

4 Sinnesorgane: Das Ohr

4.1 Information und Kommunikation

4.1.1 Das menschliche Nervensystem

Es gibt im Körper eines Menschen im Wesentlichen 2 Kommunikationssysteme: ein chemisches System, wo der Informationsfluss ausschließlich durch Mediatormoleküle (**Hormone**) vermittelt wird, und ein System mit festen Bahnen, das **Nervensystem**.

Das Nervensystem hat zwei unterschiedliche Funktionsweisen: das **animale** (anima = Seele, Geist), **somatische** oder **willkürliche Nervensystem** nimmt die Umweltreize auf, verarbeitet sie, steuert *bewusste* Handlungen und erzeugt Vorstellungen. Das **autonome** oder **vegetative Nervensystem** ist für die Körperfunktionen zuständig und kann nicht willentlich beeinflusst werden. Die Zentren beider Systeme befinden sich im Gehirn und Rückenmark. Im 19. Jahrhundert dachte man, die beiden Systeme wären räumlich und funktionell voneinander weitgehend unabhängig; aber inzwischen weiß man, dass zwischen beiden zahlreiche anatomische und funktionelle Verbindungen bestehen.

Strukturell wird Nervensystems in zwei Teile unterteilt. Der erste Teil befindet sich in der Wirbelsäule und dem Schädel und umfasst das **Rückenmark** und das **Gehirn**. Es besteht aus einem dichten Gewebe von Nervenzellen (und Gliazellen) und wird als **zentrales Nervensystem (ZNS)** bezeichnet. Da die zur Haut und den Sinnesorganen gerichteten Nerven des animalen Nervensystems direkt aus dem Gehirn und dem Rückenmark stammen, wird dieses auch als **cerebrospinales Nervensystem** bezeichnet.

Der zweite Teil des Nervensystems, das **periphere Nervensystem (PNS)** erstreckt sich in alle Bereiche des Körpers. Es ist weit verzweigt und besteht aus Nerven, Nervensträngen und kleineren Nervenansammlungen (Ganglien).

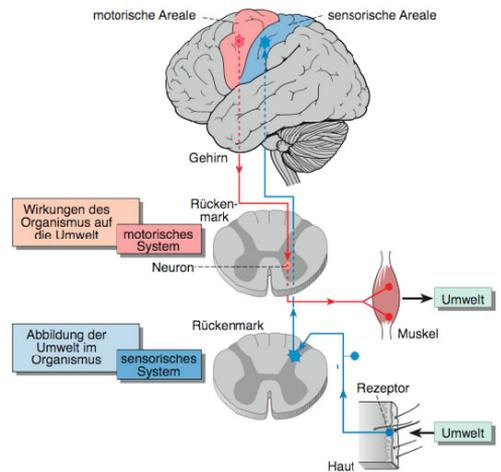


Abbildung 4.1: Prinzipieller Aufbau des sensorischen und motorischen Systems.

Der Organismus tritt über das Nervensystem mit der Umwelt in Wechselwirkung. Die Umwelt wirkt auf den Organismus, und dies wird mit Hilfe des **sensorischen Systems** ("Merksystem") abgebildet. Dies beginnt an speziell ausgebildeten Strukturen einer peripheren Nervenzelle. Diese Umweltsensoren werden als **Rezeptoren** bezeichnet. Die Reaktionen der Rezeptoren werden als elektrische Signale über die angeschlossenen Nervenfasern in das ZNS übertragen. Dort erfolgt die bewusste Empfindung und Wahrnehmung der Umwelt.

Das Nervensystem steuert auch den Informationsfluss in umgekehrter Richtung: vom motorischen System werden über Nervenimpulse Signale an Muskeln übertragen. Auf diese Weise erfolgt die Rückwirkung des Organismus auf die Umwelt.

4.1.2 Informationsgehalt

Der Mensch nimmt Daten der Umgebung mit Hilfe der Sinnesorgane auf und verarbeitet diese Information weiter. Um die Kapazität der Informations-

aufnahme des Menschen zu quantifizieren, muss zunächst der Begriff der Information präzisiert werden.

Der Informationsgehalt einer Nachricht hängt vom Wissensstand des Empfängers ab. Wenn man liest, die Sonne würde morgen aufgehen, dann lernt man von dieser Aussage wesentlich weniger als wenn gesagt wird, dass sie nicht aufgehen wird. In der Informationstheorie wird dieser "Überraschungsgehalt" quantifiziert. Dadurch ist es möglich, zum Beispiel den Informationsgehalt einer Nachricht anzugeben oder auch die maximale Nachrichtenmenge pro Zeiteinheit, die über einen Übertragungskanal gesendet werden kann, wenn auch Störungen mit berücksichtigt werden. Wenn $p(x_i)$ die Wahrscheinlichkeit einer Nachricht ist (zum Beispiel das Auftreten eines Symbols x_i der Nachrichtenquelle), dann ist der zugehörige **Informationsgehalt** I_i gegeben durch

$$I_i := -\log_2(p(x_i)) .$$

Der Maßstab ist so festgelegt, dass eine Nachricht mit $p = 1/2$ den Informationsgehalt **1 bit** ergibt. (Wenn der natürliche Logarithmus zur Definition benutzt wird, dann spricht man nicht von Bits, sondern von Nats.) Gleich wahrscheinliche binäre Zeichen besitzen den Informationsgehalt von 1 bit pro Zeichen.

Der **mittlere Informationsgehalt** einer Nachrichtenquelle mit einem Vorrat aus N Symbolen ergibt sich durch die Bildung des Erwartungswertes über die individuellen Informationsgehalte aller Symbole

$$H(x) := E\{I_i\} = -\sum_{i=1}^N p(x_i) \cdot \log_2(p(x_i)) .$$

Diese Größe nennt man wegen ihrer formalen Entsprechung **Entropie**. Die Entropie ist bei gleich wahrscheinlichen Zeichen am größten: $H_{max}(x) = \log_2(N)$. Da dies auch die Anzahl der binären Entscheidungen ist, die notwendig sind um eines der N Zeichen auszuwählen, wird diese Größe auch **Entscheidungsgehalt** genannt.

Bei einem sprachlichen Text z.B. sind die einzelnen Symbole nicht unabhängig voneinander. Daher müssen lange Symbolfolgen betrachtet werden um die Entropie zu berechnen:

$$H(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \cdot E\{I_n\} .$$

Für einen deutschen Text erhält man eine Entropie von 1.3 bit pro Buchstabe, bei einem englischen Text 1.0 bit pro Buchstabe. Der Maximalwert für 30 Zeichen wäre durch den Entscheidungsgehalt gegeben und ist 4.9 bit pro Buchstabe. Die Differenz zwischen Entscheidungsgehalt und Entropie nennt man **Redundanz**. Sie ist bei englischen Texten höher als bei deutschen (3.9 statt 3.6 bit pro Buchstabe).

4.1.3 Kapazität eines Übertragungskanals

Information wird zwischen unterschiedlichen Orten übertragen, z.B. zwischen einer Sinneszelle und dem Gehirn. Man bezeichnet den Pfad zwischen Sender und Empfänger als Kommunikationskanal.

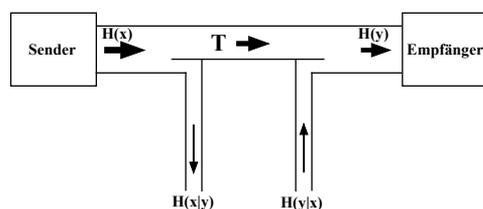


Abbildung 4.2: Einseitig gerichteter Informations- oder Nachrichtenkanal.

Der sogenannte *Shannonsche Nachrichtenkanal* ist einseitig gerichtet, das bedeutet die Nachrichtenquelle (Sender) ist unabhängig vom Empfänger. (Die Kommunikation zwischen Lebewesen ist dagegen nicht unabhängig, da die erzeugten Symbole von den empfangenen Symbolen statistisch abhängig sind. Dieser allgemeinere Fall, die *bidirektionale Kommunikation nach Marko* ist für das Folgende aber nicht weiter wichtig.) Wir bezeichnen die Informationseinheiten an der Quelle mit x_i , diejenigen, die beim Empfänger eintreffen mit y_i . Im Idealfall gilt $x_i = y_i \forall i$.

Informationsübertragung erfolgt in der Praxis nie perfekt, sondern unterliegt Störungen. Informationstechnisch bedeutet eine Störung, dass ein Teil der empfangenen Zeichen y_j sich von den gesendeten unterscheidet. Verschiedene x_i können das gleiche Zeichen y_j ergeben (Rückschlussunsicherheit), die zugehörige Rückschlussentropie $H(x|y)$ wird auch als *Äquivokation* bezeichnet.

