

5. Ton und Klang

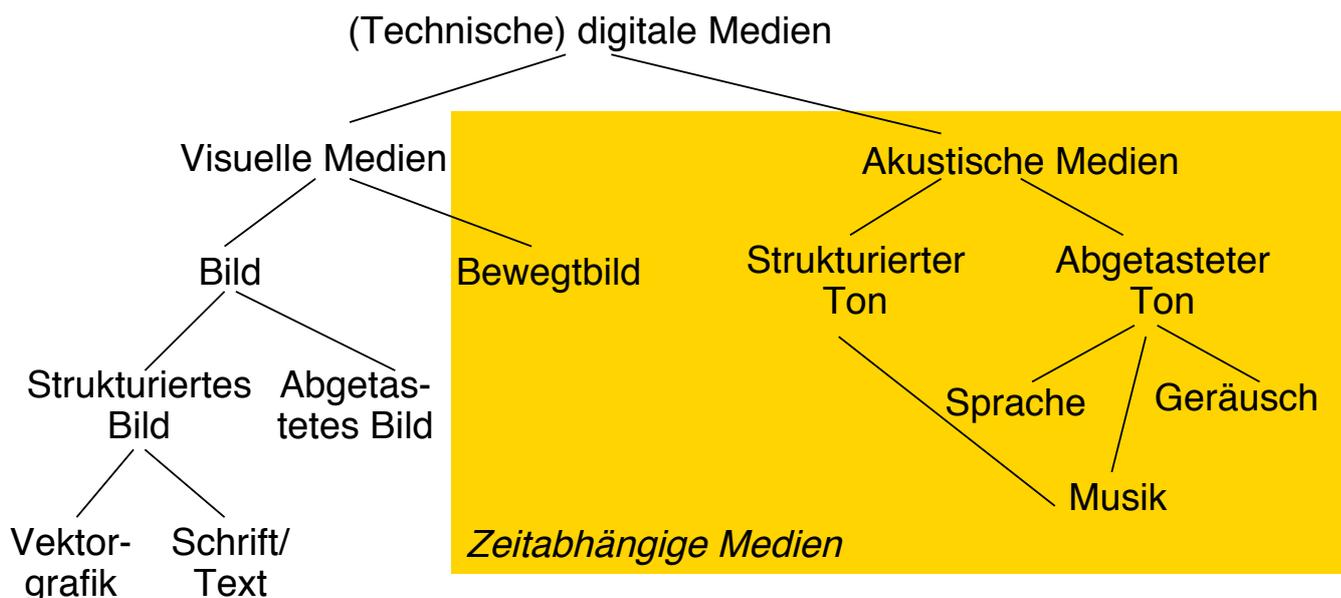
- 5.1 Ton: Physikalische und physiologische Aspekte 
- 5.2 Kompression von Audio-Signalen: MPEG-Audio
- 5.3 Audio-Datenformate: Übersicht
- 5.4 Klangerzeugung und MIDI

Literatur:

Taschenbuch Multimedia, Kapitel 5.1 und 5.2

Hannes Raffaseder: Audiodesign, Fachbuchverlag Leipzig 2002

Übersicht Medientypen



Weitere Klassifikationskriterien: komprimiert/unkomprimiert, ...

