

## 4 Hörpsychologie / Weber-Fechnersches Gesetz

Die **Hörpsychologie** befaßt sich mit dem Zusammenhang, der zwischen den Schallschwingungen und den durch sie ausgelösten und schließlich bewußt gewordenen Sinnesempfindung besteht. Auf der einen Seite dieses Zusammenhangs steht **objektive Physik** - das Schallwellenfeld mit seinen Meßgrößen. Auf der anderen Seite stehen **Empfindungen**.

Typische **Fragestellungen der Hörpsychologie**, sind z.B:

- Welchen Einfluß hat die **Kurvenform** einer periodischen Schwingung auf den **Klang**, und wie kann man diesen Einfluß verstehen?
- Wie empfindlich reagiert unser Ohr auf Amplitudenunterschiede und wie hängt die empfundene **Lautstärke** von der **Amplitude** ab?
- Wie empfindlich reagiert unser Ohr auf **Frequenzunterschiede**?

Die Hörpsychologie ist eine **sehr aktuelle Wissenschaft**. Wenn heute Musikstücke im Internet transportiert werden können, und das mit bezahlbaren Telefonkosten (**MP3**), dann nur, weil Erkenntnisse dieser Wissenschaft es gestatten, die Datenmenge von Wave-Dateien auf ein Minimum zu reduzieren.

### 4.1 Lehrerversuche mit CoolEdit

#### 4.1.1 Amplitude und Lautstärke

##### 4.1.1.1 Absolute Reizschwelle (*Lautempf.wav*)

- **Abfolge vier amplitudenmodulierter Sinustöne (1 kHz)**  
mit  $A_{\max} / A_{\min} = 100 / 20, 100 / 80, 100 / 90$  und  $100 / 98$ .
- Änderung der Lautstärke ist allenfalls bis zur dritten Folge möglich  
**unabhängig davon, mit welcher Gesamtlautstärke** die Folge abgespielt wird.

##### 4.1.1.2 Relativer Reizunterschied (*Loutarex.wav*)

- Auf- und absteigende Amplitudenfolge  
mit **konstanter Differenz**  $A_{n+1} - A_n = \text{const}$ 
  - Die Änderungen des Lautstärkepegels werden nicht als gleich empfunden.
  - Die Zunahme um 1 Einheit macht bei großer Amplitude weniger aus als bei kleiner.

⇒ Zwischen der Amplitude und der empfundenen Lautstärke besteht **kein proportionaler Zusammenhang**.
- Auf- und absteigende Amplitudenfolge  
mit **konstantem Verhältnis**  $A_{n+1}/A_n = 1,26$ 

⇒ Die Änderungen des Lautstärkepegels werden jetzt **eher als gleich groß empfunden**.

**Resumee:**

**Ob ein Ton 2 lauter empfunden wird als ein Ton 1 hängt nicht von dem Unterschied der Amplituden  $A_2-A_1$  ab, sondern vom Verhältnis  $A_2/A_1$ .**

**4.1.2 Frequenz und Tonhöhe****4.1.2.1 Absolute Reizschwelle**

- **Abfolge fünf frequenzmodulierter Sinustöne (1 Hz)**  
mit  $f_1 / f_2 = 1,02$  (2%); 1,01 (1%); 1,005 (0,5%), 1,0025 (0,25%), 1,001 (0,1%)  
⇒ Tonhöhenunterschiede bis zum dritten Block d.h. 0,5% (bei 1 kHz)
- **Änderung der Sampling Rate  $\Rightarrow$  Abspielgeschwindigkeit wird verändert**  
⇒ Empfindlichkeit hat sich verändert
- **kontinuierliche Änderung der Frequenz (frequenzzuwachs.wav)**
  - Ansteigen der Frequenz eines Sinuston von 300Hz auf 310Hz
  - Nach Erreichen von 310Hz wird der anfängliche Ton 300Hz eingespielt.
  - Erst dann bemerkt man deutlich, daß der Ton sich inzwischen geändert hat.

**4.1.2.2 Relativer Reizunterschied**

- Aufsteigende Tonfolge  
mit **konstantem Frequenzschritt**       $f_{n+1} - f_n = 500\text{Hz} = \text{const}$  (
- Aufsteigende Tonfolge  
mit **konstantem Frequenzverhältnis**       $f_{n+1} / f_n = \text{sqrt}(2) = 1.414 = \text{const}$   
d.h. Anstieg um eine halbe Oktave

Wenn wir unserem Auge gleichzeitig Licht verschiedener Wellenlängen anbieten, so ist es nicht in der Lage, die beiden Komponenten aus der Mischung herauszufinden. Wenn ich rotes und grünes Licht mische, sehe ich eben gelb; **das Auge hat nicht die Fähigkeit, spektral aufzulösen. Anders unser Ohr.** Zwei Töne, die in der Frequenz genügend weit auseinander liegen, werden getrennt wahrgenommen.