Unter *Irrelevanz* oder *Streuentropie* $H(y|x)$ versteht man, dass aus einem Zeichen x_i verschiedene y_j werden. Sie ist gegeben als

$$H(a|b) := \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \cdot E\{p(a|b)\},$$

d.h. durch die bedingte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von a bei der Kenntnis von b benötigt. Von der Entropie $H(x)$ gelangt nur die Differenz $T = H(x) - H(x|y)$ an das Kanalende. T ist der mittlere Transinformationsgehalt, oder die *Synentropie*. Für den Empfänger wirkt das Kanalende als Informationsquelle der Entropie $H(y) = T + H(y|x)$. Für den ungestörten Fall ist $H(y) = T = H(x)$. Bei einem sehr stark gestörten Kanal werden die Zufallsvariablen x und y statistisch unabhängig, so dass mit $H(x|y) = H(x)$ die Transinformation verschwindet. $H(y)$ besteht dann nur noch aus dem irrelevanten Anteil.

Der maximale Wert der Transinformation bestimmt die **Kanalkapazität** C , also den Maximalwert des möglichen Nachrichtenflusses (bei gegebenem Kanal). Wenn τ die mittlere Übertragungszeit je Nachricht (Symbol) ist, dann gilt

$$C = \left(\frac{T}{\tau}\right)_{max}.$$

Bei einem symmetrischen Binärkanal mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit q und einer Schrittdauer τ ist

$$C = \frac{1}{\tau} [1 + q \log_2 q + (1 - q) \log_2 (1 - q)].$$

Für einen analogen Kanal mit der Bandbreite Δf , der Sendeleistung P_s und der Störleistung P_n ergibt sich für Gaußsche Verteilungen von Sende- und Störsignal die Kanalkapazität

$$C = \Delta f \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_n}\right).$$

Typische Werte für die Kanalkapazität technischer Nachrichtensysteme sind:

- Telefonkanal: $C = 5 \cdot 10^4$ bit/s
- Fernsehkanal: $C = 7 \cdot 10^7$ bit/s

Diese Kanäle sind angepasst an die Informationskapazität menschlicher Sinnesorgane, z.B.:

- Ohr: $C = 4 \cdot 10^4$ bit/s
- Auge: $C = 3 \cdot 10^6$ bit/s

Die von Menschen *bewusst* verarbeiteten Kapazitätswerte sind demhingegen erheblich kleiner. Beispiele:

- leise / laut lesen: $C = 45$ bit/s / $C = 30$ bit/s
- Schreibmaschineschreiben: $C = 16$ bit/s
- Klavierspielen: $C = 23$ bit/s
- Addieren / Multiplizieren: $C = 12$ bit/s
- Abzählen: $C = 3$ bit/s

Ein Mensch kann nur Informationsflüsse mit < 50 bit/s bewusst aufnehmen und verarbeiten. Die notwendige Informationsreduktion findet in der Dekodierung der Sinneseindrücke durch das ZNS statt.

4.1.4 Datenaufnahme

Rezeptoren reagieren (nur) auf adäquate Reize und übersetzen ihn in eine elektrische Erregung. Es muss außerdem eine **Reizschwelle** überschritten werden um die Reizempfindung auszulösen. Häufig reicht die Sensibilität von Rezeptoren bis an die physikalischen Grenzen heran, zum Beispiel können nur 5 Photonen als Lichtblitz wahrgenommen werden.

Als **Transduktion (bioelektrische Wandlung)** bezeichnet man die Umwandlung eines Reizes in ein körpereigenes Signal, das **Rezeptorpotential**. Dem Bau nach können verschiedene Strukturen für die Rezeptorfunktion verantwortlich sein. **Primäre Sinneszellen** sind spezialisierte Nervenzellen mit einem Rezeptorteil (oft Sinneshärchen) und einem Nunit beziehungsweise Axon (zum Beispiel Sehzellen). Sie setzen den Reiz unmittelbar in Impulse (Aktionspotentiale) um.

Eine **sekundäre Sinneszelle** bildet eine Synapse mit dem Ende einer afferenten Nervenfaser. Es sind also

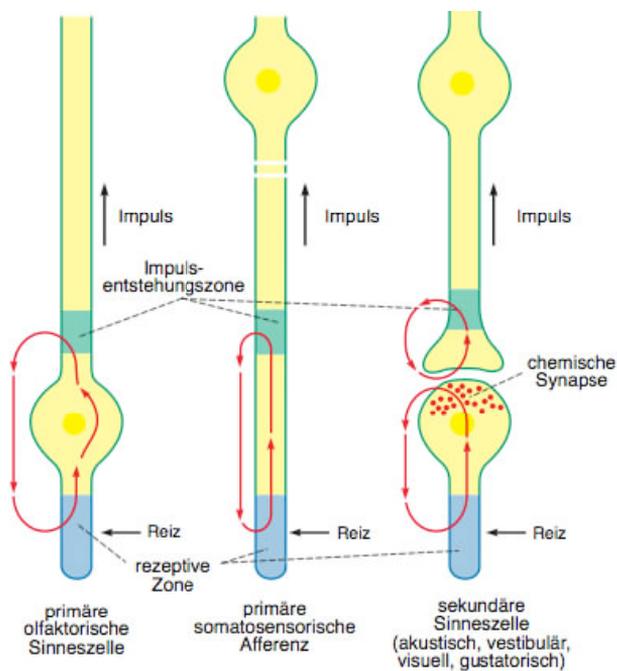


Abbildung 4.3: Bioelektrische Wandlung an Sinnesrezeptoren.

spezialisierte Epithelzellen mit synapsenähnlichen Gebilden zur Reizweiterleitung an Nervenfasernenden. Das Rezeptorpotential moduliert die Freisetzung einer Transmittersubstanz, so dass der Impuls im nachgeschalteten afferenten¹ Neuron entsteht.

4.1.5 Sinnesphysiologie

Die Sinnesorgane nehmen Reize auf und verarbeiten diese weiter zu (Nerven-)impulsen, welche an das zentrale Nervensystem weitergeleitet werden. Das zentrale Nervensystem bekommt die Gesamtheit aller Impulse von verschiedenen Rezeptoren und auf diese Weise kann ein **Abbild der Umwelt** entstehen. Die subjektive Verarbeitung eines *einzelnen* Sinnreizes führt zu einem **Sinneseindruck**. In einer **Sinnesempfindung** sind mehrere Sinneseindrücke zu einem Gesamtbild zusammengefasst. Durch die Bewertung dieser Empfindung und die Deutung mit der Erfahrung gelangen wir zu der **Wahrnehmung**.

¹afferens=hinführend

Das Gesamtbild einer Empfindung ist durch 4 Parameter, die sogenannten "Dimensionen", beschreibbar. Diese sind:

- **Modalität.** Zum Beispiel die klassischen 5 Sinne: Gesicht-, Gehör-, Tast-, Geschmacks- und Geruchssinn. Innerhalb einer Modalität kann man verschiedene Arten von Sinneseindrücken unterscheiden, die **Submodalitäten**.²
- **Intensität.** Eine Empfindung kann stark oder schwach sein.
- **Räumlichkeit.** Eine Empfindung kann lokalisiert werden (z.B. Berührung der Haut).
- **Zeitlichkeit.** Eine Empfindung hat einen zeitlichen Beginn und eine Abklingzeit.

4.2 Akustische Grundlagen

4.2.1 Schallwellen

Wir berechnen im Folgenden die Fortpflanzung von Schall in einer Dimension und betrachten hierfür einen luftgefüllten Zylinder. Dies ist z.B. das einfachste Modell für den äußeren Gehörgang. Eine Schallwelle entspricht einer zeitlich und räumlich periodischen Auslenkung von Druck und Dichte des Mediums. Dabei interessieren vor allem die Änderungen des Drucks, nicht der Mittelwert.

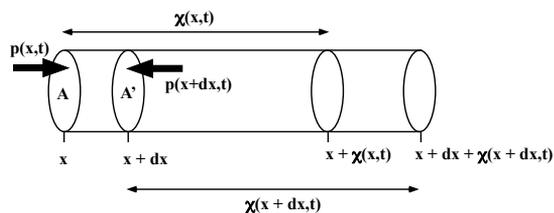


Abbildung 4.4: Beschreibung von Schallwellen.

Für den Druck schreiben wir

$$p = p_0 + \Delta p(x, t),$$

²In der klassischen subjektiven Sinnesphysiologie auch als "Qualität" bezeichnet.

Tabelle 4.1: Beispiele:

Rezeptortyp	Empfindungsmodalität	Submodalität (Qualität)
Photorezeptoren	Gesichtssinn	Helligkeit, Dunkelheit, Farben, Form, Bewegung
Thermorezeptoren	Temperatursinn	Kälte, Wärme
Chemorezeptoren	Geruchssinn	verschiedene Gerüche
	Geschmackssinn	Säure, Salze, Süße, Bitterkeit
Mechanorezeptoren	u.a.: Gehörsinn	Tonhöhen

und für die Dichte

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho(x, t),$$

wobei der Index $_0$ für die jeweiligen Gleichgewichtswerte steht (ohne Schallwelle).

Für die Beschreibung der Schallausbreitung benötigen wir drei Gleichungen: die erste gibt an, wie eine Gasbewegung zu einer Dichteänderung führt, die zweite beschreibt den Zusammenhang zwischen Dichte- und Druckänderung, die dritte zeigt wie ein Druckgradient eine Gasbewegung zur Folge hat.