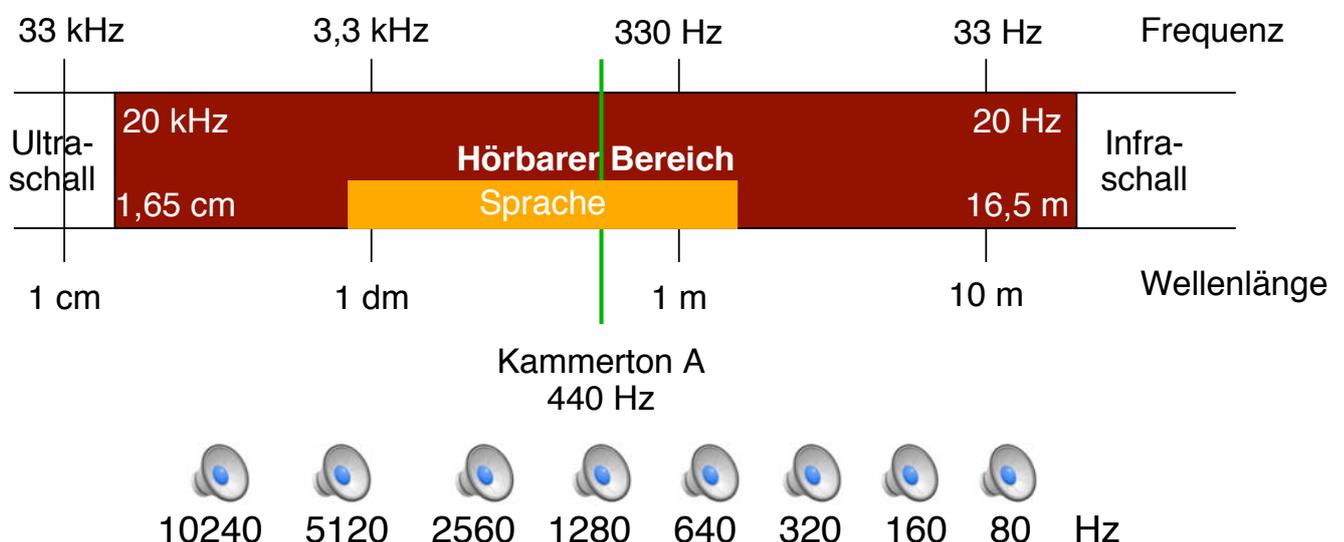
Angelehnt an Eidenberger & Divotkey

Übermacht der visuellen Eindrücke?

- Tendenz: Visuelle Gestaltung dominiert
 - CD-Cover, Bühnenshow, Interessenlage von Medieninformatik-Studierenden
 - Gibt das Auge den Ton an?
- Warum Gestaltung *akustischer* Medien?
 - Ohr nicht verschließbar, unbewusste Wahrnehmung als Normalfall
 - » Akustische „Szenerie“ bestimmt Grundstimmung, siehe [Filmmusik](#)
 - » „Ohrwürmer“
 - Direkte Kopplung der Schallverarbeitung mit Emotionen
 - » Feine „Untertöne“ in der Sprache
 - Verbindender, kollektivierender Effekt
 - » Blick auf Schallereignis, Jugendkultur, Marschmusik
 - Objektivierende Wirkung
 - » Akustische Ereignisse wesentlich schwerer zu verfälschen als optische
 - Aufmerksamkeitseffekt
 - » Akustische Alarme
- Audio-Gestaltung ist wesentlich in Kunst und Ingenieurwesen!

Ton (*sound*)

- Schallwellen, d.h. schnelle Änderungen des Luftdrucks
 - Longitudinalwellen, keine Schwingungsebenen
 - Ausbreitungsgeschwindigkeit ca. 331 m/s (bei 0°C), ca. 343 m/s (bei 20°C)
- Vom Menschen hörbares Spektrum ca. 20 Hz bis 20 kHz



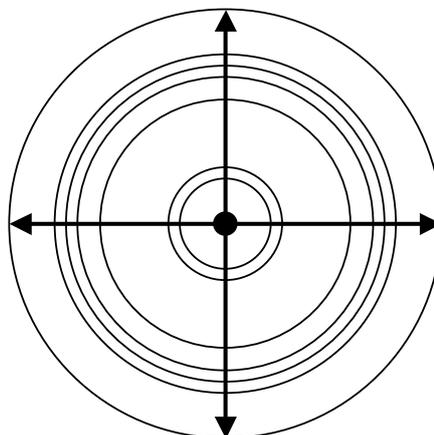
Longitudinal- und Transversalwellen



- Longitudinalwelle (a):
 - Oszillatoren schwingen in der Ausbreitungsrichtung
- Transversalwelle (b):
 - Oszillatoren schwingen quer zur Ausbreitungsrichtung
- [Demo applet](#)