## 4.2 Weber Fechnersches Gesetz

### Rekapitulation:

Eine Folge von Oktaven entspricht

- musikalisch einer **arithmetischen Folge**,  
d.h. die Differenz zweier benachbarter Tonhöhen ist konstant
- physikalisch einer **geometrischen Folge**,  
d.h. der Quotient zweier benachbarten Frequenzen ist konstant

### Merksatz (Psychophysik)

Die menschliche Psyche setzt  
eine **geometrische Folge physikalischer Reizgrößen**

- z.B. Amplituden  $A_{n+1} = q \cdot A_n$  bzw.  $A_n = q^n \cdot A_0$
- bzw. Frequenzen  $f_{n+1} = q \cdot f_n$  bzw.  $f_n = q^n \cdot f_0$

in eine **arithmetische Folge psychischer Reizempfindungsgrößen** um:

- Lautstärken  $L_{n+1} = L_n + \Delta L$  bzw.  $L_n = n \cdot L_0$
- Tonhöhen  $C_{n+1} = C_n + \Delta C$  bzw.  $C_n = n \cdot C_0$

Sie ist damit einer logarithmischen Funktion vergleichbar:  
(Wahrnehmungsstärke proportional zum Logarithmus der Reizintensität)

Oktave	Quint + Quart
$\log(a \cdot b)$	$(\log a) + (\log b)$

gr. Sekund	Quint - Quart
$\log(a / b)$	$(\log a) - (\log b)$

### Weber Fechner:

- Zusammenhang zwischen der Stärke eines **Reizes R** und der Stärke der zugehörigen **Sinnesempfindung E**
- Der **gerade wahrnehmbare Unterschied dE** zweier Sinneseindrücke ist abhängig von
  - dem Verhältnis der **Änderung eines Reizes dR**
  - zur Stärke des **schon vorhandenen Reizes R**:  
(genauer: Reizintensität R)

$$dE \propto \frac{dR}{R} \Leftrightarrow dE = k \cdot \frac{dR}{R} \Rightarrow E(R) \propto \log R$$

Verhältnis der Reizstärke  $\log\left(\frac{R_1}{R_2}\right) = \log R_1 - \log R_2$  Differenz der Empfindung

**Psycho-physisches Grundgesetz von Weber und Fechner (1834):**

**Gleiche *Verhältnisse* des Reizes erzeugen  
gleiche *Stufen* der Reizempfindung.**

**Sinn:**

Unterschiedserkennung über möglichst ausgedehnte Erfahrungsbereiche (Frequenz, Schallintensität, Lichtintensität) hinweg.

**Vgl. Logarithmisches Zahlungssystem**

(Möglichst jede Zahlungssumme mit möglichst wenig Einzelstufen)

Cents	1	2	5
Cents	10	20	50
Euro	1	2	5
Euro	10	20	50
Euro	100	200	500

**4.2.1 Definition der Psychophysik**

- Ein **physikalischer Reiz der Größe p** erregt ein Sinnesorgan.
- Das hat beim Beobachter eine **Empfindung der „Stärke“ E** zur Folge.
  - Die Größe des Reizes p können wir äußerlich mit einem physikalischen Messinstrument bestimmen,
  - Die „Stärke“ E der Empfindung kann nur der jeweilige Beobachter selbst innerlich beobachten.

Wie diese beiden Größen, die physikalische Größe p und die psychische Größe E zusammenhängen, wird in der „**Psychophysik**“ untersucht. Hier werden zwei grundsätzlich verschiedenartige Größen miteinander in Beziehung gebracht, eine äußerlich messbare physikalische Größe p und eine nur durch innerliches Erleben bestimmbar psychische Größe E.

**4.2.2 Konstruktion einer Empfindungsskala**

Um der Empfindung eines Menschen überhaupt sinnvoll Zahlenwerte zuordnen zu können, muss eine Empfindungsskala konstruiert werden. Fechner war der erste, dem dies 1850 sinnvoll gelang (Die Vorgehensweise ist physikalischer Standard):

**Gleichheit:**

Zwei gleiche Empfindungen E1 und E2 werden durch zwei Reize p1 und p2 verursacht. Dann muss eine eindeutige Zuordnung gelten:.

$$E(p_1) = E(p_2) \hat{=} p_1 = p_2$$

**Nullpunkt:**

Alle Reize p, die unterhalb der Reizschwelle p0 liegen, haben die Empfindung E = 0 zur Folge.