Wenn ein Volumenelement in einem Gas bewegt wird, dann ändert sich die Dichte. Die Verschiebung der Luftmoleküle auf Grund des Schalls sei $\chi(x, t)$. Luft an der Stelle x bewegt sich zur neuen Position $x + \chi(x, t)$, und Luft in der Nähe bei $x + dx$ bewegt sich nach $x + dx + \chi(x + dx, t)$.

Aus der Massenerhaltung finden wir, dass die Gasmasse im neuen Volumen gleich der Masse im alten Volumen Adx sein muss:

$$\rho_0 Adx = \rho A \{x + dx + \chi(x + dx, t) - x - \chi(x, t)\}.$$

Mit der Taylor-Entwicklung 1. Ordnung

$$\chi(x + dx, t) = \chi(x, t) + \frac{\partial\chi}{\partial x} dx$$

und der obigen Gleichung für die Dichte bekommt man:

$$\Delta\rho = -\rho_0 \frac{\partial\chi}{\partial x} - \Delta\rho \frac{\partial\chi}{\partial x}.$$

Der zweite Term kann vernachlässigt werden wenn die Dichteänderung $\Delta\rho \ll \rho_0$ ist. Damit wird die Dichteänderung als Funktion der Auslenkung

$$\Delta\rho(x, t) = -\rho_0 \frac{\partial\chi(x, t)}{\partial x}. \quad (4.1)$$

4.2.2 Die Wellengleichung

Die Dichteänderung entspricht einer Druckänderung. Druck und Dichte sind miteinander verbunden, $p = f(\rho)$. Wir verwenden die Abkürzung

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0 \kappa} = \left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_{\rho_0}.$$

Damit gilt für kleine Verschiebungen und Dichteschwankungen

$$p(x, t) = p_0 + \Delta p(x, t) = p_0 + \alpha \cdot \Delta\rho(x, t). \quad (4.2)$$

Die dritte Gleichung, die für die Herleitung der Wellengleichung benötigt wird, ist die Navier-Stokes-Gleichung

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{v} \right) = -\vec{\nabla} p + \eta \Delta \vec{v}.$$

Wenn die Reibung und die Nichtlinearität vernachlässigt werden können ergibt sich daraus die Euler-Gleichung, welche in einer Dimension die Form $\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x}$ hat. Die lokale Geschwindigkeit v ergibt sich als Ableitung der Auslenkung, $v = \partial\chi/\partial t$. Damit wird die Euler-Gleichung

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial x}, \quad (4.3)$$

wobei wir wiederum angenommen haben, dass die Druckschwankungen klein sind, $\rho \approx \rho_0$. Elimiert man den Druck p mit Hilfe von Gl. (4.2), dann erhält man

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} = -\alpha \frac{\partial \Delta\rho}{\partial x}.$$

Mit (4.1) und der Umbenennung

$$c^2 = \alpha = \frac{1}{\rho_0 \kappa}$$

erhält man die Wellengleichung

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2} \quad (4.4)$$

und Gleichung (4.2) ist dann

$$\Delta p = \Delta \rho \cdot c^2 \quad (4.5)$$

Analoge Wellengleichungen findet man für die Dichte

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \quad (4.6)$$

und den Druck

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (4.7)$$

weswegen man elastische Wellen in einem Gas auch als "Druckwellen" bezeichnet.

4.2.3 Lösung der Wellengleichung

Die einfachsten Lösungen einer Wellengleichung sind ebene Wellen. In diesem Fall entspricht das

$$\chi(x, t) = \chi_0 \sin(\omega t - kx), \quad c = \omega/k. \quad (4.8)$$

Hier stellen ω die (Kreis-)frequenz, k die Wellenzahl und c die Phasengeschwindigkeit dar.

Für die Geschwindigkeit, mit der sich die Luftmoleküle infolge der Druckschwankungen hin- und herbewegen, folgt

$$v(x, t) = \frac{\partial \chi}{\partial t} = \omega \chi_0 \cos(\omega t - kx).$$

Man bezeichnet die Amplitude

$$v_0 = \omega \chi_0$$

dieser Geschwindigkeit als **Schallschnelle**.

Die Druckwelle muss die gleiche räumliche und zeitliche Abhängigkeit aufweisen,

$$\Delta p(x, t) = \Delta p_0 \sin(\omega t - kx).$$

Setzt man dies und (4.8) in die Euler-Gleichung (4.3) ein, dann erhält man

$$\rho_0(-\omega^2)\chi_0 \sin(\omega t - kx) = \Delta p_0 k \sin(\omega t - kx).$$

Daraus folgt der wichtige Zusammenhang zwischen der Schallschnelle, der Geschwindigkeit, dem Druck und der Dichte:

$$\Delta p_0 = \rho_0 v_0 c. \quad (4.9)$$

4.2.4 Schallimpedanz und Intensität

Die Schallschnelle ist proportional zum Schalldruck. Die Proportionalitätskonstante

$$Z := \frac{\Delta p_0}{v_0} = \rho_0 c$$

wird als **Wellenwiderstand** oder Schallkennimpedanz oder Schallimpedanz bezeichnet. In Luft beträgt die Impedanz

$$Z_{Luft} = 1.2 \text{ kgm}^{-3} \cdot 340 \text{ ms}^{-1} = 430 \text{ Nsm}^{-3},$$

in Wasser ist $Z = 1.46 \cdot 10^6 \text{ Nsm}^{-3}$. Die Schallimpedanzen der beiden Medien, welche für das Hören am wichtigsten sind, unterscheiden sich somit um einen Faktor 3400.

Weil ebenfalls

$$Z = \sqrt{\frac{\rho_0}{\kappa}}$$

gilt, bekommt man für die Kompressibilität den Ausdruck

$$\kappa = \frac{1}{\rho_0 c^2}.$$

Die **Energiedichte** einer Schallwelle ist gegeben durch die Summe aus kinetischer und Druckenergie. Bei der maximalen Geschwindigkeit $v = v_0$ verschwindet die Druckenergie und wir haben nur kinetische Energie

$$w = \frac{1}{2} \rho_0 v_0^2.$$

Mit Hilfe der Schallimpedanz und der Kompressibilität schreiben wir dies als

$$w = \frac{1}{2} \rho_0 \Delta p_0^2 \frac{1}{\rho_0^2 c^2}.$$

Daraus ergibt sich die **Intensität**

$$I = wc = \frac{1}{2}\rho_0\omega^2\chi_0^2c = \frac{1}{2}\kappa\Delta p_0^2c.$$

Mit Hilfe des Ausdrucks für die Kompressibilität erhalten wir

$$I = \frac{1}{2\rho_0c}\Delta p_0^2 = \frac{1}{2Z}\Delta p_0^2.$$

4.2.5 Schalldruckskala und Schallpegel

Der Schalldruck (die Amplitude) und die Frequenz der Schallschwingung sind für das Hören wichtig. Der Frequenzbereich des menschlichen Gehörs reicht von

$$\nu = 16\text{Hz bis } 20\text{kHz}.$$

Schwingungen mit großem Schalldruck bewirken Hörempfindungen größerer Lautstärke als Schwingungen mit geringem Schalldruck. Von dem leisesten noch wahrnehmbaren 2 kHz-Ton bis zur Schmerzgrenze erstreckt sich der Bereich $20\ \mu\text{Pa}$... $20\ \text{Pa}$ (Effektivwerte).

An der Hörschwelle ($20\ \mu\text{Pa}$) beträgt die Intensität $I_0 = 10^{-12}\text{W/m}^2$; an der Schmerzschwelle etwa $I_{max} = 1\text{W/m}^2$.

Das Gehör nimmt den Schalldruck in etwa logarithmisch wahr. Deswegen, und weil die akustisch wahrnehmbaren Schalldrücke 6 Zehnerpotenzen umfassen, wird eine **logarithmische Schalldruckskala** verwendet. Um den Schalldruck dimensionslos zu machen, wird ein **Referenzdruck** benötigt. Die Definition des **Schallpegels L** lautet:

$$L = 20 \cdot \log\left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0}\right) \text{dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Wenn man als Bezugsgröße die Wahrnehmungsgrenze des menschlichen Gehörs nimmt, dann ist $\Delta p_0/\sqrt{2} = 20\ \mu\text{Pa}$ ($I_0 = 10^{-12}\text{W/m}^2$). Die so berechneten Schallwerte werden mit **dB SPL** (Sound Pressure Level) bezeichnet.