Schallausbreitung

- Schall breitet sich als *Kugelwelle* aus
 - Gleicher Schalldruck und gleiche Schallschnelle zu gegebenem Zeitpunkt auf konzentrischer Kugel um die Quelle
 - Bei größerer Entfernung: Äquivalent zu einer *ebenen Welle*



Wellenlänge

- Die Ausbreitung von Wellen (in diesem Fall Schallwellen) ist abhängig vom umgebenden Medium. Für jedes Medium gibt es eine spezifische Ausbreitungsgeschwindigkeit.
- Die Länge λ einer Welle (d.h. der Abstand bis zur nächsten Wiederholung) bestimmt sich aus der Periodenlänge T und der Ausbreitungsgeschwindigkeit c

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f}$$

Reflexion

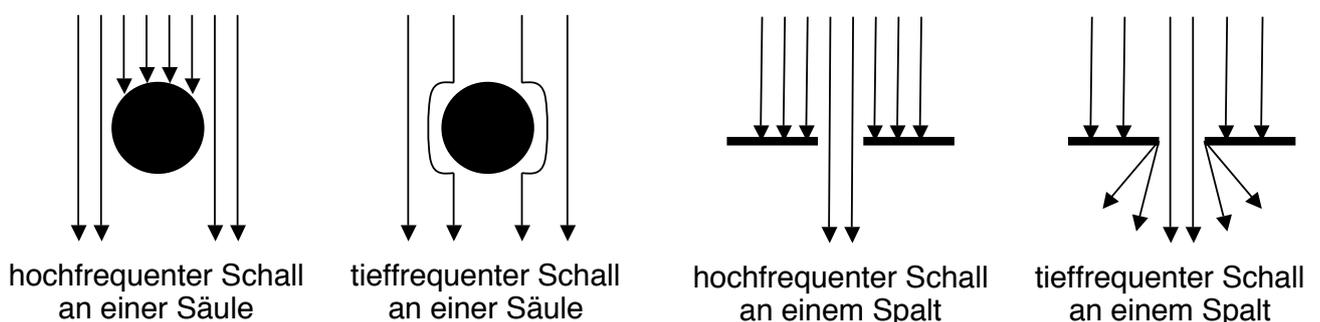
- Für Schallwellen gelten die gleichen Gesetze wie für Lichtwellen
- Aber: Effekte abhängig von Wellenlänge
 - Wellenlänge bei Schallausbreitung in der Luft bei 20°C zwischen ca. 20 m (tiefe Frequenzen) und 2 cm (hohe Frequenzen)
 - Lichtwellen erheblich kürzer (Mikrometer-Bereich)
- *Reflexion:*
 - Reflexionsgesetz (Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel) gilt nur, wenn Grenzfläche groß im Vergleich zur Wellenlänge
 - » d.h. in kleineren Räumen keine Reflexion tiefer Frequenzen
 - Rauigkeit der Oberfläche führt zu *diffuser* (zerstreuender) Reflexion, wenn Unebenheiten in der Größenordnung der Wellenlänge
 - » d.h. auch bei zentimetergroßen Unebenheiten wirkt Wand auf tieffrequenten Schall als "glatt"

