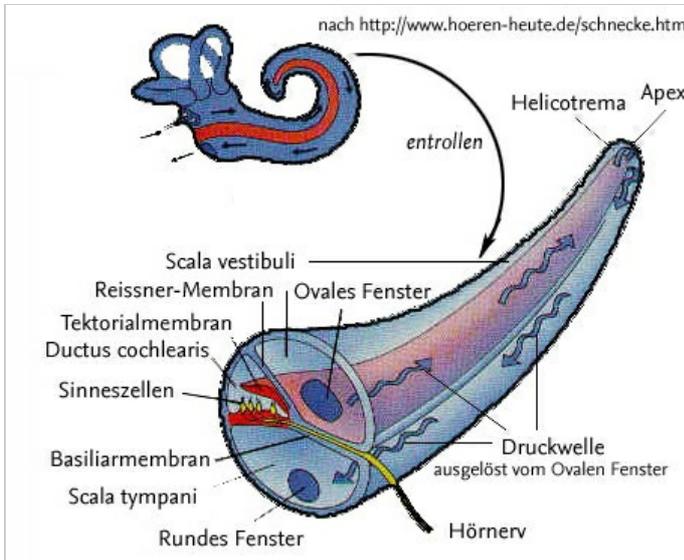


Abb. 33: Aufbau der Gehörschnecke

Quelle: ?

Zum besseren Verständnis der physikalischen Verhältnisse rollt man die Hörschnecke aus, wodurch sich die Kochlea als dreikammeriges, flüssigkeitsgefülltes Rohr darstellt.

Die Gehörknöchelchen des Mittelohres (hier nicht sichtbar) drücken auf das Ovale Fenster, das die membranöse Verbindung zum aufsteigenden Gang, dem "oberen Rohr" bildet.

In der Flüssigkeit entsteht eine Druckwelle, die sich über die aufsteigende Bahn (Scala vestibuli) bis zur Spitze (Apex) ausbreitet, dort am Helicotrema (Schneckenloch) umschlägt und über die absteigende Bahn (Scala tympani), das "untere Rohr" zurück in Richtung Mittelohr wandert.

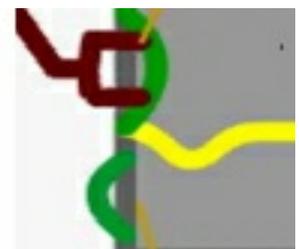
Der durch diese Welle in der Kochlea entstehende "Überdruck" wird über das am Ende des absteigenden Ganges liegende Runde Fenster, der 2. Verbindung zum Mittelohr, ausgeglichen; es wölbt sich nach aussen.

Die sich ausbreitende Welle hat tiefgreifenden Einfluss auf den Mittelgang. Hier bildet sich eine für jede Frequenz typische Wanderwelle. Diese mechanische Information wird innerhalb des Mittelganges weiterverarbeitet, in elektrische Signale gewandelt und über das Gehirn vom Individuum letztlich als Schallereignis interpretiert.

- Die sich ausbreitende Druckwelle wirkt auf den Mittelgang. Er wird initial nach unten gedrückt

Abb. 34: Druckwirkung auf den Mittelgang

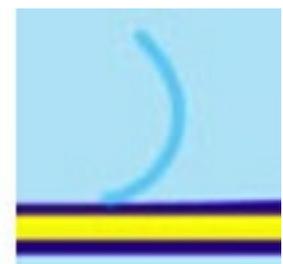
Quelle: <http://www.tutis.ca/NeuroMD/L7Aud/Aud.swf>
Neurophysiology of hearing



- Durch die Ausbreitung der Druckwelle in der auf-, dann absteigenden Bahn wirken am Mittelgang sich abwechselnde Druck-/Zugkräfte

Abb. 35: Schallweg und Schalleitung im Innenohr

Quelle: http://www.mbaumgartner.ch/schule/bio4/ohr/Innenohr/07_Schallweg_durch_das_Innenohr.swf



- Im Mittelgang kommt es zur Ausbildung einer Wanderwelle die sich entlang der Basiliarmembran aufschaukelt und wieder abschwächt.
Nebenstehend sehen sie oben eine 2-, unten eine 3-dimensionale Darstellung

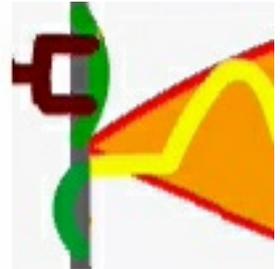


Abb. 36: Wanderwelle im Mittelgang (2D)

Quelle: <http://www.tutis.ca/NeuroMD/L7Aud/Aud.swf>
Neurophysiology of hearing

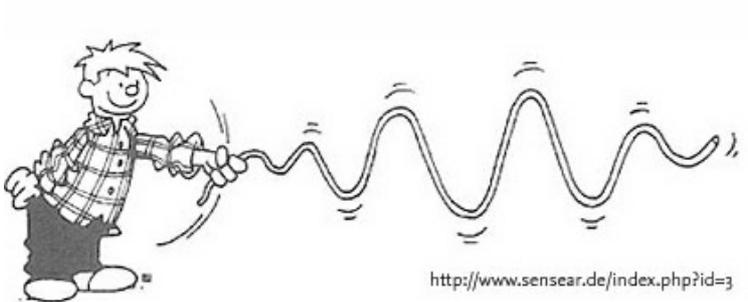


Abb. 37: Wie entsteht eine Wanderwelle mit Wellenmaximum

Quelle: <http://phet.colorado.edu/en/simulation/wave-on-a-string>



Abb. 38: Wanderwelle im Mittelgang (3D)

Quelle: <http://www.tutis.ca/NeuroMD/L7Aud/Aud.swf>
Neurophysiology of hearing

Gehör

Innenohrstrukturen (Feinbau)

Das Innenohr wird von der Kochlea bestimmt, die man sich als aufgerolltes dreikammeriges Rohr vorstellen kann. Das obere, aufsteigende Rohr (Scala vestibuli) läuft vom ovalen Fenster zur Spitze (Apex) und schlägt sich dann ins untere, das absteigende Rohr (Scala tympani) um. Sie sind mit Perilymphe gefüllt. Dazwischen liegt der deutlich kleinlumigere und gegen oberen und unteren Bereich physikalisch abgegrenzte und blind endende Mittelgang (Scala media bzw. Ductus cochlearis), dessen Basis von der Basiliarmembran und dessen Decke von der Reißner-Membran gebildet wird. Er ist mit Endolymphe gefüllt. Die in der nachfolgenden Abbildung eingezeichneten nach innen gerichteten weißen Pfeile zeigen die Wirkung einer Druckerhöhung im aufsteigendem Teil der Kochlea auf die membranösen Strukturen, die die Gänge voneinander trennen.

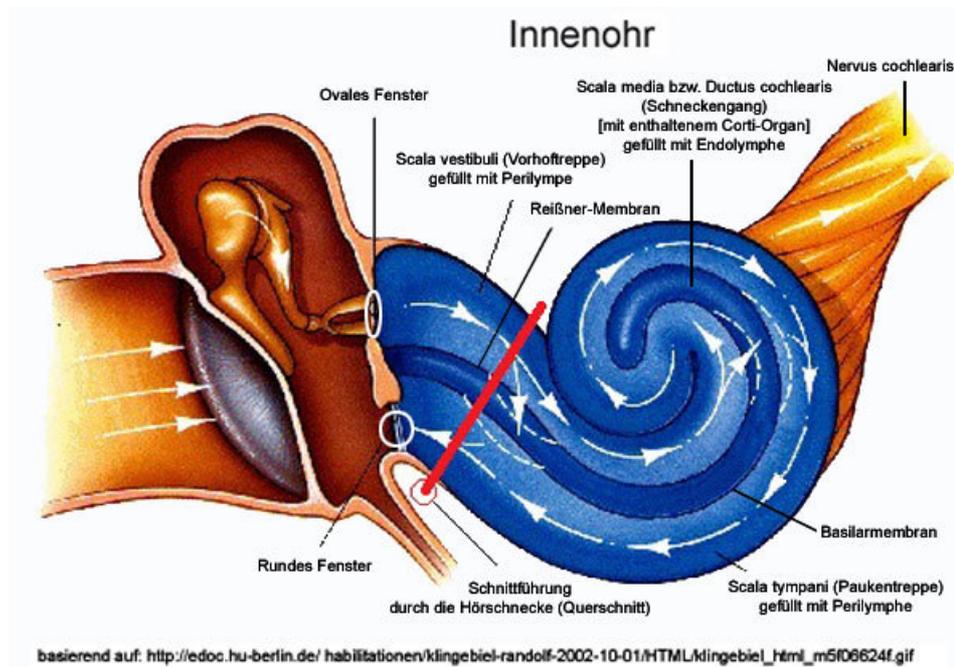


Abb. 40: Innenohrstrukturen

Die Abbildung 39 enthält das Schnittbild durch die Hörschnecke. Innerhalb von tet.folio wird die Maus über die Bildbereiche geführt und gezeigt, welche Strukturen zu beachten sind. Bezeichnung und Kurzbeschreibung der entsprechenden Struktur werden ein- und wieder ausgeblendet.