Diese physikalische Definition ist in der Audiologie und Akustik üblich. Sie berücksichtigt jedoch

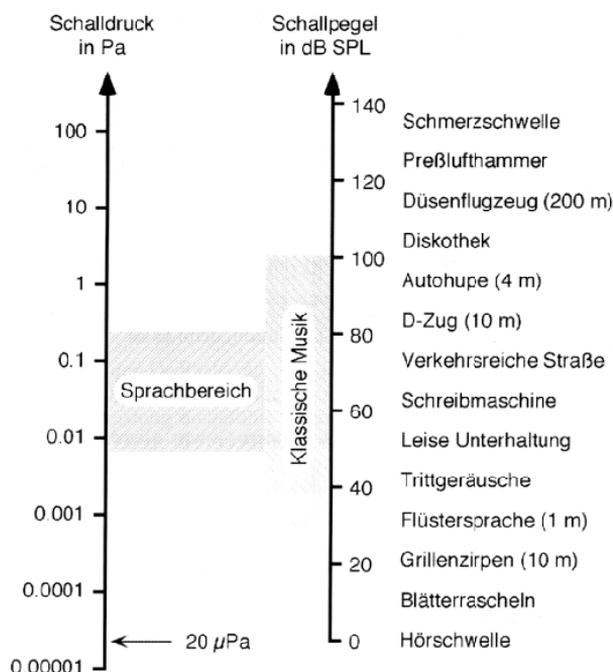


Abbildung 4.5: Schalldruck und Schallpegel für verschiedene Geräusche.

nicht den physiologischen Lautstärkeindruck. Dafür verwendet man ein anderes Maß: das **Phon** oder **dB(A)**. Da hierbei bewertete Schallpegel verwendet werden, ist dies keine physikalische Messgröße. Bei einer Frequenz von 1 kHz stimmt die dB(A)-Skala mit der dB SPL-Skala überein. Für andere Frequenzen werden zur Umrechnung Frequenzbewertungskurven verwendet, das sind Kurven gleicher Lautstärke.

4.2.6 Reflexion und Transmission von Schallwellen

Wir betrachten eine Welle, die vom Gebiet 1 mit ρ_1 , c_1 und $Z_1 = \rho_1c_1$ in ein Gebiet 2 (ρ_2 , c_2) mit anderer Wellenimpedanz $Z_2 = \rho_2c_2$ übertritt. Für jede Art von Wellen findet man in einem solchen Fall, dass ein Teil der Welle reflektiert wird. Wir nehmen an, dass das System sich linear verhält, dass also eine Proportionalität zwischen einfallender, reflektierter und transmittierter Welle besteht.

Wir betrachten den einfachsten Fall, dass die Welle

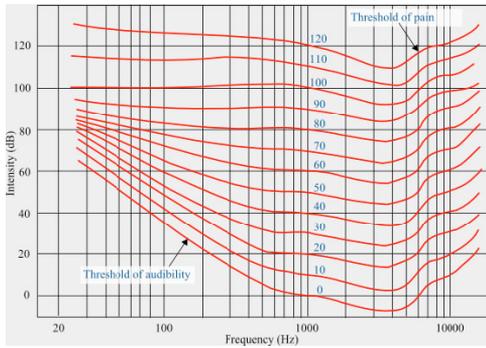


Abbildung 4.6: Kurven gleicher Lautstärke. Bei 1kHz stimmen dB SPL-Skala und Phon- oder dB(A)-Skala überein.

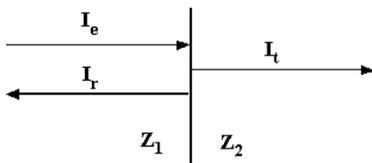


Abbildung 4.7: Reflexion an einer Grenzfläche

senkrecht auf die Grenzfläche einfällt und berechnen die Reflexions- und Transmissionskoeffizienten aus der Energieerhaltung: Die auf die Grenzfläche einfallende Energie wird entweder transmittiert oder reflektiert. Somit gilt für senkrechten Einfall

$$I_e = I_r + I_t.$$

Wir schreiben den Ausdruck $I = \frac{1}{2} \rho_0 \omega^2 \chi^2 c$ für die Schallintensität als $I = \frac{1}{2} Z \omega^2 \chi^2$. Damit wird die Energieerhaltungsgleichung zu

$$Z_1 \chi_e^2 = Z_1 \chi_r^2 + Z_2 \chi_t^2.$$

Zusammen mit der Stetigkeitsbedingung für die Auslenkung, $\chi_e + \chi_r = \chi_t$, erhalten wir ein quadratisches Gleichungssystem für die beiden Amplituden χ_r und χ_t . Lösen des Gleichungssystems ergibt die Transmissions- und Reflexionskoeffizienten:

$$\frac{\chi_r}{\chi_e} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}; \quad \frac{\chi_t}{\chi_e} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}.$$

Für die Intensitäten erhält man

$$\frac{I_t}{I_e} = 4 \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

und

$$\frac{I_r}{I_e} = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}.$$

Möchte man Reflexionen vermeiden, so muss offenbar $Z_1 = Z_2$ sein, d.h. die Impedanzen der beiden Medien müssen gleich sein.

4.3 Anatomie und Schallübertragung

4.3.1 Anatomische Übersicht

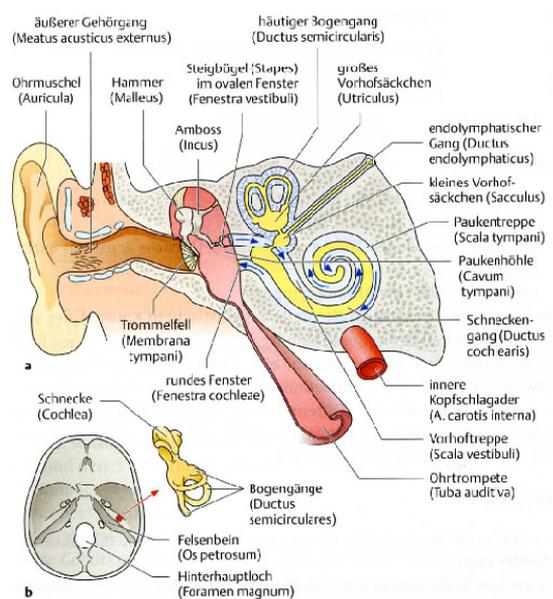


Abbildung 4.8: Anatomischer Aufbau des menschlichen Ohrs.

Im menschlichen Ohr sind zwei Sinnesorgane lokalisiert: das **Gleichgewichtsorgan** und das **Gehörorgan**. Anatomisch bilden beide eine Einheit im Innenohr. Im Folgenden beschäftigen wir uns ausschließlich mit dem Gehörorgan.

Zum **äußeren Ohr** gehört die Ohrmuschel, sowie der etwa 3 cm lange äußere Gehörgang mit dem Trommelfell als Abschluss. Dieses trennt das äußere Ohr vom **Mittelohr**. Die Schallleitung erfolgt über das Trommelfell und die drei Gehörknöchelchen (Hammer, Amboss und Steigbügel) bis zum

ovalen Fenster. An diesem ovalen Fenster beginnt **das Innenohr.** Es ist in Knochen eingebettet und besteht aus der **Cochlea (Schnecke)** und den Bogen­gängen, welche das Gleichgewichtsorgan enthalten. Es liegt nahe beim Gehirn und ist durch die Einbet­tung in Knochen gut von störenden Einflüssen iso­liert, wie z.B. Bewegungen von Muskeln.

Die Hohlräume im Knochen sind mit einer Flüssigkeit gefüllt (Perilymphe); Gehör- und Gleichge­wichtsorgan befinden sich darin eingelagert im häu­tigen Labyrinth. Dieses ist mit einer etwas anderen Flüssigkeit gefüllt, welche als Endolymphe bezeich­net wird. Peri- und Endolymphe unterscheiden sich vor allem im Gehalt an Natrium- und Kaliumionen.

Die Schnecke ist etwa 3 cm lang, hat ungefähr 2.5 Windungen und verjüngt sich zu ihrem Ende hin. In der Schnecke gibt es drei voneinander getrenn­te Räume: die Vorhof­ter­re, die am ovalen Fen­ster beginnt und bis zur Schneckenspitze läuft. Dort schließt sich die Paukentreppe an, die sich am an­deren Ende bis zum runden Fenster erstreckt.

Das äußere Ohr dient der Schallverstärkung und der richtungsabhängigen Filterung einlaufender Schall­wellen. Im Mittelohr findet eine Impedanzanpas­sung statt, von Luft zur Perilymphe. Das Innenohr nimmt eine Frequenz- und Amplitudenanalyse der Schallwellen vor. Die Hörner kodieren die akusti­sche Information, und im Cortex (Hirnrinde) findet die Spracherkennung statt.

4.3.2 Äußeres Ohr

Das äußere Ohr und das Mittelohr dienen der Zu­leitung der Schallwellen. Es gibt die **Knochenlei­tung**, bei der unter Umgehung von äußerem Ohr und Mittelohr die Schallwellen durch Schwingungen des Schädelknochens ins Mittelohr transportiert werden. Normalerweise spielt er für das Hören keine Rolle, da der Knochen­schall ungefähr -50 dB unter dem Luftschall liegt. Wichtig ist die Knochenleitung für das Hören der eigenen Stimme, die deswegen auch anders klingt als wenn man von sich eine Tonauf­nahme anhört.

Das **äußere Ohr** besitzt eine wenig ausgepräg­te Richtungscharakteristik, aber einen unterschied-

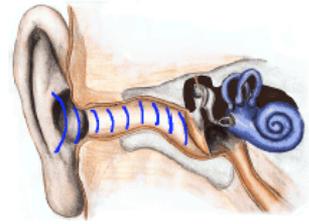


Abbildung 4.9: Zuleitung der Schallwellen. [1]

lichen Frequenzgang (insbesondere vorne / hinten). Der **äußere Gehörgang** kann als einseitig abge­schlossener Resonator modelliert werden ($Q \approx 1$). Den Abschluss des Rohres bildet das Trommelfell (reflexionsfrei).

