

# 4 Sinnesorgane: Das Ohr

Literatur zu diesem Kapitel:

- Der Körper des Menschen, A. Faller, M. Schünke Thieme

## 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 das Nervensystem 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<sup>1</sup>) 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 Nervensammlungen (Ganglien).

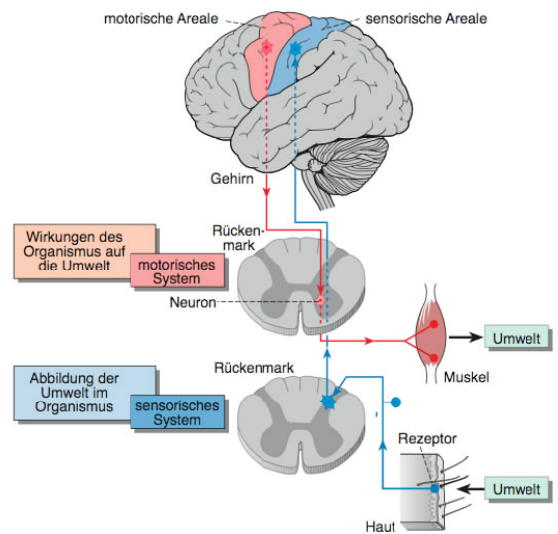


Abbildung 4.1: Prinzipieller Aufbau des sensorischen und motorischen Systems.

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** 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 Sy-

<sup>1</sup>Gliazellen sind von den Nervenzellen=Neuronen abgrenzbare Zellen im Nervengewebe.

stem 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 Informationsaufnahme 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. 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. <sup>2</sup>Gleich wahrscheinliche binäre Zeichen besitzen den Informationsgehalt von 1 bit pro Zeichen.

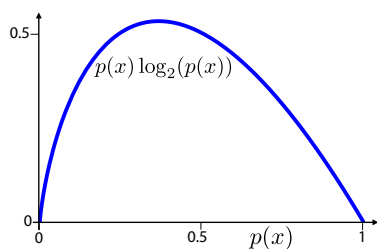


Abbildung 4.2: Entropie als Funktion der Wahrscheinlichkeit  $p(x)$ .

Dadurch ist es möglich, zum Beispiel den Informationsgehalt einer Nachricht anzugeben oder auch die maximale Nachrichtenmenge pro Zeiteinheit, die über einen Übertragungskanal gesendet werden

<sup>2</sup>Wenn der natürliche Logarithmus zur Definition benutzt wird, dann spricht man nicht von Bits, sondern von Nats.

kann, wenn auch Störungen mit berücksichtigt werden. 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,

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

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

$$\log_2(30) \approx 4.9$$

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). Bei Kompressionsverfahren wird diese Redundanz eliminiert und dadurch der Speicherbedarf reduziert.

### 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.

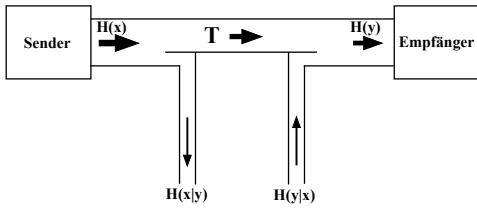


Abbildung 4.3: Einseitig gerichteter Informations- oder Nachrichtenkanal.

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 Rückschlusstopie  $H(x|y)$  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  $b$ . 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  $\tau$  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  $\tau$  ist

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

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

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

#### 4.1.4 Beispiele

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 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:  $C = 3 \text{ bit/s}$

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

#### 4.1.5 Datenaufnahme

Rezeptoren reagieren (nur) auf adäquate Reize und übersetzen diese 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 bereits 5 Photonen als Lichtblitz wahrgenommen werden.

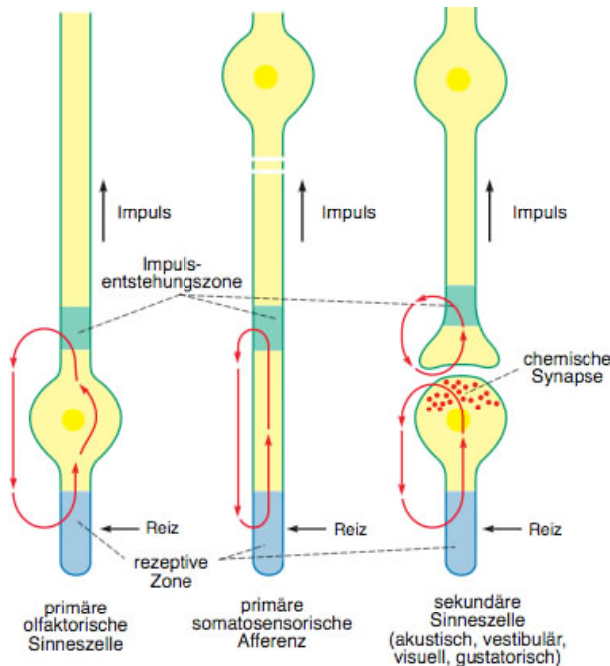


Abbildung 4.4: Bioelektrische Wandlung an Sinnesrezeptoren.