$$E(p < p_0) = 0$$

**Einheit:**

Zwei Reize  $p_1$  und  $p_2$ , die dieselbe Empfindung der Stärke  $E_1$  auslösen, seien vorgegeben. Nun wird die Stärke des Reizes  $p_2$  so lange vergrößert, bis der Beobachter die Empfindung, die die beiden Reize bei ihm auslösen, das erste Mal gerade unterscheiden kann, d.h. bis  $E_1 \neq E_2$  erstmals erlebt wird. Die Differenz der beiden Reize  $\Delta p = p_2 - p_1$ , die gerade einen wahrnehmbaren Unterschied in der Empfindungsstärke  $E$  auslöst, wird „**Unterschiedsschwelle**“ **JND (just noticeable difference)  $\Delta p = p_2 - p_1$**  genannt und zur Definition der Einheit der Empfindungsskala verwendet.  $E_2$  hat dann den Wert  $E_2 = E_1 + 1$ , wenn  $p_1$  um  $\Delta p$  vergrößert wird. Dies ist sinnvoll, da kleinere Reizunterschiede durch unsere Empfindung nicht unterschieden werden können.

### 4.2.3 Der Zusammenhang der Reizgröße $p$ und der Empfindungsgröße $E$

- Wie hängen nun die Reizgröße  $p$  und die Empfindungsgröße  $E$  zusammen. Da wir einen eindeutigen Zusammenhang vorausgesetzt haben, fragen wir also nach der **Reiz-Empfindungs-Funktion  $p(E)$ , bzw. deren Umkehrfunktion  $E(p)$** .
- Weber untersuchte 1834 die verschiedenen Sinne des Menschen unter der Fragestellung: Ist die Unterschiedsschwelle  $\Delta p$ , die die Zunahme der Empfindungsstärke  $E$  um eine Einheit verursacht, immer gleich oder hängt sie von der Stärke der Empfindung  $E$  bzw. der Größe des Reizes  $p$  ab.

**Weber Konstanten:**

Die Unterschiedsschwelle (JND = just noticeable difference)  $\Delta p$  ist kein konstanter Wert, sondern von der absoluten Größe der Reizstärke  $p$  abhängig: Je größer die Stärke des Reizes  $p$ , desto größer muß der Unterschied  $\Delta p$  sein, damit zwei Reize verschieden stark empfunden werden.

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

Die Weber Konstante  $k$  bestimmt, wie groß der Reizschwellenwert relativ zum Reizuntergrund sein muß.

Brightness	0.079
Loudness	0.048
Finger Span	0.022
Heaviness	0.020
Line Length	0.029
Taste (salt)	0.083
Electric Shock	0.013
Vibration (fingertip)	0.036

Das Ergebnis von Weber beschreibt eine fundamentale Gesetzmäßigkeit, wie der Menschen die Welt erlebt. Diese drückt Fechner durch den folgenden Satz anschaulich aus:

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

Die Empfindung des „Reichseins“ wächst also nicht gleichmäßig mit der Geldmenge, die man besitzt.

Löst man diese Webersche Gleichung

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{p(E_n) - p(E_{n-1})}{p(E_{n-1})} = k$$

nach  $p(E_n)$  auf, ergibt sich eine Rekursionsformel für exponentielles Wachstum

$$\begin{aligned} p(E_n) &= p(E_{n-1}) + k \cdot p(E_{n-1}) \\ &= p(E_{n-1})(1 + k) \\ &= p(E_0) \cdot (1 + k)^n \end{aligned}$$

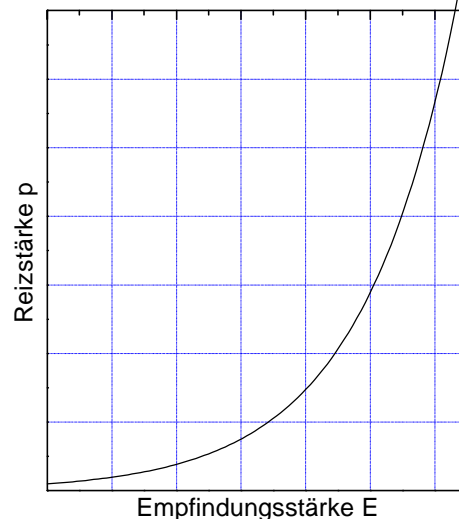
Ersetzt man die diskreten Werte  $E_n$  durch eine kontinuierliche Empfindungsstärke  $E$ , so erhält man als

**Empfindungs-Reiz-Funktion  $p(E)$**

$$p(E) = p(0) \cdot (1 + k)^E$$

mit  $p(0)$  als Reizstärke eines gewählten Nullpunkt der Empfindungsstärke, d.h. als absolute Reizschwelle.