Der Basiliarmembran in Richtung Lumen des Mittelganges anliegend befindet sich das Corti-Organ (Abb. 41), das eigentliche Hörorgan, indem die Umwandlung der mechanischen in elektrische Information stattfindet.

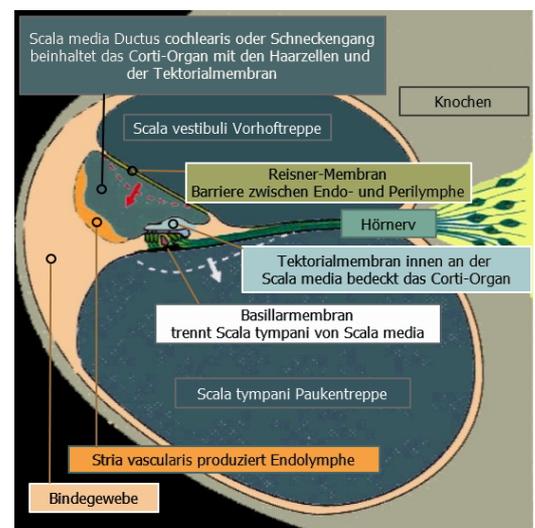


Abb.39: Schnitt durch die Hörschnecke
Quelle: Dr. Manfred Sommerer

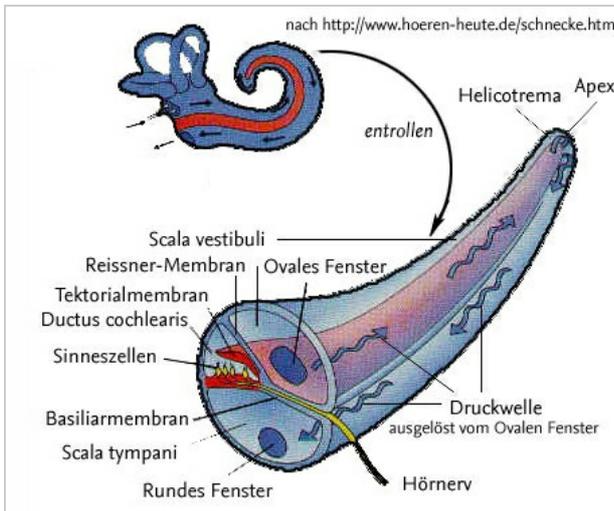


Abb.41: : Aufbau der Cochlea, speziell des Corti-Organ

Quelle:

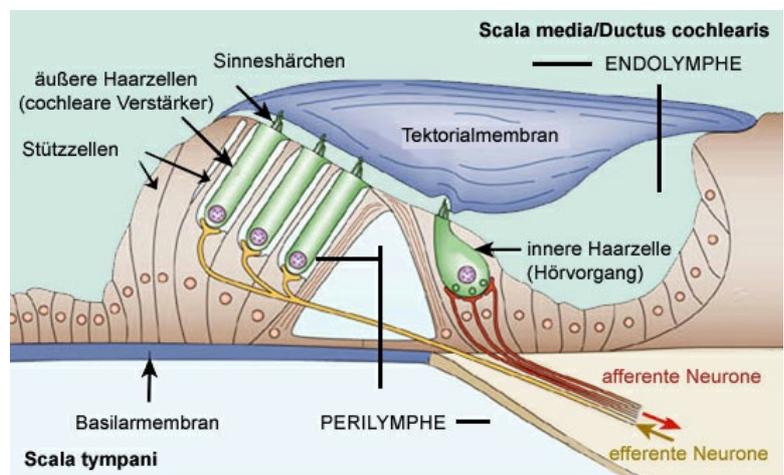
<http://www.youtube.com/watch?v=1JE8WduJKV4&feature=related>

Von besonderer Bedeutung für das Verständnis der Funktion des Corti-Organ sind folgende Punkte:

- Die Tektorialmembran ist elastisch und zungenförmig. Sie folgt der Bewegung der Basiliarmembran.

Es entstehen Scherkräfte wodurch die Härchen der Haarsinneszellen des Cortischen Organ hin und her bewegt werden.

- Die Basiliarmembran stellt zwar eine physikalische nicht jedoch ionale bzw. elektrische Grenze dar. Perilymphe kann sie durchdringen und den Haarsinneszellen umspülen. Erst die kopfseitig der Haarsinneszellen liegenden Zellverbindungen sind impermeabel. Aus diesem Grund ist nur der Zellkopf der Haarsinneszellen mit seinen Härchen von Endolymphe umgeben.



in Anlehnung an: <http://user.meduni-graz.at/helmut.hinghofer-szalkay/XIV.7.htm>

Abb.42: Aufbau der Cochlea, speziell des Corti-Organ

Quelle: <http://www.youtube.com/watch?v=1JE8WduJKV4&feature=related>

- Nur die inneren Haarzellen dienen der Wahrnehmung. Die äußeren Haarzellen verfügen über kontraktile Membrananteile (Prestin) in der Zellmembran, die in Folge der einwirkenden Scherkräfte (ionenvermittelt) ge- bzw. entspannt werden. Eine Verstärkung der Wellen ist die Folge = cochlearer Verstärker (beim Menschen ca. 50dB)

Erläuterung des Prinzips des cochlearen Verstärkers:

Nur die äußeren Haarsinneszellen des Corti-Organ verfügen über kontraktile Elemente (Prestin) in der Zellmembran. Als Folge einwirkender Scherkräfte öffnen die Transduktionskanäle der Membran. Kalium strömt ein. Es kommt zur Depolarisation der Membran, die den Einstrom von Calciumionen nach sich zieht. Das Calcium wirkt auf die Proteine, sie verkürzen sich. Die Repolarisation hat den gegenteiligen Effekt. So kommt es zu einem Aufschaukeln der Schallwelle = cochlearer Verstärker. Der Effekt ist im Video sichtbar gemacht. Man sieht die isolierte Haarsinneszelle eines Meerschweinchens, die mit Rock´n Roll Musik von Bill Haley beschallt wird. Die resultierenden Längenänderungen der Zelle ist als deutliche Zuckung erkennbar.



Abb.43: Tanzende Haarzelle

Quelle: http://mustelid.physiol.ox.ac.uk/drupal/?q=ear/dancing_hair_cell

(Aufnahme aus dem Labor von Prof. Jonathan Ashmore)

Gehör

Tonotopie / Frequenzhören

Abhängig von der auslösenden Frequenz die auf das Ovale Fenster trifft entsteht im Mittelgang eine charakteristische Wanderwelle, die sich dort unterschiedlich weit ausbreitet und an korrespondierender Stelle ihr Schwingungsmaximum entwickelt. Hierfür verantwortlich sind nicht die Haarsinneszellen, sondern die Beschaffenheit der Basiliarmembran. Die Abbildung 44 zeigt eine Wanderwelle in 3D.



Abb. 44:
 Hydrodynamisches Cochleamodell (3D)
 Quelle: http://www.uni-tuebingen.de/cochlea/deutsch/cochlea_scaled_dt.l

Zu Beginn der Kochlea ist sie verhältnismäßig stark mit Bindegewebszellen unterbaut d.h. dick und damit starr, am Ende (Helicotrema) um das 10.000-fache dünner und damit deutlich flexibler. Einfach gesagt bestimmt die "Dicke" der Basiliarmembran, welche Wellenlänge wo ihr Schwingungsmaximum entwickelt.

Kurze, energiereiche Wellen d.h. hohe Töne scheitern am Widerstand des vorderen Bereichs, werden abgeschwächt und bleibt früh "hängen", sie dringen nicht so tief vor, wie längere Wellen, also tiefe Töne, die sich aufgrund ihrer größeren Wellenlänge weit ins Innere ausbreiten können.

Anmerkung:

Vergleichbar mit der Wellenausbreitung wie man sie zum Einen bei der Kommunikation von Blauwalen zum Anderen von Delfinen findet. Infraschall breitet sich im Gegensatz zu "Normalschall" über weite Strecken (100te von Kilometern) aus, was notwendig ist, damit sich Blauwale, die als Einzelgänger leben auch finden; nicht so bei den geselligen Delfinen. Hier muss der Schall nur kurze Distanzen überwinden.

Die Reaktion der Haarsinneszellen korrespondiert mit der Intensität der einwirkenden Scherkräfte. Je größer die Scherkräfte desto intensiver die Antwort der Haarzellen (siehe Abb. 45).

Auch am Anfang der Wanderwelle kommt es zu einer Reizung, diese ist jedoch bei weitem nicht so stark wie am Wellenmaximum, der als Reiz dominiert.

Es gilt, der jeweils stärkste Reiz d.h. der Ort des Wellenmaximums gewinnt.

Die Kochlea funktioniert also tonotop, d.h. jeder Frequenz (jedem Ton) lässt sich ein definierter Bereich auf der Basiliarmembran zuordnen = Tonotopie.

Anmerkung:

Der Bereich an dem ein Ton abgebildet wird ist individuell verschieden. Auch gibt es keinen linearen Zusammenhang.