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 Neurit 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<sup>3</sup> Nervenfasern. Es sind also spezialisierte Epithelzellen mit synapsenähnlichen Gebilden zur Reizweiterleitung an Nervenfaserausendungen. Das Rezeptorpotential moduliert die Freisetzung einer Transmittersubstanz, so dass der Impuls im nachgeschalteten afferenten Neuron entsteht.

#### 4.1.6 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* Sinnereizes 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**.

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

- **Modalität.** Zum Beispiel die klassischen 5 Sinne: Gesichts-, Gehör-, Tast-, Geschmacks- und Geruchssinn. Innerhalb einer Modalität kann man verschiedene Arten von Sinneseindrücken unterscheiden, die **Submodalitäten**.<sup>4</sup>
- **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.

<sup>3</sup>afferens=hinführend

<sup>4</sup>In 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

## 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.

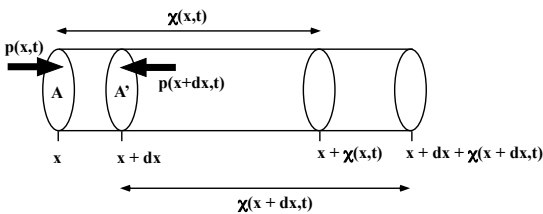


Abbildung 4.5: Beschreibung von Schallwellen.

Für den Druck schreiben wir

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

und für die Dichte

$$\rho = \rho_0 + \Delta \rho(x, t), \quad (4.1)$$

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  $A dx$  sein muss:

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

Wir schreiben für die Auslenkung eine Taylor-Entwicklung 1. Ordnung

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

Damit können wir die Massenerhaltung schreiben als

$$\rho_0 dx = \rho(x) dx \left(1 + \frac{\partial \chi}{\partial x}\right).$$

Mit Gleichung (4.1) für die Dichte bekommt man:

$$\rho_0 = (\rho_0 + \Delta \rho(x, t)) \left(1 + \frac{\partial \chi}{\partial x}\right)$$

oder

$$0 = \rho_0 \frac{\partial \chi}{\partial x} + \Delta \rho(x, t) \left(1 + \frac{\partial \chi}{\partial x}\right).$$

Der Term  $\Delta \rho \frac{\partial \chi}{\partial x}$  kann in guter Näherung vernachlässigt werden, wenn die Dichteänderung  $\Delta \rho \ll \rho_0$  ist. Damit wird die Dichteänderung als Funktion der Auslenkung  $\chi$

$$\Delta \rho(x, t) = -\rho_0 \frac{\partial \chi(x, t)}{\partial x}. \quad (4.2)$$

## 4.2.2 Die Wellengleichung

Die Dichteänderung entspricht einer Druckänderung. Die beiden sind in guter Näherung proportional zueinander. Wir verwenden die Abkürzung

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

für die Proportionalitätskonstante. Hier ist  $\kappa$  die Kompressibilität. Damit gilt für kleine Verschiebungen und Dichteschwankungen

$$p(x, t) = p_0 + \Delta p(x, t) = p_0 + \alpha \cdot \Delta \rho(x, t). \quad (4.3)$$

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

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

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

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial x}, \quad (4.4)$$

wobei wir wiederum angenommen haben, dass die Druckschwankungen klein sind,  $\rho \approx \rho_0$ . Wir ersetzen den Druck  $p$  mit Hilfe von Gl. (4.3) durch die Dichte und erhalten

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

Mit (4.2) wird dies zu

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

Dies entspricht offenbar einer Wellengleichung

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2} \quad (4.5)$$

wobei die Phasengeschwindigkeit gegeben ist durch

$$c^2 = \alpha = \frac{1}{\rho_0 \kappa}. \quad (4.6)$$

Damit können wir die Proportionalität (4.3) zwischen Druck und Dichteänderung schreiben als

$$\Delta p = \Delta \rho \cdot c^2. \quad (4.7)$$

Analoge Wellengleichungen findet man für die Dichte

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \quad (4.8)$$

und den Druck

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (4.9)$$

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

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

$$\chi(x, t) = \chi_0 \sin(\omega t - kx), \quad c = \omega/k. \quad (4.10)$$

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

## 4.2.3 Schallschnelle und Schallimpedanz

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 wie  $v(x, t)$  aufweisen,

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

Setzt man dies und (4.10) in die Euler-Gleichung (4.4) 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:

$$\Delta p_0 = \rho_0 \omega \chi_0 \frac{\omega}{k} = \rho_0 v_0 c. \quad (4.11)$$