Absorption, Brechung

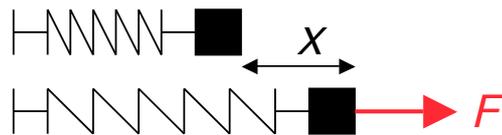
- *Absorption:*
 - Ein Teil der Schallenergie wird nicht reflektiert
 - » Absorptionsgrad abhängig vom Material und der Schallfrequenz
 - *Dissipation:* Umwandlung in Wärmeenergie
 - *Transmission:* Weiterleitung im absorbierenden Medium
 - Aufteilung der absorbierten Energie in Dissipation und Transmission
 - » frequenzabhängig: niedrige Frequenzen höhere Transmission (*Körperschall*)
- *Brechung:*
 - Auch Schall wird gebrochen
 - Z.B. bei Luftschichten verschiedener Temperatur

Beugung

- Lichtwellen erzeugen immer einen Schatten hinter einem undurchsichtigen Gegenstand
 - Weil Gegenstand groß im Vergleich zur Wellenlänge
- Schall-"Schatten" entsteht erst, wenn ein Gegenstand groß im Vergleich zur Wellenlänge ist
- Bei Gegenständen in Größenordnung der Wellenlänge tritt *Beugung* auf
 - Wellen fließen "um das Hindernis herum"
 - Wellen werden von einem Spalt zerstreut



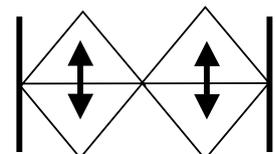
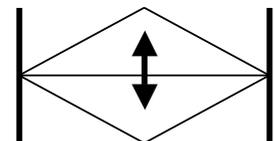
Schallentstehung: Schwingung



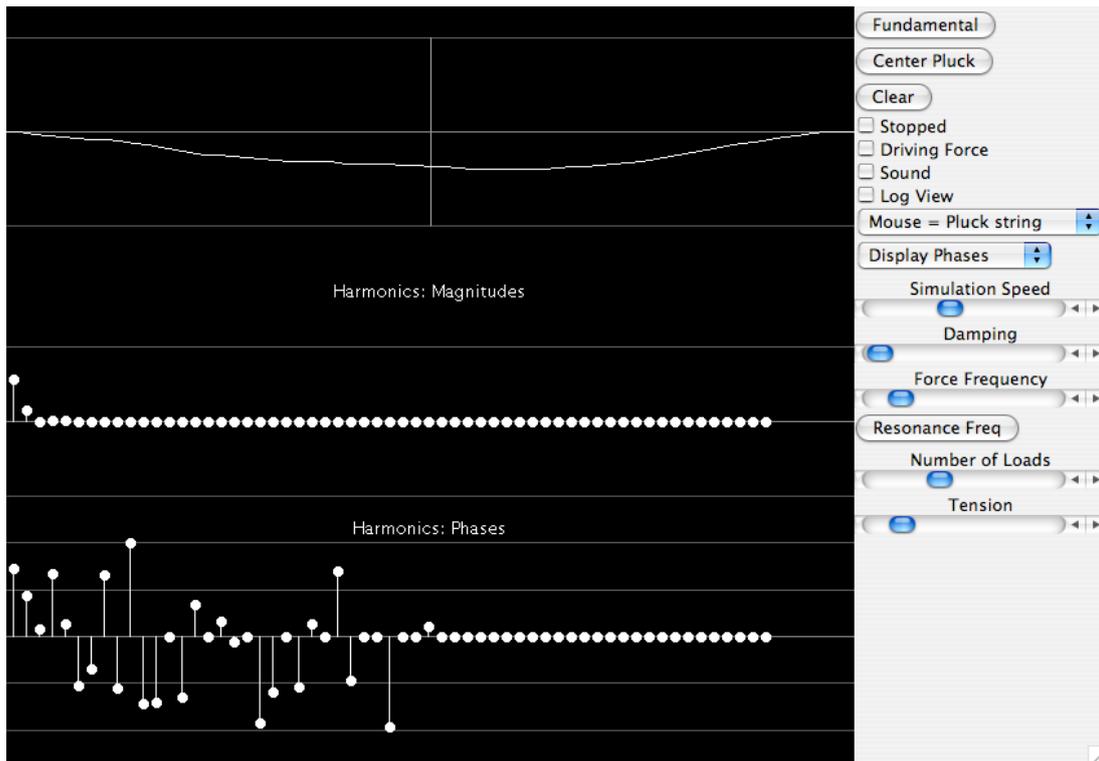
- *Anregungskraft*: Wirkt von außen auf Körper ein
- *Elastizität*: Beschreibt Verformbarkeit des Körpers
 - Beispiel oben: Feder
 - Bewirkt Tendenz eines verformten bzw. ausgelenkten Körpers, in die Grundstellung zurückzukehren
- *Massenträgheit*:
 - Masse kehrt nicht sofort in Ruhestellung zurück, sondern bewegt sich in Gegenrichtung der ursprünglichen Auslenkung weiter
 - Elastizität bewirkt entgegengesetzte Kraft
 - Gesamtergebnis: *Schwingung*
 - Frequenz umso höher, je kleiner die Masse und je geringer die Elastizität