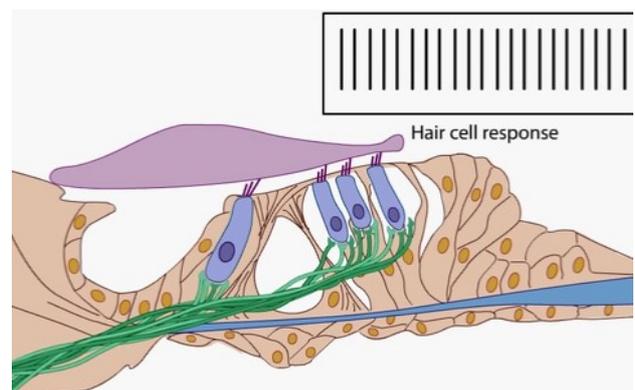


Abb.45: Haarzellantwort
 Auszug aus - Neurophysiology of hearing
 Quelle: <http://www.tutis.ca/NeuroMD/L7Aud/Aud.swf>

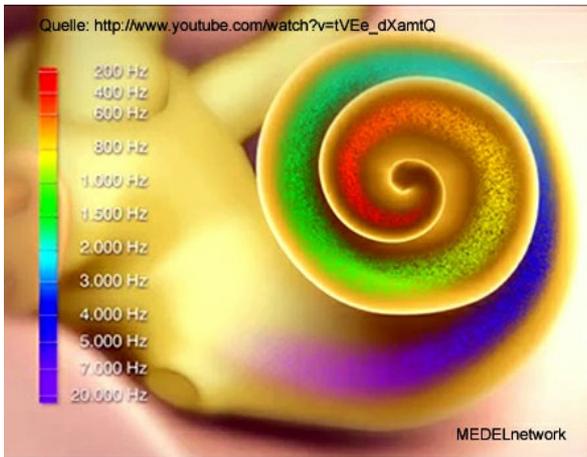


Abb.46 Cochlea-Frequenzzuordnung

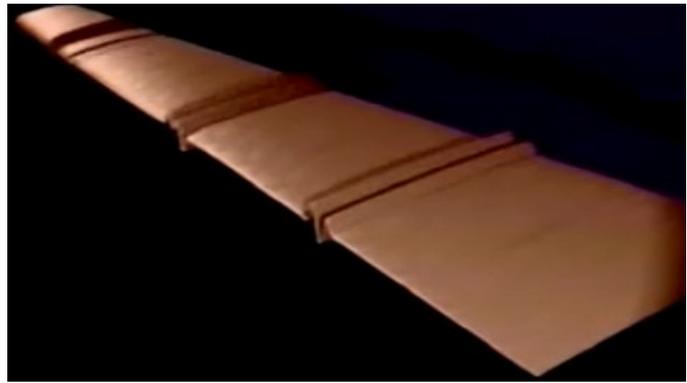


Abb.47 Cochlea-Tonzuordnung (umgekehrte Klaviatur)

Auszug aus - Cochlear animation

Quelle: <http://www.tutis.ca/NeuroMD/L7Aud/Aud.swf>

Hohe Frequenzen werden am Anfang, tiefe Frequenzen am Ende der Cochlea erkannt.

Diese Eigenart der Tonanalyse und -wahrnehmung durch die Cochlea lässt sich am ehesten mit einer Klaviatur, wenn auch gespiegelt verglichen. Stellt man sich die Cochlea ausgerollt vor, erscheinen die hohen Töne unten (am Anfang), die tiefen Töne oben (am Ende).

Auch im Gehirn, dem primären auditiven Cortex (siehe Abb. 48) sind die Frequenzen bestimmten Bereichen zuordenbar, jedoch liegen hier wie vom Klavier gewohnt - nicht wie in der Cochlea - d.h. entsprechend der "normalen" Klaviatur die tiefen Töne am Anfang, die hohen Töne am Ende.

Die Fähigkeit zur Wahrnehmung des gesamten - nach Abschluss der Ohrentwicklung - hörbaren Frequenzspektrums verändert sich mit den Jahren. So sinkt die Wahrnehmung höherer Frequenzen mit zunehmendem Alter = Altersschwerhörigkeit.

Das hat zweierlei Ursachen: Einerseits verliert die Basalmembran im Laufe der Zeit ihre Elastizität und damit Schwingungs- und Erkennungsfähigkeit, andererseits erreichen weitaus mehr hohe als tiefe Töne die Haarzellen der vorderen Cochleabereiche wodurch dort weitaus mehr Haarsinneszellen degenerieren als in den hinteren Bereichen.

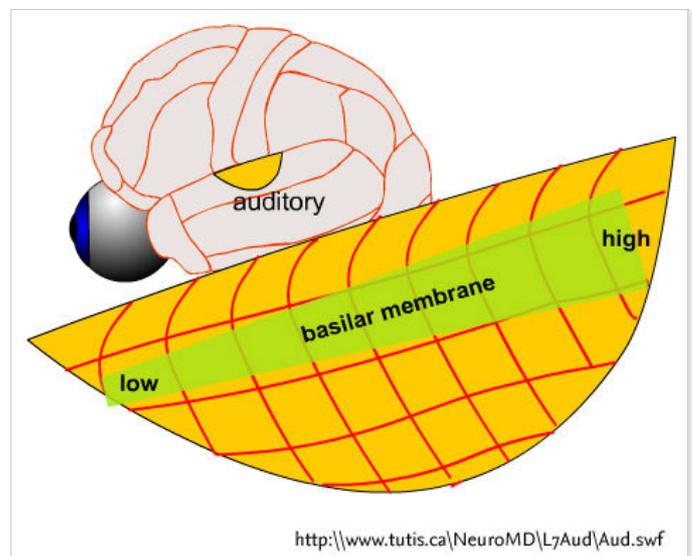


Abb.48 Tonzuordnung im Gehirn (Klaviatur)

Gehör

Reizumwandlung

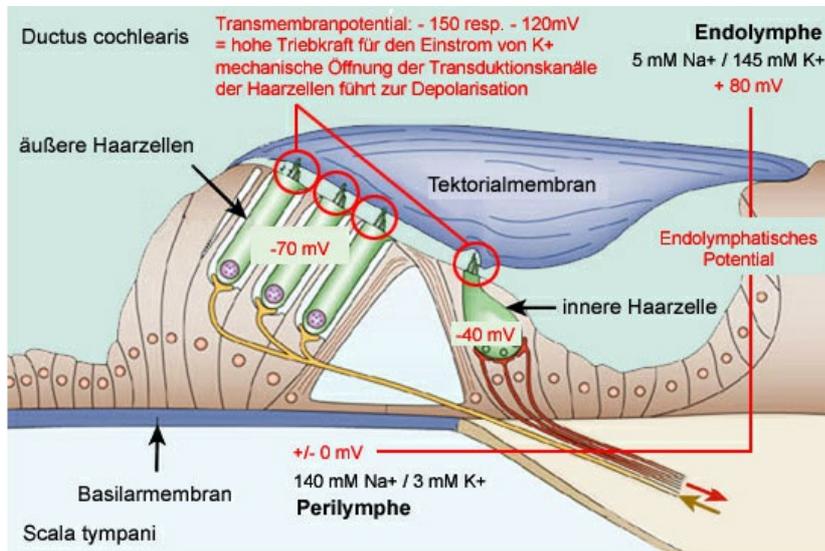


Abb. 50: Reizumwandlung

Der Ductus cochlearis enthält **Endolymphe**, die aufgrund ihrer hohen Konzentration an **K⁺-Ionen** gegenüber der Perilymphe ein **"endolymphatisches Potential"** von etwa +80 mV ausbildet.

Scala vestibuli und Scala tympani sind mit **Perilymphe** gefüllt, in der wie im Blut **Na⁺-Ionen** dominieren. Sie ist elektrisch neutral.

in Anlehnung an: <http://user.meduni-graz.at/helmut.hinghofer-szalkay/XIV.7.htm>

Die hohe Kaliumkonzentration der Endolymphe wird durch die in der Wand des Ductus cochlearis eingebettete stoffwechselaktive Stria vascularis (in der Abbildung nicht sichtbar) aufrecht erhalten. Verantwortlich hierfür sind Na/K-ATPasen (-pumpen) und Carrier (Transportproteine), die den substratabhängigen Kotransport von Na/K/Cl regeln. Die Haarzellen der Kochlea sind das "dichteste Epithel" im Körper. An ihrem apikalen Pol sind die Zellen seitlich über Tight junctions mit Ihren Nachbarzellen verbunden, wodurch eine flüssigkeits- und elektronendichte Barriere entsteht. Auf diese Weise werden die Rezeptorzellen apikal von Endolymphe (hohe Kaliumionenkonzentration) und basal von Perilymphe (niedrige Kaliumionenkonzentration) umspült.

Wie in Abbildung 51 dargestellt tragen die Haarzellen (grün) an ihrer Oberfläche feine Härchen (Mikrovilli), die orgelpfeifenartig angeordnet und über sog. Tip-Links (Proteinfäden) miteinander verbunden sind. Diese Tiplinks setzen an den "Transduktionskanälen" der Zellmembran an, über die der KaliumEinstrom in die Haarzelle geregelt wird.

Beginnt die Basilarmembran zu schwingen, führt die von der Tectorialmembran initiierte Auslenkung der Härchen zur Erweiterung bzw. Verengung dieser Ionenkanäle. Aufgrund des großen Transmembranpotentials zwischen Haarzellinnerem und Endolymphe von -150 mV (innere Haarzellen) resp. -120 mV (äußere Haarzellen) liegt eine hohe Triebkraft für den K⁺-Einstrom vor.