Die Proportionalitätskonstante

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

zwischen Schallschnelle und Schalldruck. wird als **Wellenwiderstand** oder Schallkennimpedanz oder Schallimpedanz bezeichnet. In Luft beträgt die Impedanz

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

in Wasser ist die Schallimpedanz

$$Z_{\text{Wasser}} = 1.46 \cdot 10^6 \text{ Nsm}^{-3}.$$

Die Schallimpedanzen der beiden Medien, welche für das Hören am wichtigsten sind, unterscheiden sich somit um einen Faktor 3400.

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 von Gleichung (4.11) schreiben wir dies als

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

Daraus ergibt sich die **Intensität**

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

## 4.2.4 Schalldruckskala und Schallpegel

Der Schalldruck (die Amplitude) und die Frequenz der Schallschwingung sind für das Hören wichtig. Der Frequenzbereich des menschlichen Gehörs reicht von etwa 16 Hz bis rund 20 kHz, wobei die Grenzen nicht scharf sind und individuell variieren. 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  $20 \mu\text{Pa} \dots 20 \text{ Pa}$  (Effektivwerte).

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

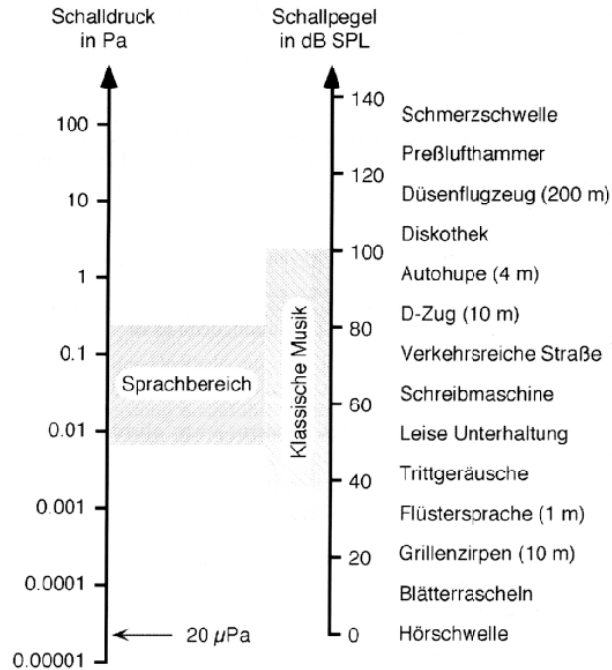


Abbildung 4.6: Schalldruck und Schallpegel für verschiedene Geräusche.

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 De-

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 nicht den physiologischen Lautstärkeindruck. Dafür verwendet man ein anderes Maß: das **Phon** oder **dB(A)**. Geräusche mit dem gleichen dB(A) Wert werden subjektiv als gleich laut empfunden. Bei einer Frequenz von 1 kHz stimmt die dB(A)-Skala per definitionem mit der dB SPL-Skala überein. Für andere Frequenzen werden zur Umrechnung Frequenzbewertungskurven verwendet, das sind Kurven gleicher Lautstärke.

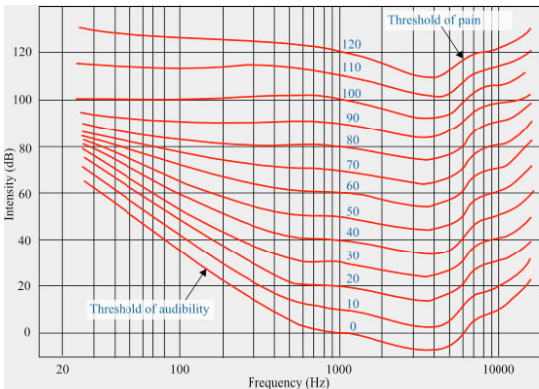


Abbildung 4.7: Kurven gleicher Lautstärke. Bei 1 kHz stimmen dB SPL-Skala und Phon- oder dB(A)-Skala überein.