D.h. bei starken Empfindungen muß der äußere Reiz sehr stark vergrößert werden, um eine Zunahme der Empfindung zu bewirken.



**Bsp.:** Soll beispielsweise die Helligkeit in einem Zimmer vergrößert werden, kann bei dämmriger Beleuchtung eine Kerze eine große Wirkung haben; bei gleißend heller Beleuchtung wird der Beleuchtungsanteil einer Kerze dagegen überhaupt nicht bemerkt.

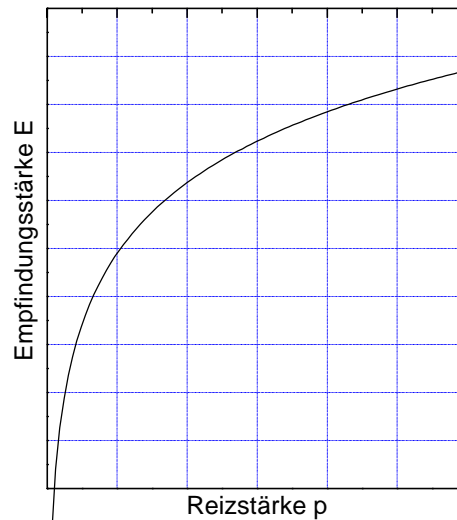
Im täglichen Leben interessiert statt des oben dargestellten Zusammenhangs mehr die Umkehrfunktion, d.h. die **Reiz-Empfindungsfunktion  $E(p)$**  als Aussage, wie groß die Empfindungsstärke  $E$  bei einer vorgegebenen Reizgröße  $p$  ist

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

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

Das Schaubildes macht deutlich, dass bei kleinen Reizstärke die Sinnesorgane sehr empfindlich sind: eine kleine Zunahme der Reizstärke  $p$  hat eine starke Zunahme der Empfindung  $E$  zur Folge.

Bei großen Reizstärken  $p$  ist das genau umgekehrt: das Sinnesorgan ist sehr unempfindlich, denn um eine Verstärkung der Empfindung zu erreichen, muss der Reiz erheblich verstärkt werden.



Wir empfinden also nicht den Reiz selbst, sondern den Logarithmus des Verhältnisses der Reizgröße zu einem Schwellenwert, bzw. die Hochzahl dieses Verhältnisses.

#### 4.2.4 Der Zusammenhang von Tonhöhe und Frequenz

##### Definition einer Tonhöenskala durch

- Zwei Töne mit dem Abstand einer Oktave haben einen Tonhöhenunterschied von  $\Delta T=1$
- Der als Grundton gewählte Ton hat die Tonhöhe  $T=0$

Für den **Weberquotienten**  $c$  gilt demnach:

$$\frac{\Delta f}{f(T-1)} = \frac{f(T) - f(T-1)}{f(T-1)} = \frac{f(T)}{f(T-1)} - 1 = 2 - 1 = 1 = c$$

$$f(T) = f(0) \cdot (1+c)^T = f(0) \cdot 2^T$$

$$T(f) = \frac{1}{\log 2} \log\left(\frac{f}{f(0)}\right)$$

**Logarithmisches Intervallmaß** (siehe Weber-Fechner) in Analogie zum Schalldruckpegel:

- Die relativen Frequenzen aufeinanderfolgender Oktaven bilden die Potenzreihe von 2

$$Z = 1200 \cdot \log_2 \frac{f_1}{f_2} = \frac{1200}{\log 2} \cdot \log \frac{f_1}{f_2}$$

- Die dimensionslose Einheit (analog zu dB) wird hier **Cent** genannt
- Der Faktor 1200 entspricht der Vereinbarung, die Oktave in 1200 gleiche Intervalle einzuteilen.
- Ein Halbtonschritt entspricht dem Intervallmaß 100 Cent

## 4.2.5 Der Zusammenhang von Lautstärke und Intensität

### Zwei Empfindungsgrenzen:

- Die Hörschwelle (gerade hörbare Intensität)
- Die Schmerzschwelle
- Im Frequenzbereich um 1 kHz umfaßt der durch diese beiden Schwellen definierte Hörbereich 12 Größenordnungen ( $10^{-12} \text{ W/m}^2$  bis  $1 \text{ W/m}^2$ ) !!!!