Anmerkung:

Die hohe Potentialdifferenz ist notwendig, da der Kaliumgehalt in der Zelle dem der Endolymphe entspricht; ein passiver Einstrom aufgrund unterschiedlicher Ionenkonzentration also nicht möglich ist. Der elektrische Gradient dominiert gegenüber dem Chemischen.

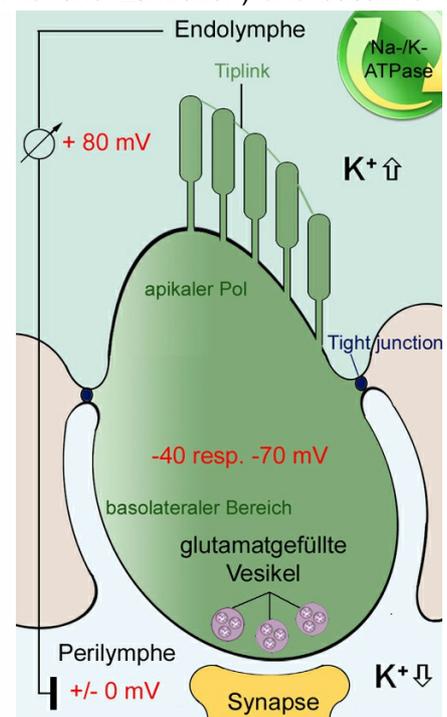


Abb. 51: Haarzellfunktion
Quelle: Dr. Manfred Sommerer

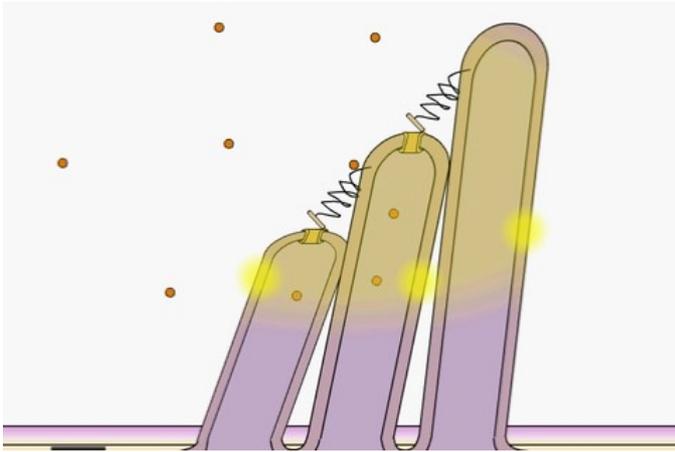


Abb.49: Kaliumeinstrom in die Haarzellen
 Auszug aus - Neurophysiology of hearing
 Quelle: <http://www.tutis.ca/NeuroMD/L7Aud/Aud.swf>

Wie in Abbildung 49 führt der Einstrom an Kaliumionen an dieser Stelle zum Kaliumionenüberschuss. Es kommt zur Depolarisation der Membran, was als Rezeptor- bzw. Generatorpotential bezeichnet wird. Es handelt sich hier um kein Aktionspotential, weshalb man bei diesem Zelltyp auch von sekundärer Sinneszelle spricht.

Anmerkung:

Primäre Sinneszellen bilden eigenständig ein Aktionspotential aus, sekundäre bereiten die Entstehung vor.

Da die den basalen Bereich der Haarzelle umgebende Perilymphe kaliumarm ist, strömen die Kaliumionen die Membranwand entlang nach unten. Auf diese Weise breitet sich die Depolarisation entlang der Zellmembran aus. In der basolateralen Membran regt der entstehende Spannungsunterschied die dortigen spannungsabhängigen Ca-Kanäle an. Es kommt zum Einstrom von Calcium in die Haarzelle. Zum Einen löst dies die Exozytose von Glutamatvesikeln aus. Glutamat gelangt in den synaptischen Spalt, bindet an die Synapse und löst als aktivierender Transmitter ein Aktionspotential aus. Zum Anderen werden calciumvermittelt die am Fuß der Haarzellen befindlichen Kalium-Kanäle geöffnet und das Kalium passiv in den kaliumarmen Extrazellulärraum des Corti-Organs ausgeschleust.

Anmerkung:

Im Falle der äußeren Haarzellen löst der Calciumeinstrom die Kontraktion der kontraktilen Zellanteile aus.

Dabei gilt, je stärker die Schwingung desto höher ist das Sensorpotential (**Transduktion**) und umso mehr Aktionspotentiale (**Transformation**) werden gebildet.

Gehör

Richtungshören (Prinzip)

Unser Gehör vermag nicht nur die bloße Wahrnehmung von Schallereignissen, neben Lautstärke und Frequenz können Geräusche auch lokalisiert d.h. die Richtung aus der das Schallereignis kommt bestimmt werden. Die Fähigkeit, ein Geräusch zu erkennen und räumlich zuzuordnen nennt man Richtungshören oder auch Lokalisationsfähigkeit. Sobald Babys ihren Kopf drehen können, wenden sie sich gezielt einer Schallquelle zu. Auf diese Weise entsteht aus Hör-, Seh- und Greifeindrücken ein multisensorisches Bild von der Welt. Beim Menschen entwickelt und verbessert sich das Richtungshören bis zum Alter von 10 Jahren. Ab etwas 40 Jahren verschlechtert es sich nach und nach.

Wie funktioniert Richtungshören?

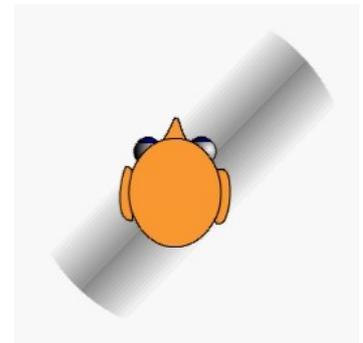
Wegen der endlichen Geschwindigkeit einer Schallwelle erreicht eine Wellenfront die Ohren im Allgemeinen zu verschiedenen Zeiten. Durch die verschiedenen Abstände der Ohren zur Schallquelle entsteht ein Laufzeitunterschied, der von der Richtung der Schallquelle in Bezug zum Kopf abhängt. Da ein Ohr meist im Schallschatten des Kopfes liegt, sind auch die Amplituden an den Ohren verschieden. Diese Unterschiede ermöglichen dem Gehör die Lokalisierung der Schallquelle

1. Bestimmung der Laufzeitdifferenz:

Das näher an der Schallquelle liegende Ohr nimmt den Schall eher auf als das Entferntere. Diese Unterschiede liegen im Millisekundenbereich, genügen aber zur Unterscheidung.

Abb.53: Laufzeitdifferenz

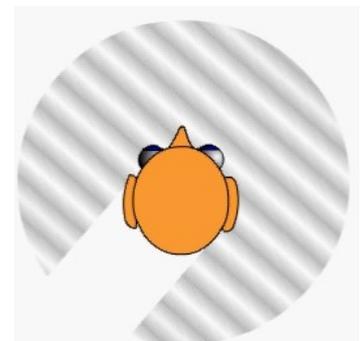
Auszug aus Neurophysiology of Hearing

Quelle: <http://www.tutis.ca/NeuroMD/L7Aud/Aud.swf>**2. Bestimmung der Pegeldifferenz:**

Das dem Schall zugewandte Ohr wird ungedämpft getroffen. Das Abgewandte liegt im "Schatten" des Kopfes. Der hier ankommende Schall wird dadurch leiser und dumpfer.

Abb.54: Pegeldifferenz

Auszug aus Neurophysiology of Hearing

Quelle: <http://www.tutis.ca/NeuroMD/L7Aud/Aud.swf>

Innerhalb tet.folio lassen sich die Laufzeit- und Amplitudenunterschiede mittels IBE mit dem Kunstkopfmikrofon zu beurteilen. Eingebaute Mikrofone wandeln die Schallschwingungen in Wechsellspannungen um. Das Oszilloskop stellt die sich ständig ändernden Spannungen grafisch in Wellenform dar.

Mit Hilfe des Richtungshörens sind wir in der Lage Entfernungen und im Falle eines sich bewegenden Objektes auch die Geschwindigkeit abzuschätzen.

Voraussetzung hierfür ist das Hören mit zwei Ohren, das sogenannte bilaterale oder binaurale Hören.

Nur dadurch das Mensch und Tier über zwei Ohren verfügen, sind sie in der Lage Schallereignisse der einen Seite mit der der anderen abzugleichen und so die Quelle des Schalls zu orten.