### 4.2.5 Reflexion und Transmission von Schallwellen

Im Ohr wird der Schall über Gebiete mit unterschiedlichen Dichten, Schallgeschwindigkeiten und Impedanzen transportiert. Wir betrachten deshalb eine Welle, die vom Gebiet 1 mit  $\rho_1, c_1$  und  $Z_1 = \rho_1 c_1$

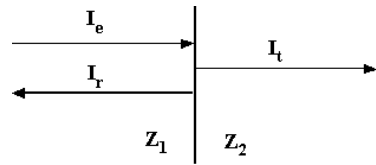


Abbildung 4.8: Reflexion an einer Grenzfläche

in ein Gebiet 2 ( $\rho_2, c_2$ ) mit anderer Wellenimpedanz  $Z_2 = \rho_2 c_2$  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 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  $\chi_r$  und  $\chi_t$ . 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

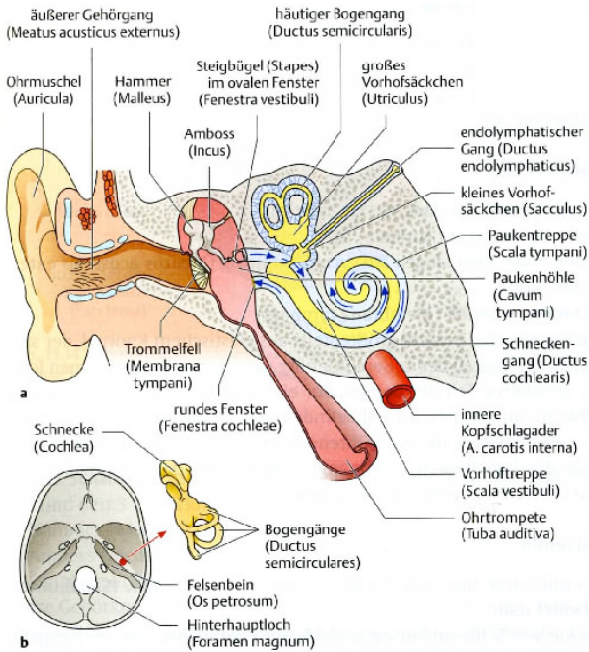


Abbildung 4.9: Anatomischer Aufbau des menschlichen Ohrs.

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. Die Schnecke wird in 3 verschiedene Räume unterteilt: die Vorhofsackchen, 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 Hörnerven 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 die Intensität des Knochenfalls ungefähr  $-50$  dB unter derjenigen des Luftschalls 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 unterschiedlichen Frequenzgang (insbesondere vorne / hinten). Der **äußere Gehörgang** kann als einseitig abgeschlossener Resonator modelliert werden ( $Q \approx 1$ ). Den Abschluss des Rohres bildet das Trommelfell.



Abbildung 4.10: Zuleitung der Schallwellen. [1]

### 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 und das Hören äußerer Geräusche begünstigt ist.

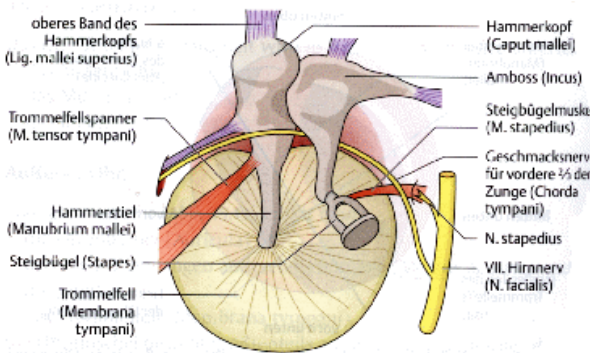


Abbildung 4.11: Mittelohr

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 Ausschwingen des Sprachschalls und vergrößern den Arbeitsbereich des Mittelohrs. Ansonsten wären nur Schallereignisse  $< 40$  dB SPL außerhalb des Sättigungsbereichs der Sinneszellen.

Im Mittelohr findet außerdem eine 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 0.1% der vom Außenohr empfangenen Energie auf das Innenohr übertragen werden, der Rest würde reflektiert. Dies entspricht einer Abschwächung um rund 30 dB.

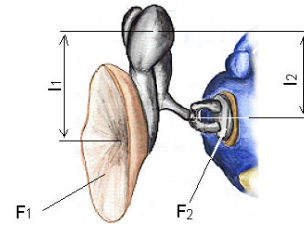


Abbildung 4.12: Trommelfell, Gehörknöchelchen und Steigbügel Fußplatte.

Die Reflexionen können reduziert werden, wenn die Impedanz auf beiden Seiten der Grenzfläche (=Mittelohr) gleich gemacht wird. Die Impedanz ist  $Z = \frac{\Delta p_0}{v_0}$ , 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  $\Delta p_a$  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 ovalen Fensters und  $\Delta p_i$  die Druckamplitude im Innenohr darstellen.