4.3.3 Mittelohr

Das **Mittelohr** ist von dem äußeren Ohr durch das **Trommelfell** getrennt. Für den Druckausgleich gibt es eine Verbindung zum Rachenraum, die sogenann­te **eustachische Röhre** oder Ohrtrumpete. Da die­se durch das Gaumensegel üblicherweise geschlos­sen ist, findet nur ein einseitiger Schalldruck auf das Trommelfell statt, so dass die eigene Stimme nicht zu laut hörbar ist. Außerdem ergibt sich so nur ein einseitiger Schalldruck auf das Trommelfell, was das Hören äußerer Geräusche begünstigt.

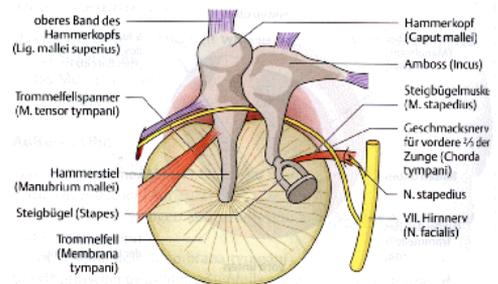


Abbildung 4.10: Mittelohr

Die **Mittelohrmuskeln** dienen zum einen dem Schutz des Gehörs bei lautem Knall: sie können das Trommelfell spannen und dadurch die Schallüber­tragung reduzieren, sowie den Steigbügel kippen - mit dem gleichen Resultat. Die Latenzzeit beträgt für hohe Schallpegel etwa 35 ms und für niedrige et­wa 150. ms Weiterhin dämpfen sie das Ausschwin-

gen des Sprachschalls und vergrößern den Arbeitsbereich des Mittelohrs. Ansonsten wären nur Schallereignisse < 40 db SPL außerhalb des Sättigungsbereichs der Sinneszellen.

Im Mittelohr findet außerdem die Impedanzanpassung statt. Im Außenohr und der Paukenhöhle befindet sich Luft mit $Z_L = 414 \text{ kg/m}^2\text{s}$, und im Innenohr ist die Lymphflüssigkeit mit $Z_c = 1.4 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$, daher gibt es Reflexionen bei einem Übergang von Luft zu Lymphflüssigkeit.

Um eine grobe Vorstellung von der Reflexion zu erhalten betrachten wir die Reflexion einer Schallwelle an einer unendlichen Grenzfläche zwischen Wasser und Luft bei senkrechtem Einfall. Dafür ist der Transmissionskoeffizient

$$T = \frac{I_t}{I_e} = 4 \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \approx 9 \cdot 10^{-4}.$$

Das heißt, ohne Mittelohr würde weniger als 0.01% der vom Außenohr empfangenen Energie auf das Innenohr übertragen werden, der Rest würde reflektiert. Dies entspricht einer Abschwächung um rund 30 dB.

Dieses Modell ist allerdings zu grob. Insbesondere die Näherung, das Innenohr als unendlichen Halbraum zu beschreiben, ist zu ungenau, da die Dimensionen, z.B. des ovalen Fensters, klein sind im Vergleich zu allen akustischen Frequenzen. Eine genauere Analyse ergibt deshalb eine frequenzabhängige Reflexion. Bei Frequenzen im Bereich von etwa 3 kHz ist die Impedanzanpassung praktisch perfekt Killion and Dallos [10].

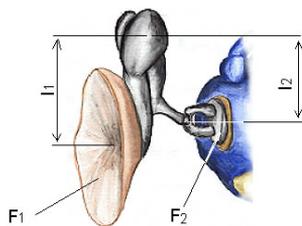


Abbildung 4.11: Trommelfell, Gehörknöchelchen und Steigbügelfußplatte.

Die Reflexionen können reduziert werden, wenn die Impedanz auf beiden Seiten der Grenzfläche (=Mittelohr) gleich gemacht wird. Die Impedanz ist $Z =$

$\frac{\Delta p}{v_0}$, d.h. sie ist proportional zur Druckänderung durch die Welle. Die Druckänderung wird im Mittelohr folgendermaßen angepasst: Auf das Trommelfell wirkt die Kraft

$$F_a = \Delta p_a A_T,$$

wobei Δp_a die Druckänderung durch die äußere (einlaufende) Welle darstellt und A_T die Fläche des Trommelfells. Auf der Innenseite wirkt die Kraft

$$F_i = \Delta p_i A_F,$$

wobei A_F die Fläche des Fensters und Δp_i die Druckamplitude im Innenohr darstellen.

Hammer und Ambos setzen diese Kräfte in Drehmomente um, welche gleich sein müssen,

$$F_a l_a = F_i l_i.$$

Damit erhöht sich die Druckamplitude im Innenohr auf

$$\Delta p_i = \Delta p_a \frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{l_1}{l_2}.$$

Dies entspricht einer Änderung der effektiven Impedanz um den Faktor $\frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{l_1}{l_2} \approx 26$. Die transmittierte Intensität steigt um etwa diesen Faktor an.

Wir haben hier ein sehr einfaches Modell verwendet, welches verschiedene Näherungen enthält, die in der Praxis nicht erfüllt sind, wie z.B. die Annahme, dass die Grenzfläche räumlich unendlich ausgedehnt sei. In Wirklichkeit sind sowohl Trommelfell wie auch das ovale Fenster klein im Vergleich zur akustischen Wellenlänge und das Innenohr ist kein unendlicher Halbraum. Die wirkliche Schallimpedanz ist dadurch frequenzabhängig wie auch die Impedanzanpassung im Innenohr. Weiterhin hilft auch das Außenohr bei der Impedanzanpassung. Eine relativ detaillierte Analyse ist Killion and Dallos [10].

4.3.4 Das Innenohr

Das **Innenohr** enthält das Gleichgewichtsorgan und die **Schnecke (Cochlea)**, die das eigentliche Hörorgan darstellt. Die Aufgabe des Innenohres im Bezug

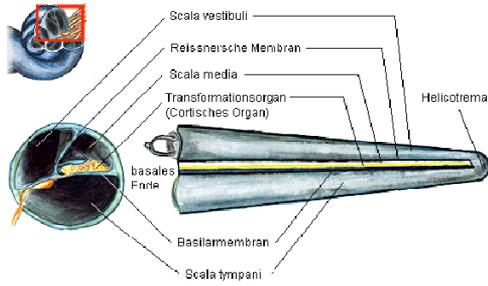


Abbildung 4.12: Innenohr. [1]

auf das Hören ist die Reizweiterleitung an Sinneszellen und die Reiztransformation von mechanischen Schwingungen in Nervenimpulse.

Die Schnecke ist abgerollt ungefähr 30 mm lang, und sie verjüngt sich von 0.9 mm auf 0.3 mm. Sie ist aufgeteilt in die Vorhoftrappe (scala vestibuli), die vom ovalen Fenster, auf dem der Steigbügel sitzt, zur Spitze der Schnecke läuft, die Paukentrappe (scala tympani), die von der Spitze der Schnecke zum runden Fenster läuft (beide sind mit Perilymphe gefüllt). Zwischen den beiden liegt der mittlere Schneckenengang (scala media), der mit Endolymphe gefüllt ist.

Der mittlere Schneckenengang ist von der Vorhoftrappe durch die Reissner-Membran, und von der Paukentrappe durch die **Basilarmembran** getrennt. Die Reissner-Membran ist sehr flexibel, so dass die Vorhoftrappe und die Paukentrappe hydrodynamisch praktisch eine Einheit bilden. Die Basilarmembran enthält das **Corti-Organ** mit etwa 15000 Sinneszellen, den **inneren** und **äußeren Haarzellen**, die in Reihen angeordnet sind. Die Sinneshaare sind mit der darüber liegenden **Deckplatte**, einer gallertartigen Schicht, verbunden. Hier findet der eigentliche Hörprozess, die Umwandlung mechanischer Schwingungen in Nervenimpulse, statt.

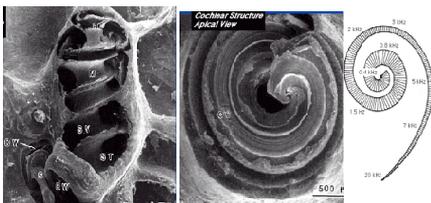


Abbildung 4.13: Cochlea (Schnecke).

Die Basilarmembran verändert ihre mechanischen

Eigenschaften während ihres Verlaufs vom basalen zum apicalen Ende (Helicotrema). Auf diesem Weg nimmt die Steifigkeit ab. Gleichzeitig verbreitert sich die Basilarmembran von 1/6 mm auf 1/2 mm. Die Änderung der mechanischen Eigenschaften ist eine wichtige Voraussetzung für die dem Schallereignis entsprechende Reizverteilung an die Sinneszellen.