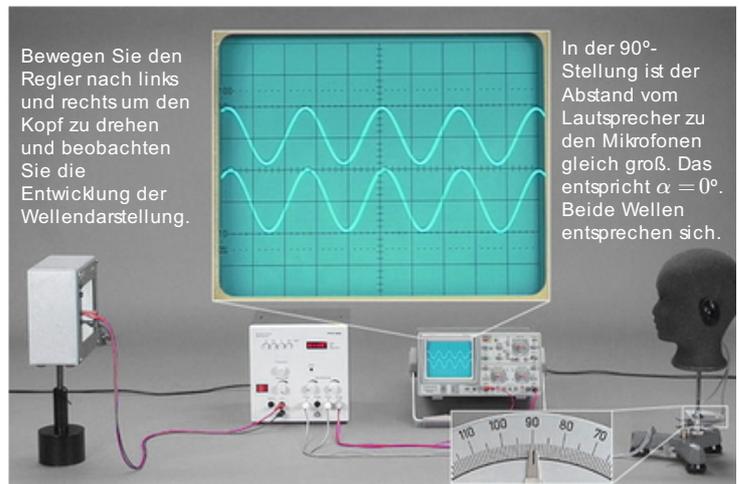


Abb. 52: Gleichartige Wellenbildung bei Tongenerierung von frontal

Basis hierfür ist das Vorhandensein von 2 Ohren. Mit nur einem Ohr ist es nahezu unmöglich die genaue Position einer Schallquelle auszumachen.

Je größer der Unterschied der Hörfähigkeit beider Ohren (in Bezug auf die Lautstärkeempfindung), umso schwieriger wird das Richtungshören.

Gehör - Richtungshören

Richtungshören beim Tier

Viele Tiere darunter auch Hund, Katze, Pferd oder Rind haben beim Richtungshören einen Vorteil. Sie müssen in Abhängigkeit von der Rasse resp. der Ohrform nicht den ganzen Kopf in Richtung einer Schallquelle drehen. Da ihre Ohren nicht so starr am Kopf fixiert sind, wie die des Menschen, können sie ihre Ohren oftmals in Richtung einer Schallquelle ausrichten und ihr Richtungshören dadurch deutlich verbessern.

Zwei anatomische Anpassungen bilden die Grundlage für die ausserordentliche Hörleistung:

1. Der große Gesichtsschleier,
der wie ein Parabolspiegel funktioniert und als zusätzlicher Verstärker dient.

Anmerkung:

Zur exakten Ausrichtung wird der Kopf so lange hin und hergedreht, bis die Lautstärke auf beiden Ohren genau gleich ist.



Abb.55:Gesichtsschleier

Auszug aus Planet Schule - Superohren - Jäger der Nacht

Quelle: http://www.planet-schule.de/sf/php/02_sen01.php?sendung=6906

2. Die asymmetrische Kopfform,
wodurch die Ohren nicht auf gleicher Höhe liegen. Auf diese Weise ist die Eule in der Lage, von einer Geräuschquelle, die sich direkt in der Mitte nach oben oder unten bewegt (z.B. eine flüchtende Maus) unterschiedlich laute Signale zu hören.

Die Eule hört dreidimensional!



Abb.56:Asymmetrische Kopfform

Auszug aus Planet Schule - Superohren - Jäger der Nacht

Quelle: http://www.planet-schule.de/sf/php/02_sen01.php?sendung=6906

Gehör

Höreinschränkung und -verlust

Viele Tiere darunter auch Hund, Katze, Pferd oder Rind haben beim Richtungshören einen Vorteil. Sie müssen in Abhängigkeit von der Rasse resp. der Ohrform nicht den ganzen Kopf in Richtung einer Schallquelle drehen. Da ihre Ohren nicht so starr am Kopf fixiert sind, wie die des Menschen, können sie ihre Ohren oftmals in Richtung einer Schallquelle ausrichten und ihr Richtungshören dadurch deutlich verbessern.

So kann schon ein einmaliges Ereignis wie z.B. das Abfeuern einer Pistole nahe am Ohr

- zur Ruptur des Trommelfells führen
- die Gehörknöchelchen brechen lassen
- die Basillarmembran zerreißen

Die Folge ist ein bleibender Hörverlust.

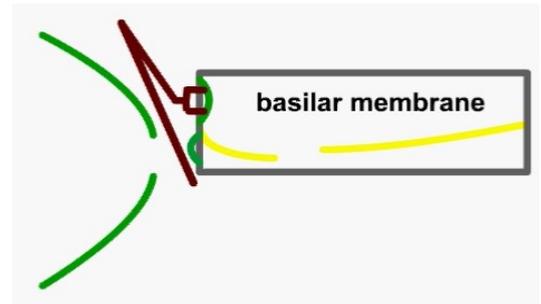


Abb.57: Hörverlustauslöser
Auszug aus Neurophysiology of Hearing
Quelle: <http://www.tutis.ca/NeuroMD/L7Aud/Aud.swf>

Eine dauerhafte Überlastung des Gehörs wie dies z.B. durch bei der Nutzung von Walkmen oder MP3-Playern in Abhängigkeit von Zeit und Höhe der Lautstärke passiert, kann

- eine Degeneration der Härchen der Haarzellen oder gar
- einen Abriss der Härchen nach sich ziehen.



Abb.58: Haarzellabriss
Auszug aus Neurophysiology of Hearing
Quelle: <http://www.tutis.ca/NeuroMD/L7Aud/Aud.swf>

Eine derartige Schädigung zieht je nach betroffenem Haarzelltyp - sind die äußeren Haarzellen (cochlearer Verstärker) betroffen - den Verlust der Hörsensibilität nach

d.h. höhere Lautstärken sind nötig, um einen Ton noch wahrnehmen zu können oder im Falle der inneren Haarzellen können hohe Frequenzen nicht mehr wahrgenommen werden. Zu lauter Schall ist Hauptgrund für Höreinschränkung oder Hörverlust.

Weitere Gründe für eine Einschränkung der Hörfähigkeit bzw. Hörverlust können sein:

- **Mechanische Verlegung**

Die einfache mechanische Verlegung des äusseren Gehörganges mit Zerumen (Ohrschmalz), der wie der Dämpfer einer Trompete wirkt und den Schall bereits so abschwächt, dass die weitere Verarbeitung gestört ist.

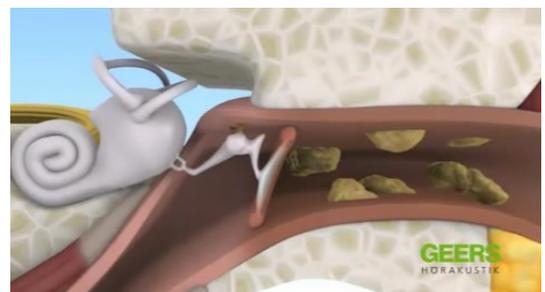


Abb.59: Mechanische Verlegung des Gehörganges
Auszug aus Geers Hörakustik
Quelle: <http://www.youtube.com/watch?v=wALcoUI879Y&feature=related>

- **Mittelohrentzündung**

Jede Entzündung des Mittelohres (Otitis media) zieht eine mehr oder weniger starke Füllung des Mittelohres mit Flüssigkeit nach sich. Dies schränkt die Bewegungsfähigkeit des Trommelfells und der Gehörknöchelchen ein, was sich negativ auf die Hörfähigkeit auswirkt. Im schlimmsten Fall kommt es zur Vereiterung und dem Riss des Trommelfells. Ein Hören wird dadurch nahezu unmöglich.

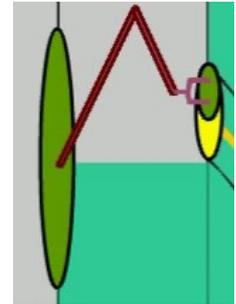


Abb.60:

Auszug aus Neurophysiology of Hearing
Quelle: <http://www.tutis.ca/NeuroMD/L7Aud/Aud.swf>

- **Otosklerose**

eine Erkrankung des Mittelohres, die oft in Folge von Entzündungsabläufen mit voranschreitender Verknöcherung der Gehörknöchelchen einhergeht. Die Versteifung derselben zieht eine schleichende Hörverschlechterung bis hin zum Hörverlust nach sich.

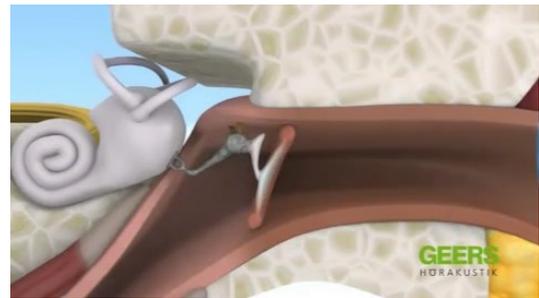


Abb.61: Otosklerose

Auszug aus Geers Hörakustik
Quelle: <http://www.youtube.com/watch?v=wALcoUI879Y&feature=related>

- **Schädigende Substanzen**

Medikamente, Toxine, Drogen die über die Transduktionskanäle in das Zellinnere gelangen und die Zellen temporär und/oder nachhaltig schädigen

Beispiele:

Aminoglykosidantibiotika, Furosemiddiuretika,
Chinin, Acetylsalicylsäure, arom.