Hammer und Amboss 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. Genauer ist mit  $I = \frac{1}{2} \frac{\Delta p_0^2}{Z}$  die auf das Innenohr übertragene Intensität

$$\frac{I_{Innenohr}}{I_{Aussenohr}} = \left( \frac{\Delta p_i}{\Delta p_a} \right)^2 \frac{Z_{Luft}}{Z_{Wasser}} \sim 0.13$$

und damit mehr als 100 mal größer als der ohne Impedanzanpassung abgeschätzte Wert  $\frac{l_i}{l_e} \approx 9 \cdot 10^{-4}$ .

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 findet sich in Killion and Dallos [11].

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

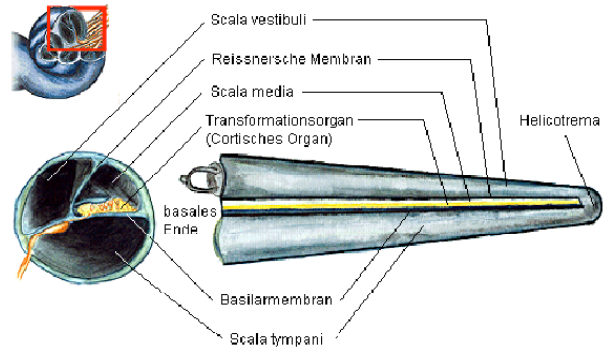


Abbildung 4.13: Innenohr. [1]

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 Vorhof-treppe (scala vestibuli), die vom ovalen Fenster, auf dem der Steigbügel sitzt, zur Spitze der Schnecke läuft, die Paukentreppe (scala tympani), die von der Spitze der Schnecke zum runden Fenster läuft (beide sind mit Perilymphe gefüllt). Zwischen den beiden liegt der mittlere Schnecken-gang (scala media), der mit Endolymphe gefüllt ist.

Der mittlere Schnecken-gang ist von der Vorhof-treppe durch die Reissner-Membran, und von der Paukentreppe durch die **Basilarmembran** getrennt. Die Reissner-Membran ist sehr flexibel, so dass die Vorhof-treppe und die Paukentreppe hydrodynamisch praktisch eine Einheit bilden. Die Basilarmembran enthält das **Corti-Organ** mit etwa 15000 Sinnes-zellen, den **inneren** und **äußeren Haarzellen**, die in Reihen angeordnet sind. Die Sinneshaare sind mit der darüber liegenden **Deckplatte** (= Tektorial-membran), einer gallertartigen Schicht, verbunden. Hier findet der eigentliche Hörprozess, die Umwandlung mechanischer Schwingungen in Nervenimpul-se, statt.

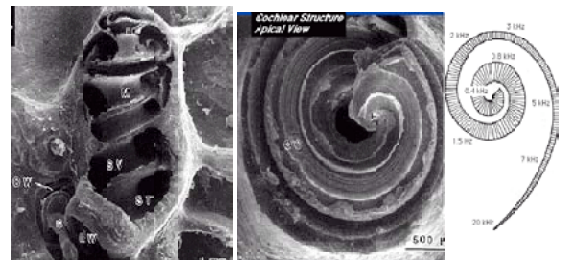


Abbildung 4.14: Cochlea (Schnecke).

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.

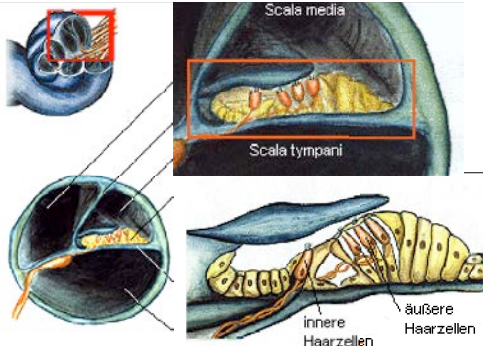


Abbildung 4.15: Transformationsorgan. [1]

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.

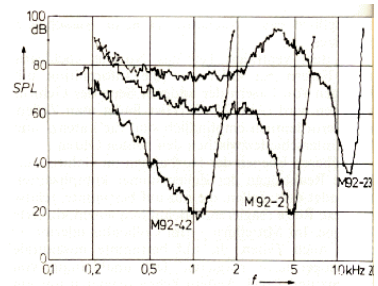


Abbildung 4.16: Signalstärke einzelner Nervenfasern einer Katze als Funktion der Frequenz

Dies kann man z.B. belegen, indem man die Signalstärke einzelner Nervenfasern misst. Figur 4.16 zeigt als Beispiel die Signalstärke von drei Nervenfasern einer Katze, jeweils als Funktion der Tonhöhe. Offenbar sind die drei Nerven auf unterschiedliche Tonhöhen empfindlich.