Schwingungssysteme

- Schwingungssystem besteht aus:
 - Oszillator (z.B. Saite, Membran)
 - Anregung (z.B. zupfen, anstreichen, anschlagen)
 - Resonanzkörper (akustischer Verstärker, bestimmt Klangfarbe)
- Modell eines Schwingungssystems:
 - Gekoppelte einfache Schwingungssysteme (z.B. gekoppelte Federn)
 - » Konzeptionell auch unendlich viele gekoppelte Systeme (z.B. Modell einer Saite)
 - Randbedingungen
 - » z.B. eingespannte Saite: Auslenkung an den Enden immer Null
 - Begrenzte Anzahl von Wellenformen mit jeweils spezifischer Eigenfrequenz (“stehende Wellen”)
 - » Beidseitig eingespannte Saite der Länge L : Sinuswellen
 - » größtmögliche Wellenlänge $2 \cdot L$ (Grundfrequenz)
 - » ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz



Loaded string demo



Effektivwert und Pegel eines Signals

- Lautstärkenvergleich:
 - Wie bestimmen wir die „mittlere Amplitude“?
 - Arithmetischer Mittelwert falsch wegen negativer Werte
- *Effektivwert*:
 - Quadriert Signalstärkenwerte
 - Bildet Mittelwert über Zeitintervall

$$s_{\text{effektiv}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T s^2(t) dt}$$

- *Pegel*:
 - Verhältnis zweier Größen
 - Riesige Wertunterschiede in der Schalldruck-Wahrnehmung des Menschen:
 - » Faktor 32×10^{12} (32 Trillionen) = 2^{45}
 - *logarithmische* Pegel

Dezibel, Absolute Pegel

- Exponentieller Zusammenhang:
 - Verdoppelung eines physikalischen Basismaßes wird als eine Stufe (plus 1) aufgefasst (sog. logarithmisches Gesetz)
 - Beispiele für das logarithmische Gesetz:
 - » Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs für Schalldruck
 - » Frequenzwahrnehmung in Oktaven
 - » Helligkeitswahrnehmung in Grauwerten
 - » Verlust in Telefonkabeln (als Funktion der Länge)
- Bel (B, benannt nach Graham Bell):
 - Logarithmisches Maß zu einem Referenzwert (0 Bel)
 - Referenzwert traditionell 1 mW an 600 Ω = 0,78V * 1,3mA
- DeziBel (dB, „de-be“, „dee-bee“): 1 dB = 1/10 B
- *Absolute Pegel*: Dezibel-Angabe relativ zu verschiedenen Referenzen:
 - Verlustleistung (m, W)
 - Schalldruck (SPL) relativ zu 2 x 10⁻⁵ Pa (Hörschwelle)
 - Bewerteter Schalldruck (A)

Relative Pegel

Relativer *Leistungspegel* in dB:

$$L_P = 10 \cdot \log\left(\frac{P_A}{P_E}\right)$$

Verdopplung:

$$L_{P'} = 10 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot P_A}{P_E}\right) = 10 \cdot \log(2) + L_P = 3 + L_P$$