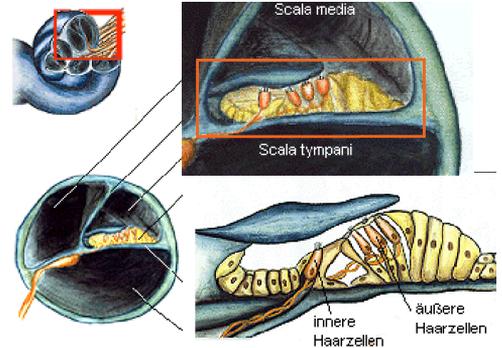


Abbildung 4.14: Transformationsorgan. [1]

Die Schallwelle, welche über den Steigbügel in das Innenohr eingekoppelt wird, läuft durch die Scala vestibuli zum Ende der Schnecke und durch die Scala tympani zurück zum runden Fenster. Die Flüssigkeit ist praktisch inkompressibel. Damit die Welle sich im Innenohr überhaupt ausbreiten kann benötigt es deshalb einen Druckausgleich; das ist die Funktion des runden Fensters zum Mittelohr.

4.4 Detektion und Verarbeitung

Das Innenohr ist ein Sensor, welcher die akustischen Schwingungen in elektrische Nervenimpulse umwandelt. Es ist so konstruiert, dass es einen großen Dynamikbereich aufweist und Frequenzen im Bereich von etwa 20 - 20000 Hz wahrnehmen und unterscheiden kann. Es liefert auch eine erste Stufe der Datenreduktion.

4.4.1 Ortskodierung der Tonhöhe

Technische Tonaufzeichnungen unterscheiden unterschiedliche Frequenzen indem sie diese mit einer hohen zeitlichen Rate digitalisieren. Der menschliche Gehörsinn ist dazu nicht in der Lage. Außerdem

würde die dabei anfallende Datenmenge das Gehirn überfordern. Statt dessen werden einzelne Frequenzen getrennt detektiert und in Nervensignale umgewandelt.

Um Schwingungen unterschiedlicher Frequenz unterscheiden zu können, müssen die entsprechenden Schwingungen getrennt werden. Das Ohr verwendet dafür eine räumliche Codierung.

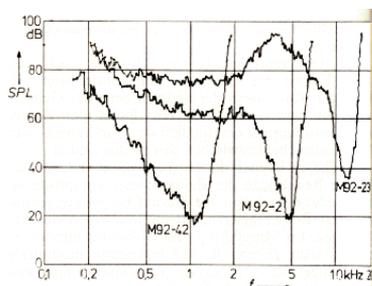


Abbildung 4.15: Signalstärke einzelner Nervenfasern einer Katze als Funktion der Frequenz

Dies kann man z.B. belegen, indem man die Signalstärke einzelner Nervenfasern misst. Figur 4.15 zeigt als Beispiel die Signalstärke von drei Nervenfasern einer Katze, jeweils als Funktion der Tonhöhe. Offenbar sind die drei Nerven auf unterschiedliche Tonhöhen empfindlich.

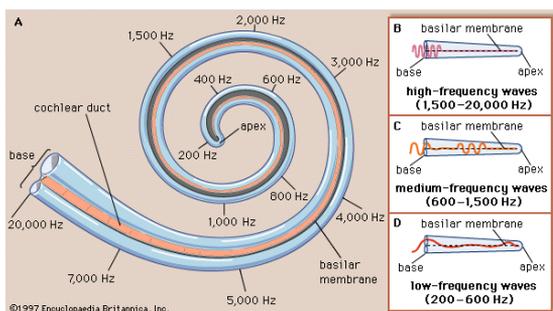


Abbildung 4.16: Frequenzabhängige Amplitudenmaxima in der Schnecke.

Figur 4.16 zeigt wo in der Cochlea die einzelnen Frequenzen maximale Anregung erzeugen. Die Frequenzselektivität wird jedoch nicht durch die Sinneszellen erreicht, sondern durch einen geeigneten Aufbau der Cochlea.

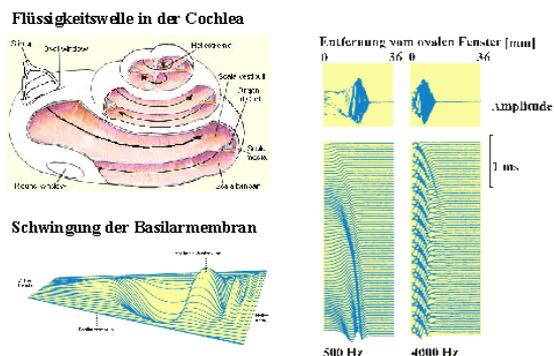


Abbildung 4.17: Die Wanderwelle erzeugt in der Cochlea eine ortsabhängige Auslenkung der Basilarmembran. Der Ort der maximalen Auslenkung hängt von der Frequenz ab.

4.4.2 Oszillatormodell

Um dies zu verstehen betrachten wir die Ausbreitung der Flüssigkeitswelle in der Cochlea. Die Wanderwelle in der Flüssigkeit koppelt dabei an die Basilarmembran und über die Basilarmembran an den gegenläufigen Kanal. Die Stärke der Kopplung ist dabei unter anderem von der Elastizität der Basilarmembran abhängig.

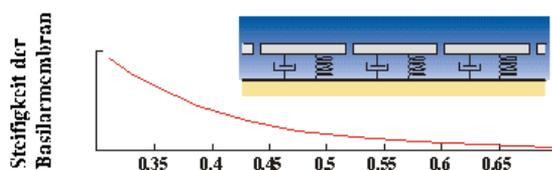


Abbildung 4.18: Modell einer Kette von Oszillatoren

Als einfaches Modell für diesen Prozess betrachten wir ein System von harmonischen Oszillatoren, zunächst ohne Kopplung, welche jeweils in Stück der Basilarmembran und die entsprechende Flüssigkeitssäule darstellen. Die Rückstellkraft, welche auf jedes Massenelement wirkt, ist

$$m_i \ddot{x}_i + h_i \dot{x}_i + k_i x_i = f_i(t).$$

Hier stellt $h_i \dot{x}_i$ eine Dämpfung dar und f_i eine periodische äußere Kraft, in diesem Fall also der Druck-

welle. Die Rückstellkraft k_i ist proportional zum Elastizitätsmodul der Membran.

Wie bei jedem harmonischen Oszillator besitzt das System eine Resonanzfrequenz, welche durch das Verhältnis aus Kraftkonstante und bewegter Masse gegeben ist, $\nu = \sqrt{\frac{E}{m}}$. Bei dieser Frequenz wird die Schwingungsamplitude maximal und damit der Transfer durch die Membran. Hier stellt E die Elastizität der Membran und m die bewegte Masse dar.

Bei tiefen Frequenzen ist es möglich, die gesamte Flüssigkeit in der Cochlea zu bewegen, während bei hohen Frequenzen die Kopplung durch die Membran leichter fällt. Da die Elastizität der Basilarmembran zum Ende der Cochlea zunimmt wird dort die Übertragung niedriger Frequenzen zusätzlich erleichtert.

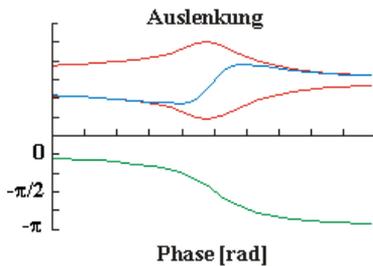


Abbildung 4.19: Resonanzüberhöhung als Funktion des Ortes

Löst man die Wellengleichung für die Cochlea, so erhält man tatsächlich eine gewisse Ortsauflösung. Allerdings ist diese nicht och genug um die Fähigkeiten unseres Gehörs befriedigend erklären zu können. Die empirisch gefundene Fähigkeit des Menschen, Töne mit einer Frequenzdifferenz von $< 1 \text{ Hz}$ unterscheiden zu können, deutet darauf hin, dass hier zusätzlich ein aktiver Entdämpfungsmechanismus eingesetzt wird, welcher die Maxima verschärft.

Die bisherige Diskussion gilt für eine gestreckte wie für eine aufgewickelte Cochlea. Modellrechnungen deuten darauf hin, dass das Aufwickeln neben der Platzersparnis zusätzlich eine Verstärkung für die tiefen Töne bringt: Die Flüssigkeitswelle wird an die Außenseite des Rohres gedrückt und dadurch verstärkt.

4.4.3 Hydrodynamische Kopplung

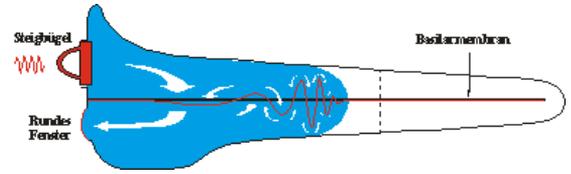


Abbildung 4.20: Hydrodynamik und Membranschwingung bei der Schallausbreitung im Innenohr

Die einzelnen Oszillatoren sind in der Realität nicht unabhängig voneinander: eine Auslenkung an einer Stelle erzeugt eine Druckänderung und regt auf Grund der Scherviskosität des Mediums die benachbarten Oszillatoren an. Wir betrachten ein einfaches Modell gekoppelter harmonischer Oszillatoren: \cite{Nobili:1998lr} Nobili et al. [12]

$$s_i(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + s_i(\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i) \approx s_i(\dot{x}_{i+1} + \dot{x}_{i-1} - 2\dot{x}_i).$$

Hier stellt s_i den Kopplungsterm zwischen benachbarten Oszillatoren dar. Hier wurde angenommen, dass die Kopplung symmetrisch wirkt (dass beide Terme auf der linken Seite den gleichen Kopplungsterm enthalten), dass die Kopplungsstärke aber ortsabhängig sein kann.