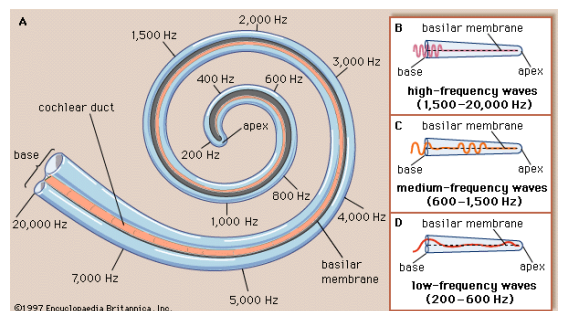


Abbildung 4.17: Frequenzabhängige Amplitudenmaxima in der Schnecke.

Figur 4.17 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.

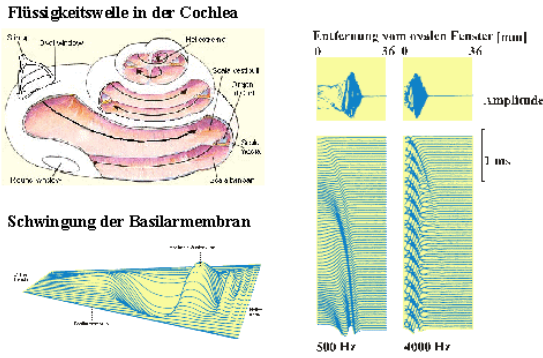


Abbildung 4.18: Die Wanderwelle erzeugt in der Cochlea eine ortsabhängige Auslenkung der Basilarmembran. Der Ort der maximalen Auslenkung hängt von der Frequenz ab.

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.

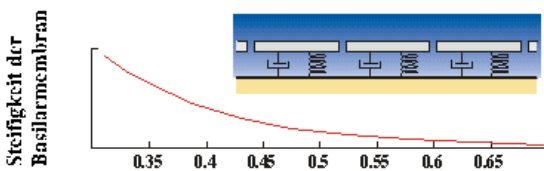


Abbildung 4.19: Modell einer Kette von Oszillatoren

Als einfaches Modell für diesen Prozess betrachten wir ein System von harmonischen Oszillatoren, zunächst ohne Kopplung, welche jeweils ein 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, welche in diesem Fall von der Druckwelle hervorgerufen wird. 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,  $\omega = \sqrt{\frac{E}{m}}$ . Bei dieser Frequenz wird die Schwingungsamplitude maximal und damit der Transfer durch die Membran. Hier stellt  $E$  den Elastizitätsmodul 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.

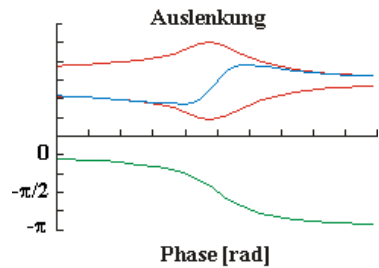


Abbildung 4.20: Resonanzüberhöhung als Funktion des Ortes

Löst man die Wellengleichung für die Cochlea, so erhält man tatsächlich eine gewisse Ortsauflösung. Allerdings ist diese nicht hoch 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

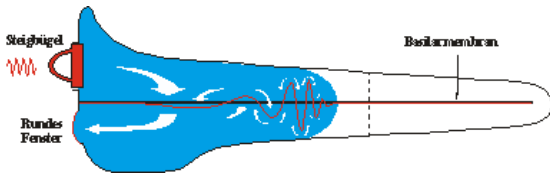


Abbildung 4.21: Hydrodynamik und Membranschwingung bei der Schallausbreitung im Innenohr

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: Nobili et al. [14]

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

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 die 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.

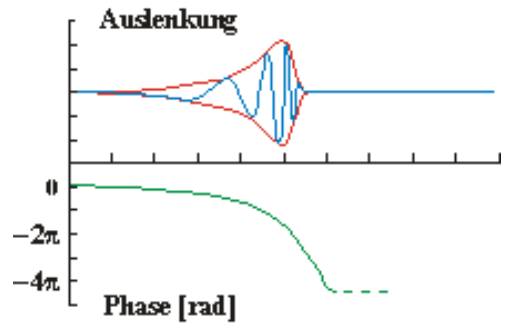


Abbildung 4.22: Wanderwelle: Effekt der hydrodynamischen Kopplung

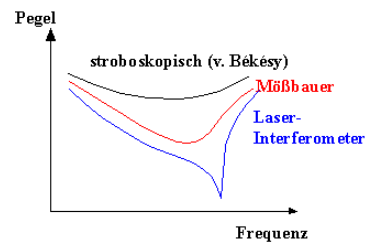


Abbildung 4.23: Gemessene Frequenzabhängigkeiten der neurophysiologischen Empfindlichkeit: Aufgetragen ist der Pegel eines Sinustons, in Abhängigkeit von seiner Frequenz, der notwendig ist, um eine bestimmte Auslenkung der Basilarmembran zu erreichen.