	220Hz
– 0 dB	
– 6 dB	
– 12 dB	
– 18 dB	

$$\text{Log}_{10}(2)=0.3$$

Bezogen auf *Amplitudenpegel* (effektive Amplitudenwerte):

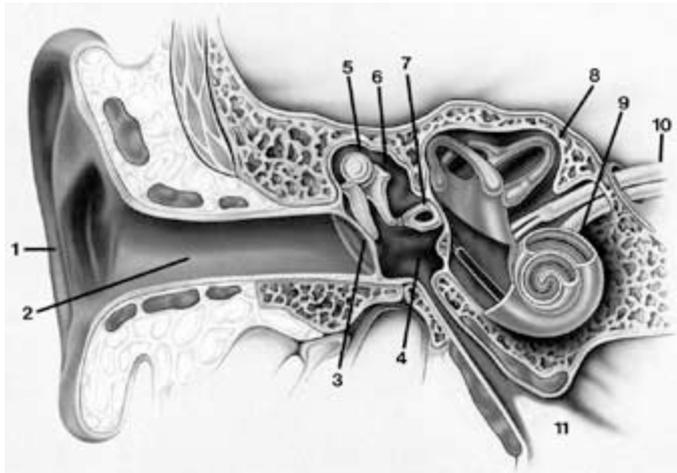
$$L_P = 10 \cdot \log\left(\frac{V_A^2}{V_E^2}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{V_A}{V_E}\right)$$

Verdopplung:

$$L_{P'} = 20 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot V_A}{V_E}\right) = 20 \cdot \log(2) + L_P = 6 + L_P$$

„Plus 6 dB
ist doppelte
Lautstärke“

Das menschliche Ohr

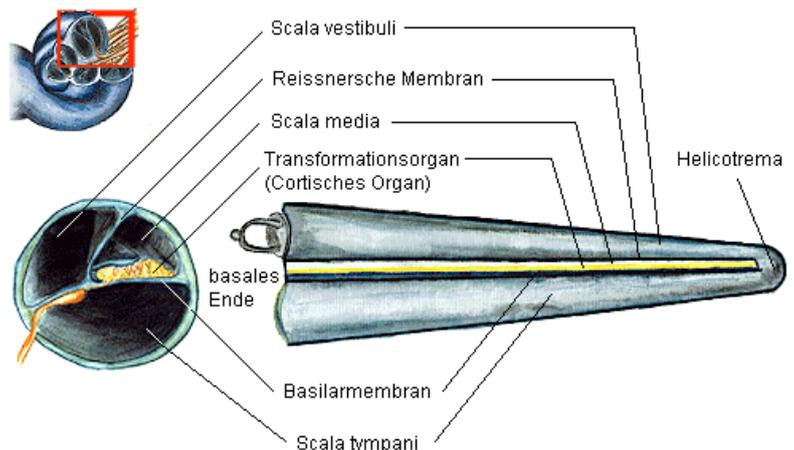


- 1 Ohrmuschel (*pinna*)
- 2 Gehörgang
- 3 Trommelfell (*ear drum*)
- 4 Mittelohr
- 5 Hammer (*malleus*)
- 6 Amboss (*incus*)
- 7 Steigbügel (*stapes*)
- 8 Gleichgewichtsorgan
- 9 Schnecke (*cochlea*)
- 10 Hörnerven

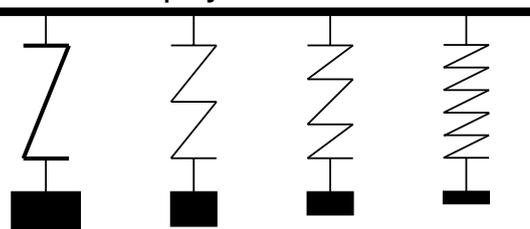
- Aussenohr:
 - HRTF = Head Related Transfer Function
- Mittelohr:
 - Trommelfell, Hammer, Amboss, Steigbügel: Verstärkung der Kraftwirkung
- Innenohr:
 - Schnecke (*cochlea*)
 - Aufgerollte Röhren (Gänge), gefüllt mit Lymphflüssigkeit