Kohlenwasserstoffe, Schwermetalle aber auch
Kohlenmonoxid

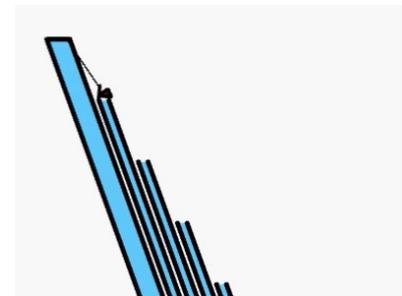


Abb.62: Aufnahme von Drogen in die Haarzellen

Auszug aus Neurophysiology of Hearing
Quelle: <http://www.tutis.ca/NeuroMD/L7Aud/Aud.swf>

Bei Störungen der Schallweiterleitung im Außen- oder Mittelohr spricht man von
Schalleitungsschwerhörigkeit

Bei Schädigungen des Innenohrs von
Sensineuraler Schwerhörigkeit

Bei einer Schädigung neuronaler Bahnen zwischen Innenohr und cerebralem Cortex, aber auch dem Gehirn selbst z.B. durch Schlaganfall von
Schallempfindungsschwerhörigkeit

Gehör

Akustische Täuschung

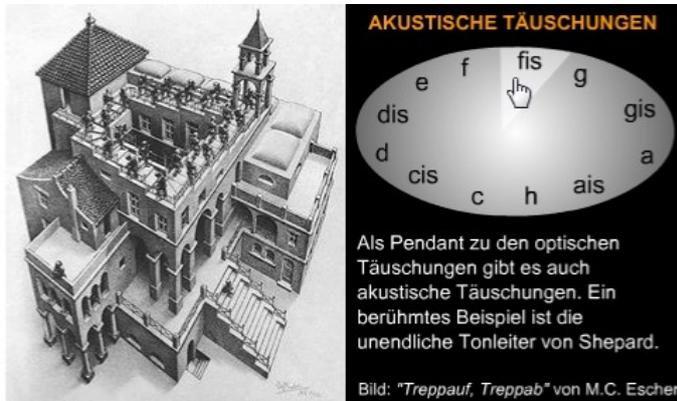


Abb.63: Die unendliche Tonleiter

Quelle: http://www.laemorama.ch/m2_hoeren/empfindung_v.html

Nicht nur das Auge lässt sich täuschen, auch das Gehör kann in die Irre geleitet werden.

Für diejenigen die wissen wollen, was hinter dieser Illusion steckt?
Warum funktioniert es hier, jedoch nicht mit einem Klavier?!

Es wird bei der Tonmischung manipuliert, die die menschliche Schwäche ausnutzt mehrfrequente Töne, die sich aus verschiedenen Tönen zusammensetzen, nicht als einzelnen Töne wahrnehmen zu können (Ausnahme: geschulte Ohren).

Bei den hier vorliegenden Tönen handelt es sich nicht wie zu erwarten wäre um reine Töne, sondern um Klänge mit einem ganz bestimmten Lautstärkenverhältnis der enthaltenen Harmonischen. Das Notenbild dieses Effekts zeigt vier gleichzeitig gespielte Halbtonfolgen, die sich jeweils um eine Oktave voneinander unterscheiden. Alle Folgen erstrecken sich über eine Oktave. Das besondere an der Tonfolge sind die Lautstärken innerhalb der Einzelstimmen:

- Die Lautstärke der höchsten Stimme nimmt ab: Sie beginnt bei halbem Volumen und erreicht am Ende der Oktave den Wert Null.
- Die Lautstärke der zweithöchsten Stimme fällt ebenfalls: Sie beginnt bei vollem Volumen und erreicht am Ende der Oktave das halbe Volumen.
- Die Lautstärke der dritthöchsten Stimme nimmt zu: Sie beginnt bei halbem Volumen und erreicht am Ende der Oktave das volle Volumen.
- Die Lautstärke der tiefsten Stimme steigt ebenfalls: Sie beginnt bei null und erreicht am Ende der Oktave das halbe Volumen.

Der Effekt dieser Konstruktionsvorschrift ist verblüffend: Obwohl ein Zuhörer den Eindruck gewinnt, dass die Tonfolge permanent ansteigt, ist der letzte Ton mit dem ersten identisch. Durch dieses langsame Ein- und Ausblenden wird gerade erreicht, dass nach acht Ganztonschritten wieder derselbe Klang wie zu Beginn erreicht ist:

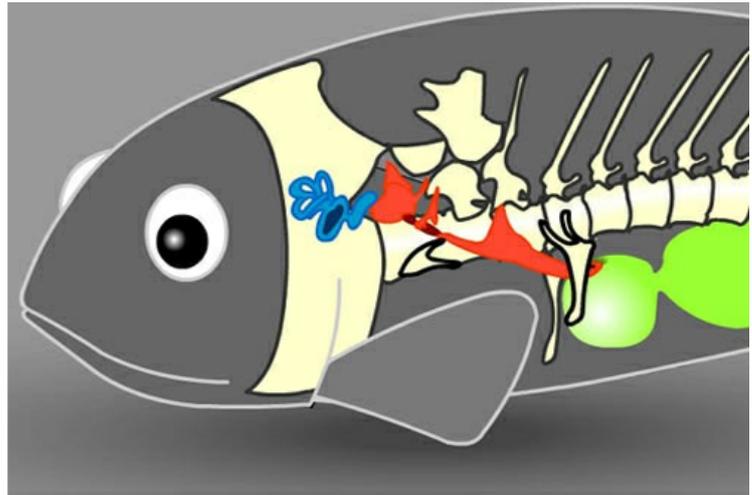
Eine steigende Melodie, die niemals wirklich höher wird!

Gehör

Alternatives Hören beim Tier

Während beim Säugetier i.d.R. das Trommelfell als erste zur Schwingung fähige Struktur zum Einsatz kommt, muss das Gehör beim Fisch entgegengesetzt arbeiten. Warum? Die Dichte des Fischkörpers ist nicht wesentlich anders als die des umgebenden Wassers. D.h. Trifft Schall in Wasser auf den Fischkörper schwingt der Fisch, doch nicht der ganze Fisch in gleicher Weise. Es gibt auch Bereiche mit träger Masse. Im Ohr befinden sich kalkhaltige Hörsteinchen, die verzögert auf Schallereignisse, die auf den Fisch wirken, reagieren. Die Schwimmblase, die aufgrund Ihrer geringeren Dichte leichter in Schwingung versetzt wird kann zum Hören genutzt werden.

Manche Fische verstärken ihre Schallwahrnehmung, indem Sie Gasblase und Gehör miteinander verbinden (Abb. 64). Hier kommen unterschiedliche Prinzipien zum Einsatz. Manche Arten haben verschiedene Knöchelchen, andere ein spezielles Gangsystem entwickelt, durch das die luftgefüllte Schwimmblase mit gasgefüllten Blasen im Innenohr in Verbindung steht. Auf diese Weise sind z.B. Heringe in der Lage Ultraschall wahrzunehmen um sich vor Delfinen zu schützen.



<http://www.planet-schule.de/sf/multimedia-filme-multimedial-detail.php?projekt=superohren>

Abb.64: Die Hörorgane beim Fisch

Dass Fische überhaupt hören wurde schon in den Zwanzigerjahren des letzten Jahrhunderts festgestellt. Der Verhaltensforscher Karl von Frisch hatte einen Wels darauf dressiert, auf einen Pfiff aus seiner Höhle zu kommen, woraufhin dieser eine Belohnung erhielt.

Auch Insekten können Schall wahrnehmen. Hierzu kommen spezielle Sinneshaare zum Einsatz. Ist ein Insekt selbst zur Schallerzeugung fähig, stehen diese Sinneshaare mit einer dünnen Hautmembran (Tympalorgan) in Verbindung, die als eine Art Trommelfell fungiert. Diese Hörorgane können, müssen aber nicht am Kopf vorkommen. Heuschrecken haben diese Hörorgane an den Beinen oder am Hinterleib, manche

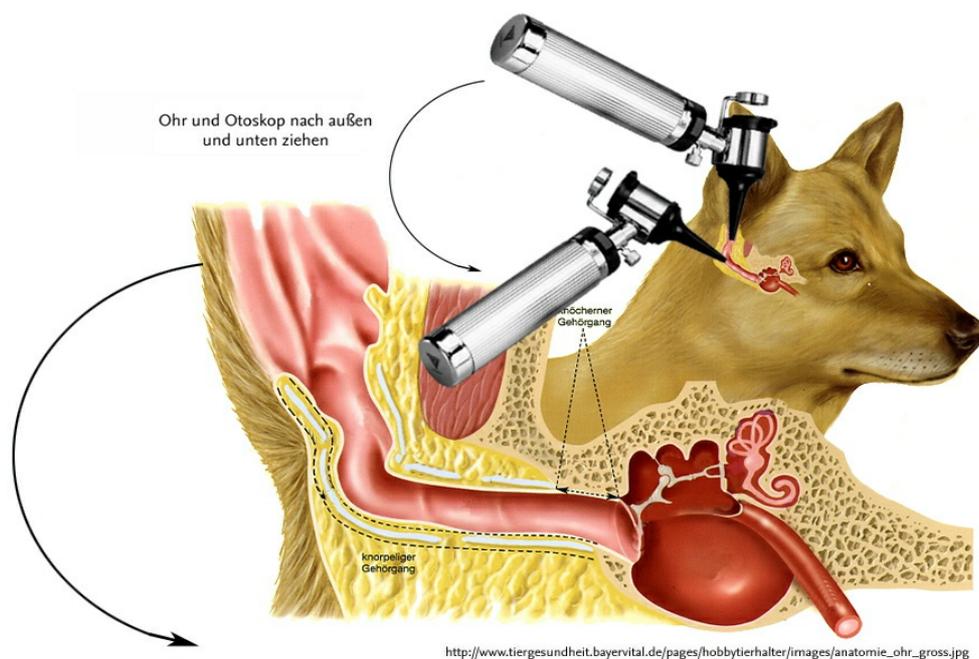
Gehör

Ohruntersuchung

Zur näheren Untersuchung des Ohres kommt ein Otoskop zur Anwendung. Mit seiner Hilfe kann der Untersucher den äusseren Gehörgang bis zum Trommelfell in Augenschein nehmen. Im Gegensatz zum Menschen, bei dem der Gehörgang von der Ohrmuschel zum Trommelfell horizontal verläuft - hier hat der Untersucher sofort Blick auf das Trommelfell ist dies beim Tier anders. Bei Hund und Katze zieht der erste Teil des äusseren Gehörgangs von oben nach unten, knickt dann nach innen ab und horizontal bis zum Trommelfell.