Spätere, präzisere Messungen verwendeten Möbbaauer Spektroskopie: dabei wird ein Kristall auf die Basilarmembran aufgebracht, welcher  $\gamma$ -Quanten emittiert. Damit wurde eine wesentlich höhere Präzision möglich und die Abstimmkurven lagen näher 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.

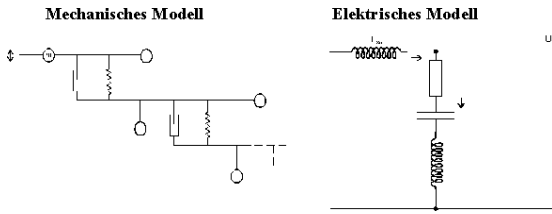


Abbildung 4.24: Mechanisches und elektrisches Oszillatormodell des Innenohrs.

#### 4.4.4 Reizumwandlung

Die akustischen Schwingungen der Luft werden somit mehrfach umgewandelt, bevor sie als Nervenimpulse 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  $\approx 0.1$  nm.

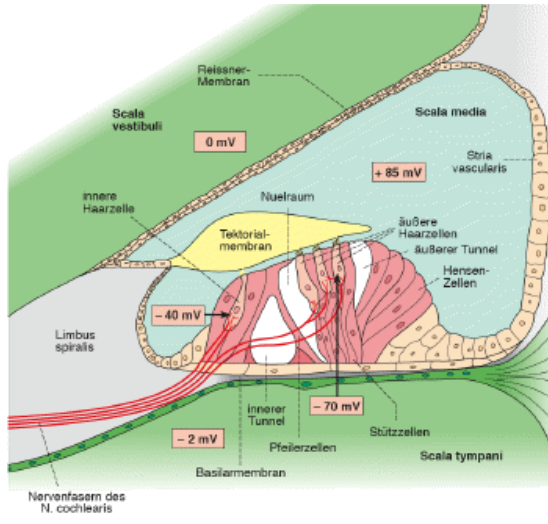


Abbildung 4.25: Die Relativbewegung von Basilar- und Tektorialmembran erzeugt einer Scherung der Haarzellen.

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

Man unterscheidet zwischen inneren und äußeren

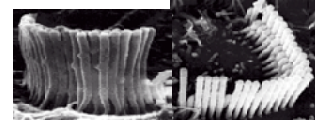


Abbildung 4.26: Links: Stereozilien der inneren Haarzellen, rechts: der äußeren Haarzellen.

Haarzellen. Beide besitzen etwa 90 Stereozilien (Hörhärchen), welche untereinander verbunden sind. Werden diese ausgelenkt, so öffnen sich Kalziumkanäle 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.

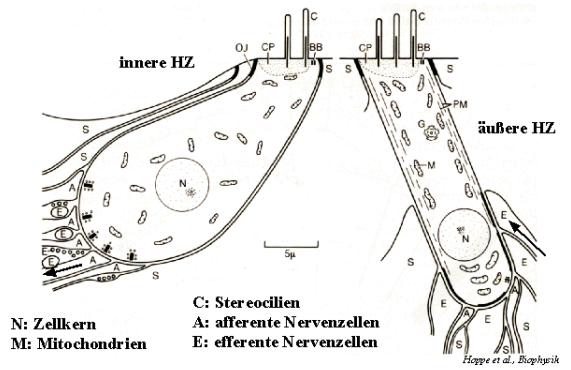


Abbildung 4.27: Innere und äußere Haarzellen.

Innere und äußere Haarzellen unterscheiden sich bezüglich ihrer Funktionsweise: Die inneren Haarzellen lösen bei einer Bewegung der Basilmembran 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 andern 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 Nervenzellen 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 ( $\frac{\Delta v}{2\text{kHz}} \approx 0,5\%$ ,  $\frac{\Delta v}{100\text{Hz}} \approx 3\%$ ) noch die beobachtete (nichtlineare) Empfindlichkeit. Diese wird erreicht durch die äußeren Haarzellen, die selber eine Kraft auf die Membranen 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.