Experimentelle Untersuchungen ergeben, daß die Intensität verzehnfacht werden muß, um eine Steigerung des Lautstärkeempfindens um eine Einheit zu erhalten.

$$\frac{\Delta I}{I(L-1)} = \frac{I(L) - I(L-1)}{I(L-1)} = \frac{I(L)}{I(L-1)} - 1 = 10 - 1 = 9 = c \quad \text{damit} \quad L(I) = \frac{1}{\log(1+c)} \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

## 4.3 Hörphysiologie

### 4.3.1 Aufbau des Ohres

Abb. 1: Das menschliche Ohr [1]

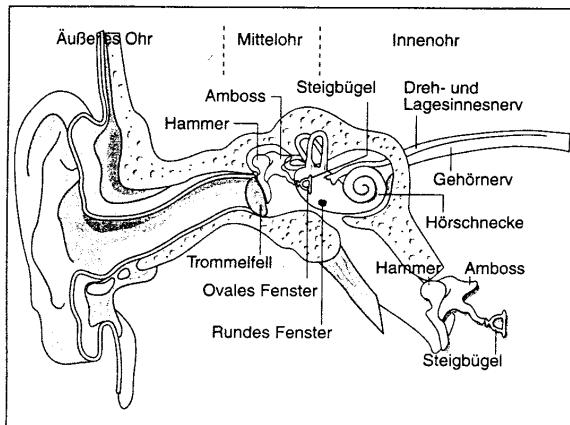
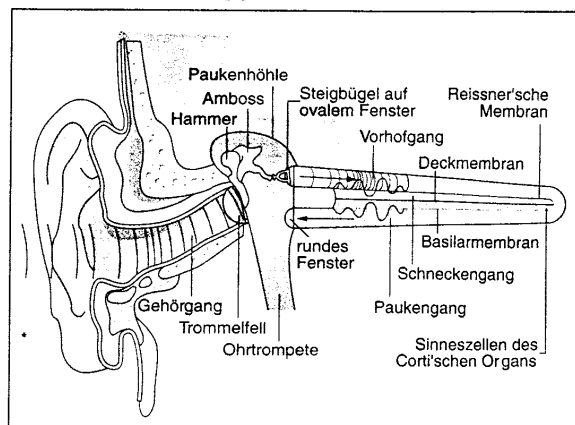


Abb. 2: Bau des Innenohr [1]



### Problem:

- Außenohr (Luftgefüllt), 2- bis 3-fache Verstärkung im Gehörgang
- Innenohr (Wassergefüllt, aus der Voramphibienzeit)

### hohe Impedanzwiderstand, d.h. großer Anteil von Schallreflexion

$$\begin{aligned} (\rho_{\text{Luft}} c_{\text{Luft}}) &= 1,29 \text{ kg / m}^3 & 343 \text{ m / s} &= 442 \text{ kg / s m}^2 \\ (\rho_{\text{H}_2\text{O}} c_{\text{H}_2\text{O}}) &= 998 \text{ kg / m}^3 & 1485 \text{ m / s} &= 1482030 \text{ kg / s m}^2 \end{aligned}$$

### Mechanische Impedanzanpassung im Mittelohr (bis max. 2 kHz)

- **Trommelfell** (kreisrunde, trichterförmige Membran mit 10 mm Durchmesser)
  - Schallschwingungen  $\Rightarrow$  mechanische Schwingungen
  - Amplituden bis herab zu  $10E-11 \text{ m}$  (d.h.  $1/10$  Atomradius)
- **Gehörknöchelchen (Hammer, Amboß, Steigbügel)**
- Die Gehörknöchelchen wandeln Schwingungen großer Amplitude und kleiner Kraft (Trommelfell) in solche kleiner Amplitude und großer Kraft (Ovale Fenster) um.
- Hebelwirkung ( $a_2/a_1 = 1,3$ )
- Kraftübertragung aufs Ovale Fenster (Flächenverhältnis  $A_2/A_1 = 20$ )