Damit erhält man ein gekoppeltes Gleichungssystem. Als Resultat hat man nicht mehr einzelne Oszillatoren, sondern das System beschreibt jetzt die Ausbreitung einer Wanderwelle durch die Cochlea. Sie läuft der Basilarmembran entlang und erreicht an unterschiedlichen Orten eine maximale Amplitude.

Der maximale Transfer, d.h. die Frequenzselektivität, ist durch die hydrodynamische Kopplung deutlich schärfer geworden.

Der experimentelle Nachweis, dass solche Wellen im Ohr existieren, gelang von Békésy; er erhielt dafür 1961 den Nobelpreis. Er führte seine Messungen mit stroboskopischen optischen Methoden durch. Spätere, präzisere Messungen verwendeten Mößbauer Spektroskopie: dabei wird ein Kristall auf die Basilarmembran aufgebracht, welcher γ -Quanten emittiert. Damit wurde eine wesentlich höhere Präzision möglich und die Abstimmkurven lagen näher

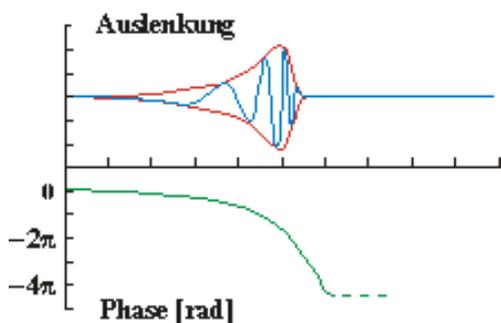


Abbildung 4.21: Wanderwelle: Effekt der hydrodynamischen Kopplung

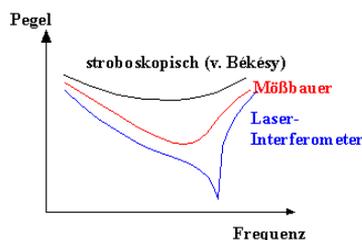


Abbildung 4.22: Gemessene Frequenzabhängigkeiten der neurophysiologischen Empfindlichkeit: Aufgetragen ist der Pegel eines Sinustons, in Abhängigkeit von seiner Frequenz, der notwendig ist, um eine bestimmte Auslenkung der Basilarmembran zu erreichen.

an den physiologisch gemessenen. Noch später verwendete man Laser-Interferometrie. Dazu wird an einem lebenden Tier ein kleiner Reflektor auf die Basilarmembran befestigt und deren Auslenkung gemessen.

Als vereinfachte Modelle betrachtet man häufig auch mechanische oder elektrische Analoga, bei denen die Oszillatoren durch Federn und Massen, respektive Induktivitäten, Kapazitäten und Widerstände gegeben sind.

4.4.4 Reizumwandlung

Die akustischen Schwingungen der Luft werden somit mehrfach umgewandelt, bevor sie als Nervenimpulse

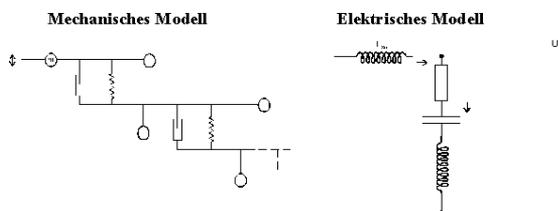


Abbildung 4.23: Mechanisches und elektrisches Oszillatormodell des Innenohrs.

pulse detektiert werden: Auf dem Trommelfell zunächst in Schwingungen einer Membran, von dort in Bewegungen der Gehörknöchelchen, wiederum eine Membranschwingung, Flüssigkeitswellen in der Cochlea, Schwingungen von Basilar- und Tektorialmembran. Die Membranschwingungen haben einer sehr geringe Amplitude: Bei normaler Sprachlautstärke (60 dB) beträgt sie ≈ 0.1 nm.

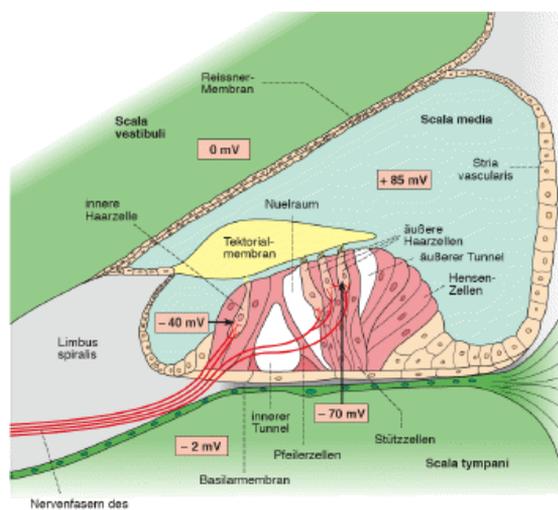


Abbildung 4.24: Die Relativbewegung von Basilar- und Tektorialmembran erzeugt einer Scherung der Haarzellen.

Die Relativbewegung dieser beiden Membranen erzeugt schließlich eine Scherung der Haarzellen. Diese Scherung wird von den Haarzellen als Nervenimpulse an das Gehirn gemeldet.

Man unterscheidet zwischen inneren und äußeren Haarzellen. Beide besitzen etwa 90 Stereozilien (Hörhärchen), welche untereinander verbunden sind. Werden diese ausgelenkt, so öffnen sich Kalzium-

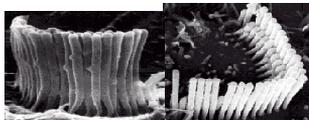


Abbildung 4.25: Links: innere Haarzellen, rechts: äußere Haarzellen.

kanäle in die Zelle. Dadurch wird das Potenzial von rund 155 mV zwischen dem Inneren der Zelle und der Scala media abgesenkt. Dieser elektrische Impuls wird über die Nerven ins Gehirn übertragen.

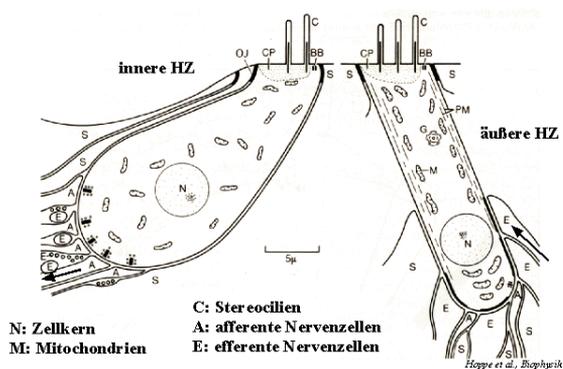


Abbildung 4.26: Innere und äußere Haarzellen.

Innere und äußere Haarzellen unterscheiden sich bezüglich Funktionsweise: Die inneren Haarzellen lösen bei einer Bewegung der Basilarmembran direkt einen Impuls aus. Bei den äußeren Haarzellen hingegen werden die Signale von mehreren Zellen in einem Spiralganglion zusammengefasst. Es ist zu vermuten, dass sie dadurch besser auf besonders schwache Signal reagieren können.

Die äußeren Haarzellen sind außerdem zu einer aktiven Kontraktion fähig, welche von Nervensignalen gesteuert werden kann. Man vermutet zwei mögliche Anwendungen dieser aktiven Steuerung: zum einen kann die Empfindlichkeit angepasst werden, zum anderen könnte dadurch ein aktives Entdämpfungssystem konstruiert werden. Eine solche aktive Entdämpfung kann zum einen die Empfindlichkeit verbessern, zum anderen die Frequenzauflösung. Man beobachtete, dass ein Ausfall der aktiven Prozesse zu Innenohr-Schwerhörigkeit führt.

Die Nervenimpulse codieren die Amplitude der Auslenkung wiederum in eine Frequenz. Da Nerven-

zellen maximal 300 Impulse pro Sekunde übertragen können und die Sinneszellen auch eine gewisse Spontanaktivität aufweisen, ist der dynamische Bereich auf etwa 40 dB beschränkt.

4.4.5 Aktives Detektionssystem

Das oben diskutierte Modell der passiven Wanderwellen kann weder die hohe Frequenzauflösung des menschlichen Gehörs erklären ($\frac{\Delta\nu}{2k.Hz} \approx 0,5\%$, $\frac{\Delta\nu}{100Hz} \approx 3\%$) noch die beobachtete (nicht-lineare) Empfindlichkeit. Diese wird erreicht durch die äußeren Haarzellen, die selber eine Kraft auf die Membran ausüben können. Diesen Einfluss kann man in den Bewegungsgleichungen durch einen weiteren Term beschreiben, welcher der Dämpfung entgegen wirkt. So gelangt man zu aktiven Wanderwellen.