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

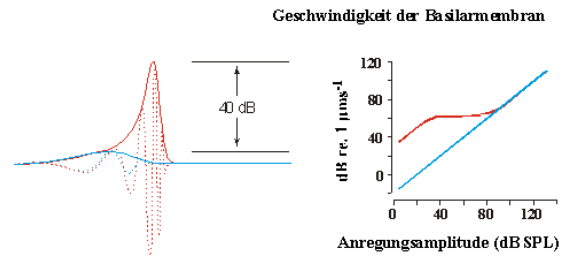


Abbildung 4.28: Nichtlineare Verstärkung im Modell mit aktiver Entdämpfung

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.

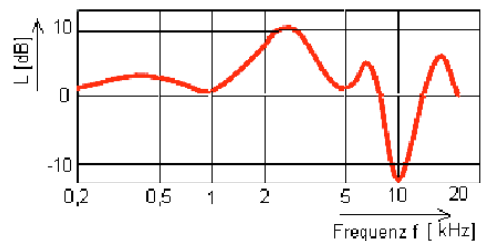


Abbildung 4.29: Freifeldübertragungsfunktion bei frontaler Beschallung. [1]

Der äußere Gehörgang kann als abgeschlossenes Rohr modelliert werden.

Bei einem abgeschlossenen Rohr mit der Länge 25 mm und dem Durchmesser von 8 mm findet man eine Resonanzfrequenz von 3430 Hz. 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.



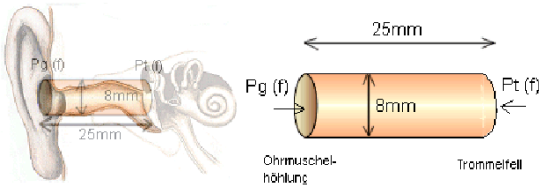


Abbildung 4.30: Einfaches Modell für das Innenohr. [1]

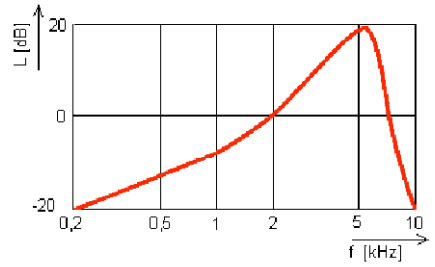


Abbildung 4.33: Übertragungsfunktion des Innenohres für eine feste Stelle der Basilarmembran. [1]

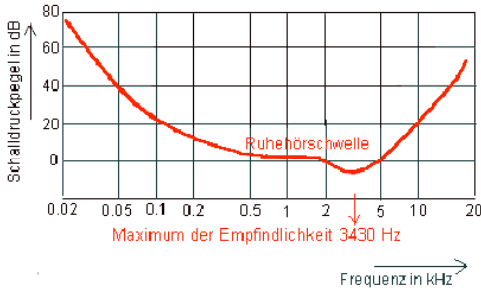


Abbildung 4.31: Verlauf der Ruhehörschwelle. [1]

beiden Ohren gleich. Bei anderen Winkeln ist dies nicht mehr der Fall. Der menschliche Kopf ist ein 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.

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  $1.5\text{kHz}$ .

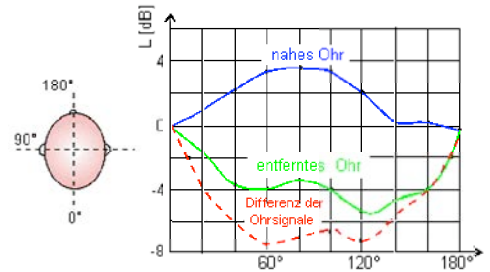


Abbildung 4.34: Interaurale Intensitätsdifferenz. [1]

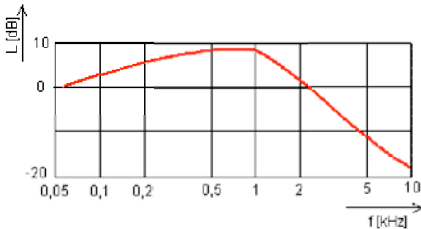


Abbildung 4.32: Übertragungsfunktion des Mittelohres. [1]

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

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

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.

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

#### 4.4.7 Richtungshören

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

Wenn sich eine Schallquelle genau hinter oder vor einer Person befindet, dann sind die Signale der

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 Schallquellenlokalisation und das räumliche Hören.

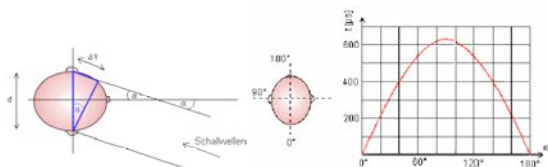


Abbildung 4.35: Laufzeitunterschiede. [1]

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.  $1^\circ$  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.