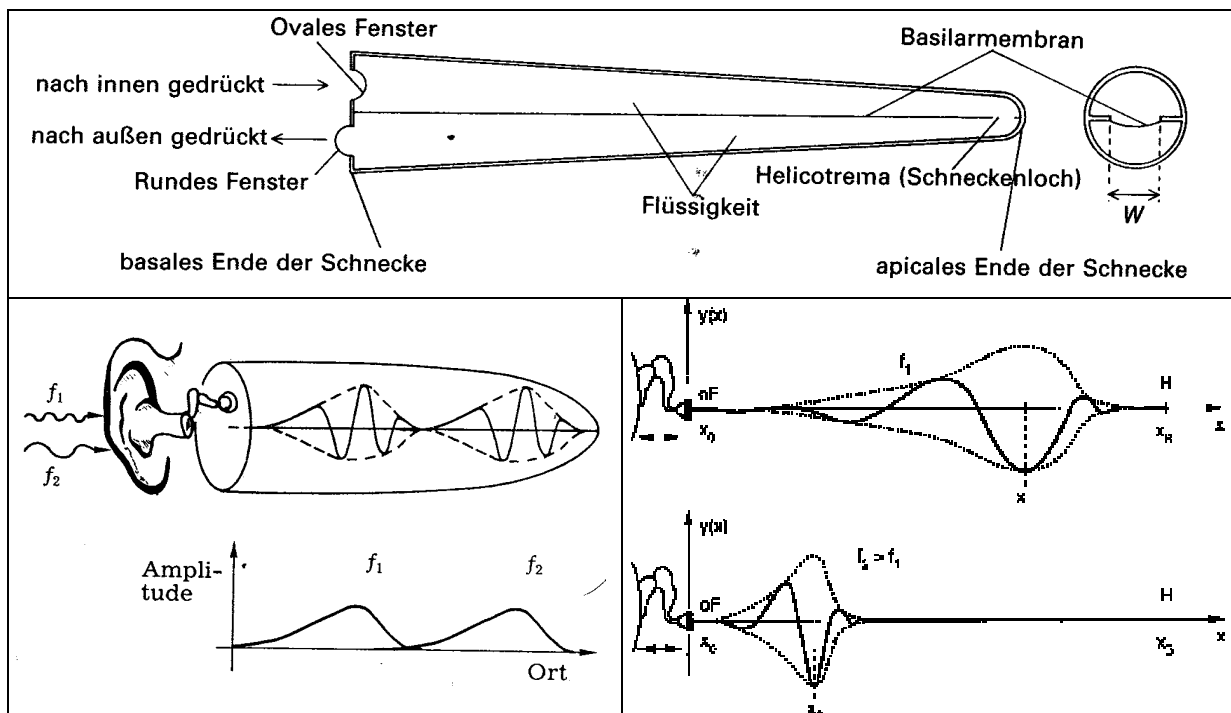
- **Mittelohr** (Trommelfell, Gehörknöchelchen, Ovale Fenster) ist über die 35 mm lange **Ohrtrumpete (Eustachische Röhre)** mit dem Nasen-Rachen-Raum (zwecks Druckausgleich) verbunden.

### Innenohr

- **Schnecke (Cochlea)** gefüllt mit Perilymphe
  - Vorhofgang (**Scala Vestibuli**) hinter dem ovalen Fenster mit Steigbügel
  - Paukengang (**Scala Timpani**) hinter dem runden Fenster
  - Schneckenspitze bzw. -loch (**Helicotrema**)
- **Schneckengang mit Basilarmembran**
  - Länge 35 mm,
  - Breite 0,04 mm (ovales Fenster) bis 0,49 mm (Helicotrema)
  - Darauf befindet sich das **Cortische Organ**:
    - 3500 Haarzellengruppen mit 20.000 Hörfasern
    - Gehörnerven enden an den Rezeptorzellen (Haarzellen)

### 4.3.2 Frequenzanalyse / Ortstheorie des Hörens

- Basilarmembran wird durch Flüssigkeitsschwingungen zu **Wanderwellenbewegung** (Transversalbewegung der B-Membran **ähnlich einer wehenden Fahne**) angeregt.
- Unterschiedliche, vom Ort abhängige mechanische Eigenschaften der Basilarmembran führen dazu, daß die Wanderwellen wie Brandungswellen nach einem **ortsabhängigen maximalen Aufsteilen** aufgrund von Reibungskraften zusammenbrechen.



### Maximum hängt von der Frequenz ab (Wanderwellendispersion, von Békésy, 1961)

Töne verschiedener Frequenz erregen **unterschiedliche örtliche Bereiche** der Basilarmembran