Soll das Ohr des Tieres untersucht werden, muss wie folgt vorgegangen werden:

1. Fixieren des Kopfes des Tieres um Abwehrbewegungen zu vermeiden
2. Einführen des Otoskops in den äusseren Gehörgang - im 1. Schritt von oben nach unten
3. Ohrmuschel fassen und gemeinsam mit dem Otoskop im 2. Schritt nach lateral und unten ziehen



http://www.tiergesundheitsbayervital.de/pages/hobbytierhalter/images/anatomie_ohr_gross.jpg

Abb.65: Handhabung eines Otoskops zur Ohruntersuchung

Nur auf diese Weise wird der Blick auf das Trommelfell frei.

Ist das Trommelfell ohne besonderen Befund stellt es membranartig durchscheinend dar. Der mit dem Trommelfell verwachsene Fuß des Hammers ist als opake Struktur im oberen sichtbaren Bereich des Trommelfells erkennbar (hier hervorgehoben durch eine blinkende Umrandung).

Während sich beim Hund rassetypisch unterschiedlich viele Haare im äusseren aber auch weit nach innen reichenden Teil des Gehörganges finden, ist dies bei der Katze nicht so. Ihr Gehörgang ist frei von Haaren.

Typisch ist ein porzellanartiges, hellrosa Erscheinungsbild der auskleidenden Schleimhaut und etwas Zerumen (Ohrschmalz).



Abb.66: Aufsicht auf das Trommelfell

Gleichgewicht

Ohne ihn würden wir immerzu Karussell fahren: Der Gleichgewichtssinn steuert den Körper wie ein dreidimensionales Navigationsgerät durch den Raum. Seine Zentrale sitzt tief in unserem Ohr und signalisiert Muskeln und Gelenken: Haltung bewahren! Er setzt sich aus mehreren Einzelsinnen zusammen

- der vestibulären Wahrnehmung, die von der Funktion des Gleichgewichtsorgans bestimmt wird
- der visuellen Wahrnehmung; hier spielen die Augen die Schlüsselrolle
- der taktilen (passiv) resp. haptische (aktiv) Wahrnehmung, die den Tastsinn bestimmt und der propriozeptiven Wahrnehmung, die die Tiefensensibilität ermöglicht

nachfolgend wird v.a. auf den Bereich der vestibulären Wahrnehmung näher eingegangen.

Die Zentrale des Gleichgewichtssinns, das so genannte vestibuläre System, ist als Teil des Ohrs und damit auf jeder Seite des Kopfes einmal vorhanden d.h. spiegelbildlich paarig angelegt. Es befindet sich im Innenohr, einem komplex gestalteten Hohlraumssystem im Felsenbein, das einen Teil des Schläfenbeins darstellt und das auch die Hörschnecke (Cochlea) enthält. Aus diesem Grund wird dieser Bereich im Lateinischen auch als Organum vestibulocochleare = Vorhof-Schnecken-Organ bezeichnet.

Der Vestibularapparat hat fünf Bestandteile:

Drei Bogengänge und zwei Vorhofsäckchen, Utriculus und Sacculus.

Das Gleichgewichtsorgan ist die ältere Ohrkomponente des Innenohrs, wie man aus der nachfolgenden vergleichenden Abbildung verschiedener Wirbeltierklassen erkennen kann.

Aus dem bei Fisch und Amphibium dritten Vorhofsäckchen der Lagena hat sich bei den höheren Tiere der Bereich entwickelt, der der Schallwahrnehmung dient.

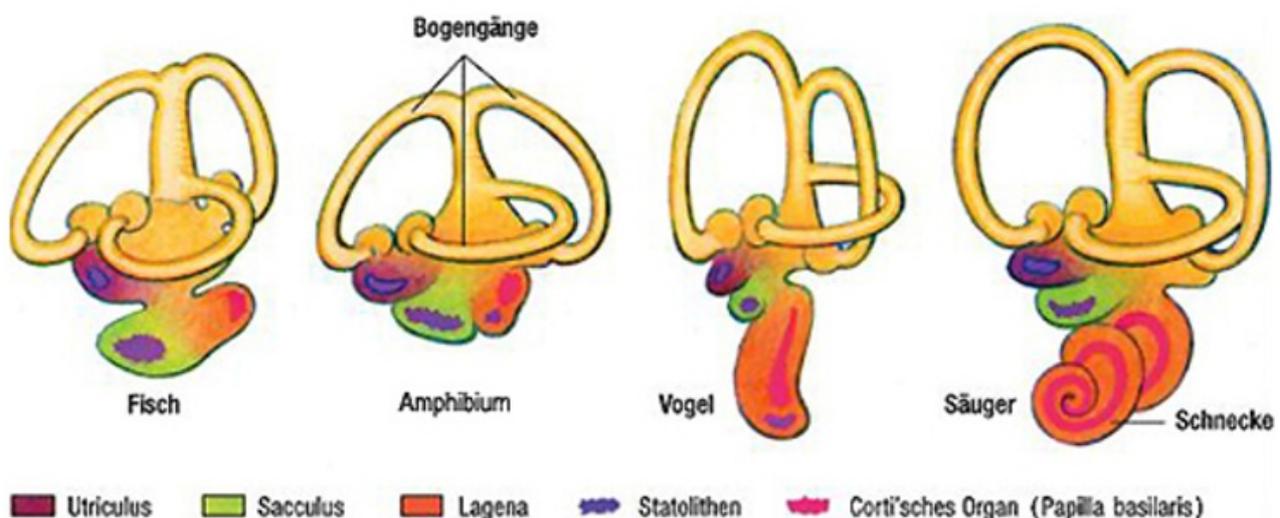


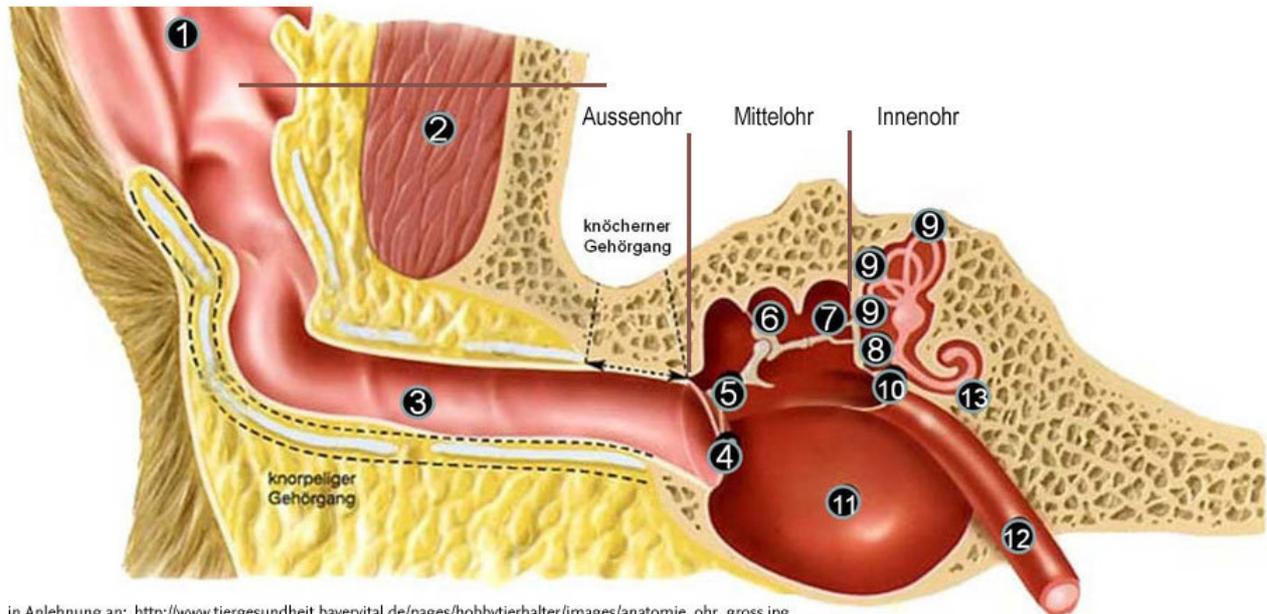
Abb.67: Vergleich der Innenohrentwicklung bei verschiedenen Spezies