Die nichtlineare Auslenkung der Basilarmembran zusammen mit der Rückkopplung auf die Schallwelle ergibt eine nichtlineare Wellengleichung. Das Verhalten des Systems, wie es durch diese Gleichung vorhergesagt wird, passt in vielen Aspekten gut mit den Beobachtungen überein.

Ist die Entdämpfung zu stark, so beginnt das System selbständig zu schwingen; dies ist offensichtlich für ein Sinnesorgan kein sinnvoller Betriebszustand. Wählt man die Verstärkung aber so, dass das System im Ruhezustand knapp unterhalb der Schwelle für spontane Schwingungen bleibt, so kann es durch eine kleine Anregung in einen Schwingungszustand versetzt werden und wird dadurch sehr empfindlich.

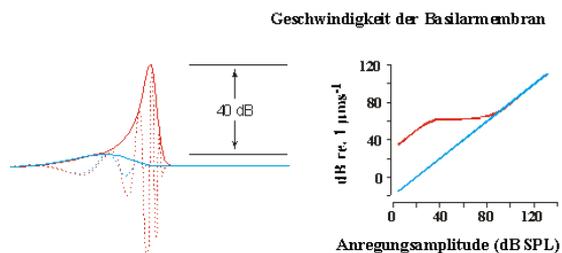


Abbildung 4.27: Nichtlineare Verstärkung im Modell mit aktiver Entdämpfung

Bei höherem Schallpegel wird der Effekt der Entdämpfung durch die Haarzellen geringer, die Ver-

stärkung nimmt somit ab. Dieser Aspekt des Modells erklärt sehr gut die beobachtete nichtlineare Verstärkung und die Änderung dieses Verhaltens wenn die äußeren Haarzellen geschädigt werden.

Im realen Ohr sind die Parameter des Gleichungssystems wie zum Beispiel die dort auftauchenden Massen nicht mehr diskret, sondern kontinuierlich und ortsabhängig. Diese Größen können aus Messungen der Cochlea gewonnen werden: Breite, Masse, Dichte, Elastizität, ...

4.4.6 Übertragungsfunktionen

Wegen der Beugungs- und Brechungserscheinungen der Schallwellen am Körper unterscheiden sich die Ohrsignale, die vor den Trommelfellen auftreten von denen welche in Abwesenheit der Person vorhanden gewesen wären. Die Freifeldübertragungsfunktion ist der Unterschied zwischen dem Schallfeldsignal ohne Person und dem Ohrsignal.

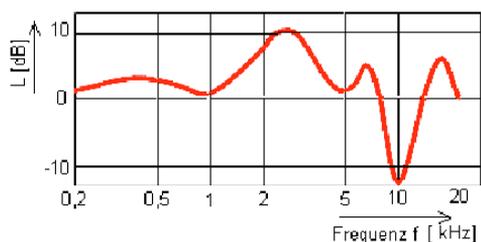


Abbildung 4.28: Freifeldübertragungsfunktion bei frontaler Beschallung. [1]

Der äußere Gehörgang kann als abgeschlossenes Rohr modelliert werden.

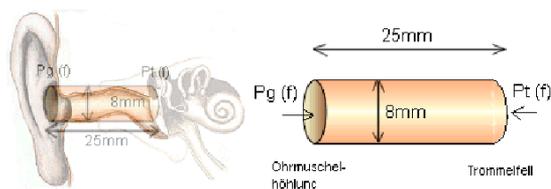


Abbildung 4.29: Einfaches Modell für das Innenohr. [1]

Bei einem abgeschlossenen Rohr mit der Länge 25mm und dem Durchmesser von 8mm findet man

eine Resonanzfrequenz von 3430Hz. Dieses ist bei der Auftragung der Ruhehörschwelle gegen die Frequenz als Minimum zu erkennen, bei dieser Frequenz ist der benötigte Schalldruckpegel am geringsten. Daher ergibt sich ein Minimum bei der Ruhehörschwelle bei dieser Frequenz.

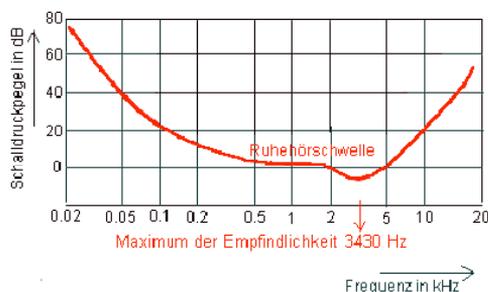


Abbildung 4.30: Verlauf der Ruhehörschwelle. [1]

Mit der Übertragungsfunktion des Mittelohres wird das Verhältnis der Steigbügelschnelle im ovalen Fenster zum Schalldruck am Trommelfell beschrieben. Sie besitzt ein Tiefpassverhalten mit der Grenzfrequenz 1.5 kHz.

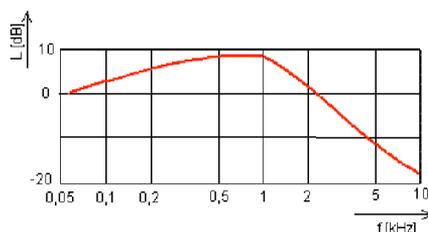


Abbildung 4.31: Übertragungsfunktion des Mittelohres. [1]

Auch das Innenohr besitzt eine Übertragungsfunktion. Dies ist das Verhältnis der Auslenkung der Basilarmembran zur Auslenkung des Steigbügels im ovalen Fenster. Das beobachtbare Maximum ist abhängig vom Messpunkt.

4.4.7 Richtungshören

Wenn sich eine Schallquelle genau hinter oder vor einer Person befindet, dann sind die Signale der beiden Ohren gleich. Bei anderen Winkeln ist dies nicht mehr der Fall. Der menschliche Kopf ist ein

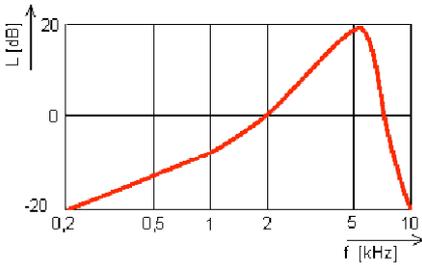


Abbildung 4.32: Übertragungsfunktion des Innenohres für eine feste Stelle der Basilarmembran. [1]

Schallhindernis und die unterschiedliche geometrische Lage der Ohren zur Quelle führen dazu, dass die Signale unterschiedlich sind. Dieser Unterschied wird durch die interaurale Übertragungsfunktion beschrieben.

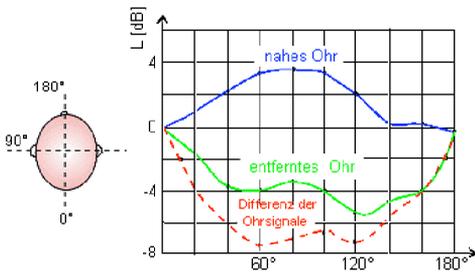


Abbildung 4.33: Interaurale Intensitätsdifferenz. [1]

Die Intensitätsdifferenz ist u.a. auch abhängig von der Frequenz (Wellenlänge). Bei einer Frequenz von $\approx 660 \text{ Hz}$ beträgt die Wellenlänge

$$\lambda = \frac{330}{660} \text{ m} = 0.5 \text{ m}.$$

Aufgrund der großen Wellenlänge sind die Druckunterschiede an den beiden Ohren klein.

Für $\nu < 500 \text{ Hz}$ kann das Gehör Intensitätsunterschiede von ca. 0.5 dB unterscheiden. Dies entspricht einem relativen Intensitätsunterschied von $\Delta I/I \approx 10^{0.05} - 1 \approx 0.12$.

Es tritt auch noch ein zweiter Effekt auf, eine Laufzeitdifferenz. Die Laufzeitdifferenzen und die frequenzabhängige Abschattung des Schalls durch den Kopf spielen eine wichtige Rolle für die Schallquellenlokalisierung und das räumliche Hören.

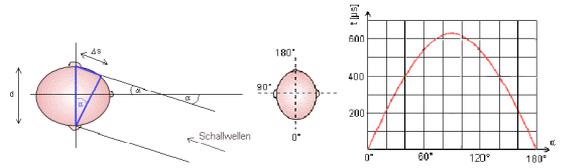


Abbildung 4.34: Laufzeitunterschiede. [1]

Die Laufzeitdifferenz beträgt

$$\Delta t = \frac{d \sin \theta}{c} = \frac{0.2 \text{ m}}{330 \text{ m/s}} \sin \theta \approx 600 \mu\text{s} \sin \theta.$$

Experimentell findet man dass unter optimalen Bedingungen eine Winkelauflösung von ca. 1° möglich ist. Dies bedeutet, dass unser Gehör eine Zeitauflösung von $\Delta t \approx 10 \mu\text{s}$ erreicht.

Auch die Kombination von Amplituden- und Phaseninformation erlauben keine eindeutige Lokalisation. So erlauben sie keine Unterscheidung, ob eine Quelle sich oben oder unten befindet. Dafür wertet das Gehör offenbar zusätzliche Informationen aus, welche mit der Beugung von Schall am Kopf, resp. der Knochenleitung zusammenhängen.