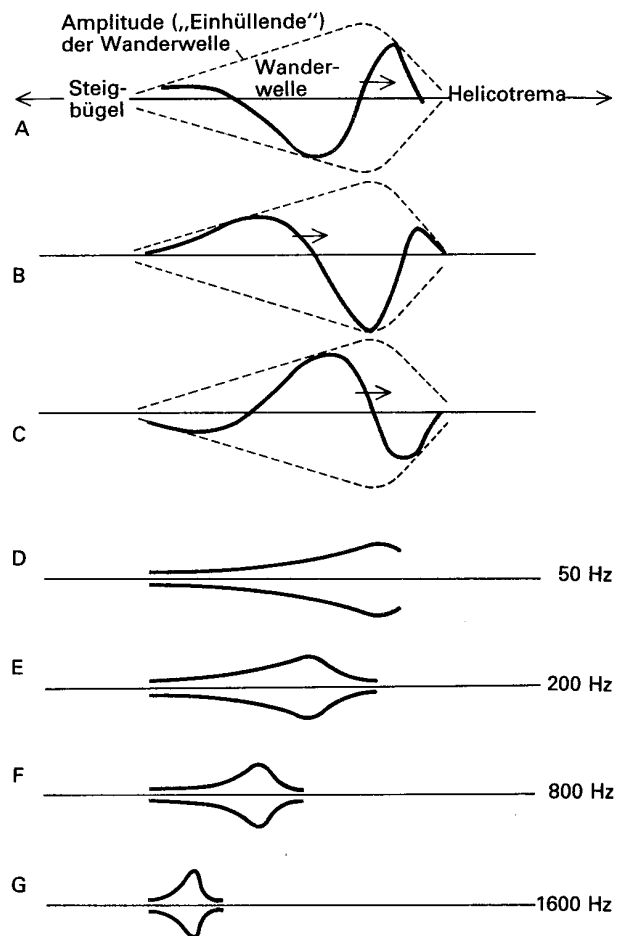
- **hohe Frequenz**  $\bar{P}$  **am Ovalen Fenster**
- **niedrige Frequenz**  $\bar{P}$  **am Helicotrema**
- Mechanisches Modell gekoppelter Pendel unterschiedlicher Pendellänge

Die hohe Frequenz- bzw. Tonhöhen-Auflösung erfolgt durch eine **Kontrastverschärfung im Nervensystem** (d.h. nicht physikalisch)

- Tatsächliche Auslenkungen im Bereich  $10^{-10}$  m (an der Hörschwelle)
- menschlicher Hörbereich Merkgel 20 Hz - 20 kHz (d.h. 3 Zehnerpotenzen)

Die Tonhöhenunterscheidung im **mittleren Frequenzbereich (1-3 kHz)** ist besonders ausgeprägt.

- Der 2,7 cm lange Gehörgang zwischen Ohrmuschel und Trommelfell wirkt als **breitbandiger Resonator mit einer Resonanzfrequenz von etwa 2700 Hz**
- Der zuständige Ortsbereich der Basilarmembran ist weiter auseinandergezogen
- **Übertragung durch Mittelohr nur bis 2000 Hz (darüber nur mit Knochenleitung)**
- Nichtlineares Verhalten im Mittel- und Innenohr führt zu Kombinationstönen



### 4.3.3 Lautstärkeempfinden

- Schallintensität  $[W / m^2]$   
= Schalleistung / Querschnittsfläche  
= Schallenergie / (Querschnittsfläche Zeit)

#### Weber Fechner

- ⇒ Einführung einer Pseudoeinheit namens Dezibel dB, welche die **menschliche Empfindung (z.B. Höreindruck)** nachbilden soll und ein **logarithmisches Maß des Verhältnisses zweier physikalischer Reizstärken**, z.B. der Schallintensität  $I$  oder Schalldruck  $p$  ist (aber nicht auf Schallgrößen beschränkt ist !!!)

$$E [dB] = 10 \cdot \log \frac{R}{R_0}$$

#### Bemerkung:

- Die **Pseudoeinheit Bel** wurde festgelegt mit  $\log(R/R_0)$ . Als die Akustiker feststellten, daß das durchschnittliche subjektive Unterscheidungsvermögen bei ca. 1/10 dieses

Wertes lag, wurde die heute gebräuchliche Pseudoeinheit Dezibel [dB] eingeführt. D.h. 1dB beschreibt eine Zunahme des Lautstärkepegels, die gerade noch wahrnehmbar ist.

- Die Pseudoeinheit dB kann stehen
  - sowohl für **Pegeldifferenzen** (relative Pegel)
  - als auch für **absolute Größen** (bezogen auf einen Bezugswert)
- Der resultierende Pegel bei der Addition von Schallgrößen ist nicht die Summe der Einzelpegel !
- Die Bezugsreizstärke  $R_0$  stellt die Normierung dieser Logarithmusfunktion ( $\log 1=0$ ) dar,

$$E[\text{dB}] = 0 \quad \text{für} \quad R = R_0$$

und kann frei gewählt (muß aber angegeben) werden.