Quelle: www.wissen.de

Gleichgewicht

Anatomische Strukturen

Bei den physiologischen Vorgängen, die Einfluss auf das Hören nehmen, spielen anatomische Strukturen eine wichtige Rolle. Nachfolgend haben Sie die Gelegenheit Ihre Kenntnisse in diesem Bereich aufzufrischen.



in Anlehnung an: http://www.tiergesundheitsbayervital.de/pages/hobbytierhalter/images/anatomie_ohr_gross.jpg
<http://www.tiergesundheitsbayervital.de/pages/ihrhund/anatomie/ohr/index.jsp>

Fettdruck = gebräuchliche Bezeichnung

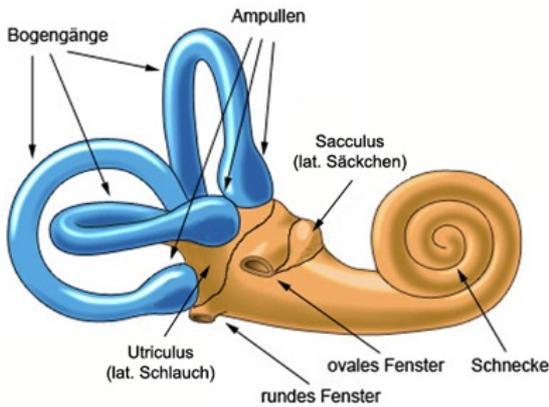
1	Ohrmuschel	Auricula auris
2	Schläfenmuskel	Musculus temporalis
3	Äußerer Gehörgang	Meatus acusticus externus
4	Trommelfell	Membrana tympani
5	Hammer	Malleus
6	Amboß	Incus
7	Steigbügel	Stapes
8	Ovales Fenster	Fenestra ovalis
9	Gleichgewichtsorgan	Oregon vestibulae = Vestibularorgan
10	Rundes Fenster	Fenestra cochleae rotunda
11	Paukenhöhle	Cavum tympani
12	Ohrtrumpete	Tuba auditiva Eustachii = Eustachi(sche) Röhre
13	Hörschnecke	Cochlea = Kochlea bzw. Kochlearorgan

Abb. 68: Querschnitt durch das Hundeohr mit Bezeichnungen

Gleichgewicht

Innenohrstrukturen (Übersicht)

Das Innenohr (Organum vestibulocochlearis) beherbergt neben der für den Hörvorgang maßgeblichen Schecke (Cochlea) die verschiedenen Komponenten des Gleichgewichtsorgans (Vestibularorgan), das aus folgenden Komponenten besteht:



in Anlehnung an: planet schule, Wissenspool total phänomenal - Sinne - Das menschliche Ohr

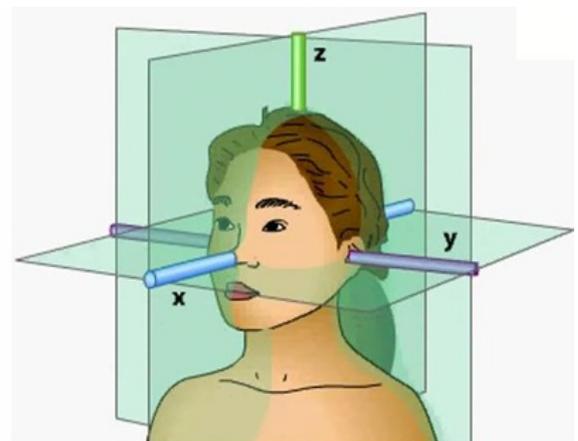
- Drei Bogengänge Sie werden aufgrund Ihrer Optik auch als Labyrinth bezeichnet. Es handelt sich hierbei um mit Endolymphe gefüllte, an einem Ende verdickte Schläuche, den sog. Ampullen (lat. Ampulla) in denen die Sinneszellen enthalten sind. Die Bogengänge sind nahezu rechtwinkelig zueinander in den drei Ebenen des Raumes angeordnet.
- Zwei Vorhofsäckchen dem kleineren Sacculus (lat. Säckchen), der mit der Schnecke in Verbindung steht und dem größeren Utriculus (lat. Schlauch), der mit den Ampullen korrespondiert.

Abb. 69: Innenohrstrukturen

An ihrer Vorderwand liegt eine Region, in denen mikroskopisch kleine Körnchen (Statolithen) aus kristallinem Kalziumkarbonat in einer Proteinmatrix eingelagert sind. Diese fleckartige Anhäufung bezeichnet man als Macula sacculi resp. utriculi, weshalb diese Komponenten auch Maculaorgane genannt werden.

Durch ihre Ausrichtung im Raum ermöglichen uns die Bogengänge Drehbewegungen wie Kopfschütteln und Nicken zu erkennen.

Die drei Bogengänge funktionieren dabei wie drei Wasserwagen (Abb. 71) in den Ebenen des Raumes, wodurch der dreidimensionale Raum interpretiert werden kann.



aus: Dr. G. Bhanu Prakash: The Vestibular System

Abb.70: The Vestibular System

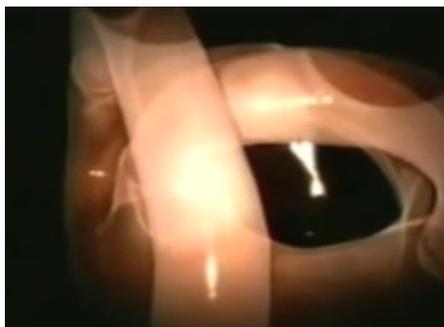


Abb.71: Wasserwaagenfunktion

Während die Bogengänge Drehbewegungen erkennen lassen, detektieren die Maculaorgane Beschleunigungsvorgänge. Begünstigt wird dies durch die enthaltenen Otolithen, weshalb diese Organanteile gerne auch als Otolithisches Organ bezeichnet werden. Sie liegen horizontal und vertikal vor den Bogengängen im Innenohr, wodurch Geschwindigkeits-veränderungen von vorne nach hinten und oben nach unten bzw. umgekehrt erkannt werden

Gleichgewicht

Innenohrstrukturen (Feinbau)

Da das Prinzip der Erkennung von Lageveränderungen des Körpers im Raum auf Trägheitseffekten basiert, ist das Verständnis des physikalischen Grundprinzips der Trägheit, d.h. dem Bestreben jeder Materie seine Lage beizubehalten, von Bedeutung. Abhängig von der Dichte des Stoffes wirkt sich eine einwirkende Kraft dabei unterschiedlich stark aus. Man kann sich diese Anteile des Gleichgewichtsorgans als flüssigkeitsgefüllte Räume vorstellen, die von Membranen umgeben sind, die die Wände bilden. In ihrem Inneren fließt Flüssigkeit, die sog. Endolymphe. Während die im Schädel fixierten feststofflichen Anteile des Gleichgewichtsorgans mit dem Kopf sofort jeder Lageveränderung folgen, hängt die innenbefindliche Endolymphe nach. Sie reagiert verzögert, d.h. träger als die sie umgebende Wand. Hat die Wand Fortsätze, die wie "Finger" in der Flüssigkeit liegen, kippen diese Finger in Abhängigkeit von der Lageveränderung um. Diese am Gleichgewicht beteiligten Strukturen tragen Haarsinneszellen, die dem Gehirn die Lageveränderungen vermitteln.



Abb.73: Cupula

Quelle: <http://dasgehirn.info/wahmehmen/hoeren/ein-labyrinth-fuers-gleichgewicht-2534>

An ihrer Vorderwand liegt eine Region, in denen mikroskopisch kleine Körnchen (Statolithen) aus kristallinem Kalziumkarbonat in einer Proteinmatrix eingelagert sind. Diese fleckartige Anhäufung bezeichnet man als Macula sacculi resp. utriculi, weshalb diese Komponenten auch Maculaorgane genannt werden.

Der Sacculus liegt senkrecht, der Utriculus waagrecht im Kopf. Aus diesem Grund reagiert das kleine Vorhofsäckchen auch auf Beschleunigung nach oben oder unten, wohingegen das große Vorhofsäckchen auf nach vorne bzw. hinten gerichtete Kräfte anspricht. Auch hier gibt es Haarsinneszellen, deren Zilien in eine galertige Membran hineinragen. Diese enthält die "Ohrsteinchen" und wird daher als Otolithenmembran bezeichnet.

Anmerkung

Bitte beachten Sie die vergleichbaren Vorgänge innerhalb der Trochlea.



Abb.72: Haarsinneszellen (em-vergrößert)
Quelle: TV BBC The human body

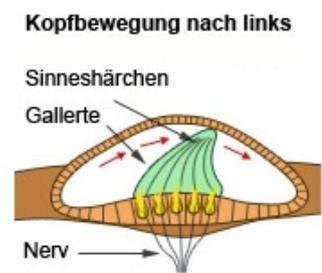


Abb. 75: Erkennung von Lageveränderungen im Raum

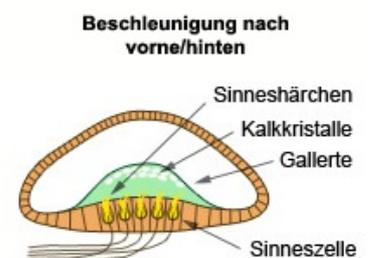


Abb. 74: Erkennung von Beschleunigungsvorgängen
Quelle: <http://www.youtube.com/watch?v=UKaBZprL3t4>