Schallbeschreibungsgrößen			
Physikalisch			Physiologisch
<b>Schalldruck [Pa]</b>	<b>Schalleistung [W]</b>	<b>Schallintensität [W/m<sup>2</sup>]</b>	
	abgestrahlte Energie pro Zeiteinheit [J/s]	Schalleistung durch senkrechte Fläche	
<b>Schalldruckpegel</b>	<b>Schalleistungspegel</b>	<b>Schallintensitätspegel</b>	<b>Lautstärkepegel</b>
[dB]	[dB]	[dB]	[dB(A)] Phon
<b>20 log [p/p<sub>0</sub>]</b>	<b>10 log [P/P<sub>0</sub>]</b>	<b>10 log [I / I<sub>0</sub>]</b>	
Schalldruck amplitude p	Schalleistung P = k p <sup>2</sup>	Schallintensität I = P/A	

Schallintensitätspegel	$E = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} = 10 \cdot \log \left( \frac{P/A}{P_0/A} \right)$ $= 10 \cdot \log \frac{P}{P_0} = 10 \cdot \log \left( \frac{k \cdot p^2}{k \cdot p_0^2} \right)$ $= 20 \cdot \log \frac{p}{p_0}$
Schalleistungspegel	
Schalldruckpegel	

⇒ Für die **absoluten Schallpegelwerte** wählt man die jeweiligen Reizstärken an der Hörschwelle als Bezugsgröße  $R_0$ :

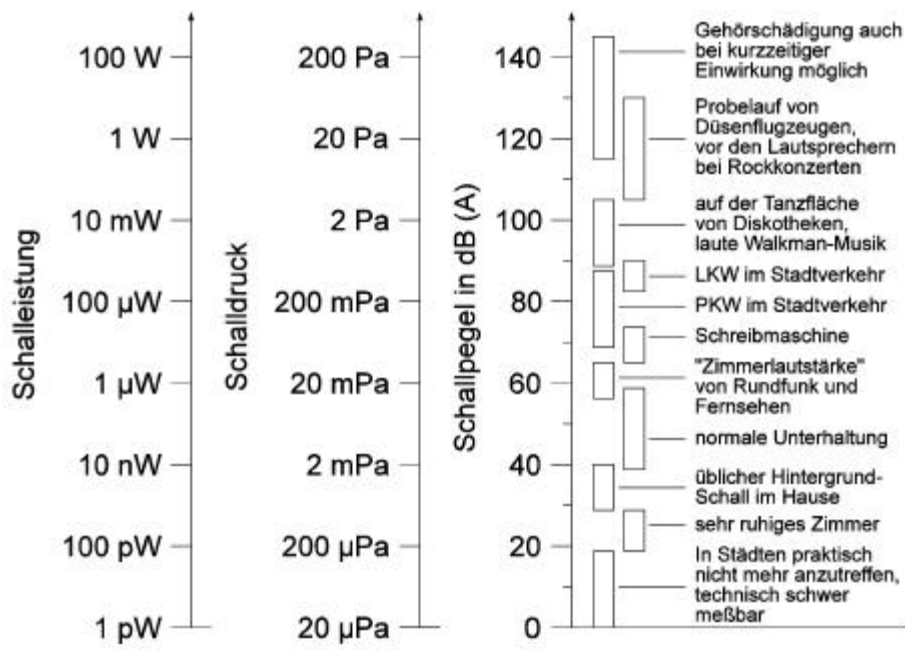
Schallgröße bei f = 1000 Hz	Hörschwelle	Schmerzschwelle
Schallschnelle [m/s]	50 E -9	0,25
Ausschlagamplitude [m]	20 E -12	1 E -9
<b>Schalldruck [Pa]</b>	<b>20 E - 6</b>	<b>60</b>
<b>Schallintensität [W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>10 E - 12</b>	<b>10</b>
<b>Schallpegel [dB]</b>	<b>0</b>	<b>130</b>

### Einfache dB-Regel

(Merke: 10 dB entspricht einer Verdopplung bzw. Halbierung des Schallempfindens)

doppelte Intensität	$I_2 / I_1 = 2$	$E = 10 \log 2$	= 3 dB
10 fache Intensität	$I_2 / I_1 = 10$	$E = 10 \log 10$	= 10 dB
100 fache Intensität	$I_2 / I_1 = 100$	$E = 10 \log 100$	= 20 dB
1000 fache Intensität	$I_2 / I_1 = 1000$	$E = 10 \log 1000$	= 30 dB

Intensität [ $10E-12$ W/m <sup>2</sup> ]	L [dB]	Beispiel
1	0	Hörschwelle
100	20	Flüstern
10000	40	normale Unterhaltung
1000000	60	Bürogeräusche
100000000	80	Motorrad mit Schalldämpfer
10000000000	100	Motorrad ohne Schalldämpfer
10000000000000	130	Schmerzschwelle



### Der Frequenzabhängigkeit des Hörbereichs

wird durch die Phonskala oder dBA Skala genügt:

- Töne derselben Intensität  $I$  werden bei unterschiedlicher Frequenz verschieden laut empfunden.
- Diese psychophysikalische Eigenschaft wird in einer weiteren Messgröße, der „**Lautheit**“ berücksichtigt. Die Maßeinheit dieser Größe ist 1 **Phon**.