Schnecke

- Aufgerollt: Im *abgerollten* Zustand ca. 30 mm lang
- Enthält 3 Röhren und die *Basilarmembran*
- Auf der Basilarmembran: *Corti'sches Organ*
 - 20000 Haarzellen
 - überträgt Bewegungen der Lymphflüssigkeit auf Haarzellen und damit auf Nervenreize
- Ort der Reizung im Corti'schen Organ abhängig von der Frequenz
 - konischer Aufbau und veränderte Elastizität der Membran zur Spitze hin



Vereinfachtes physikalisches Modell:

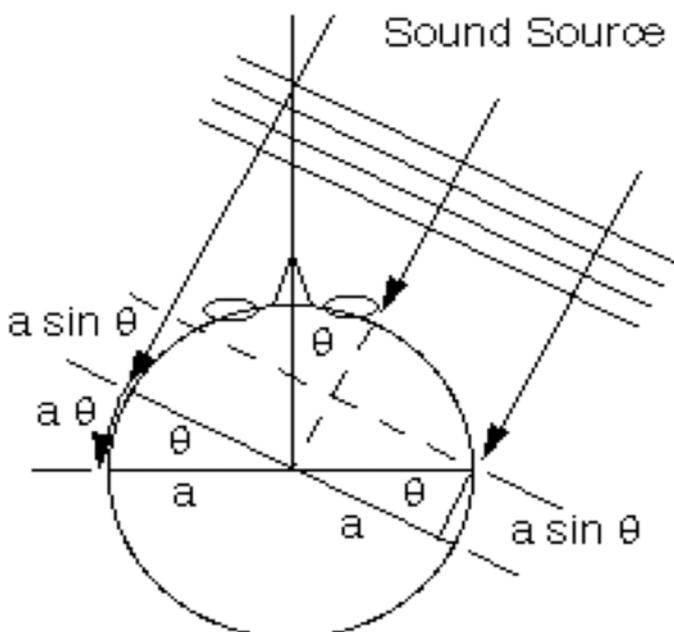


Räumliches Hören

- Stereo-Effekt
 - Unterschiedliche Lautstärke des Schallereignisses an beiden Ohren
 - Zeitliche Verzögerung des selben Schallereignisses in seiner Wahrnehmung durch beide Ohren
 - Verzögerungsmessung liefert Information über Entfernung der Quelle
- Kann ein einseitig tauber Mensch räumlich hören?
 - Eingeschränkt: ja!
 - Reflexion und Beugung an Umwelt und Ohrmuscheln liefern umfangreiche Information
- Frequenzabhängigkeit der Ortung:
 - Niedrige Frequenzen generell schlechter zu orten
 - Konsequenz physikalischer Tatsachen (Wellenlänge:Hindernis)
 - Siehe z.B. „Subwoofer“-Technologie

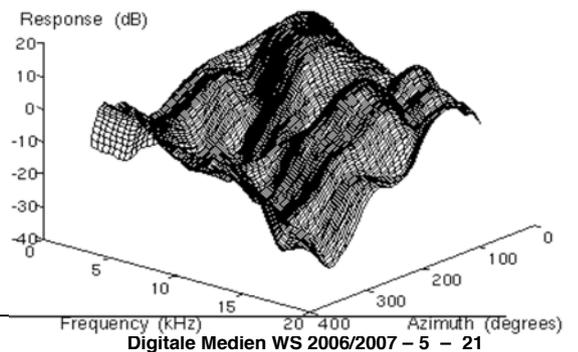
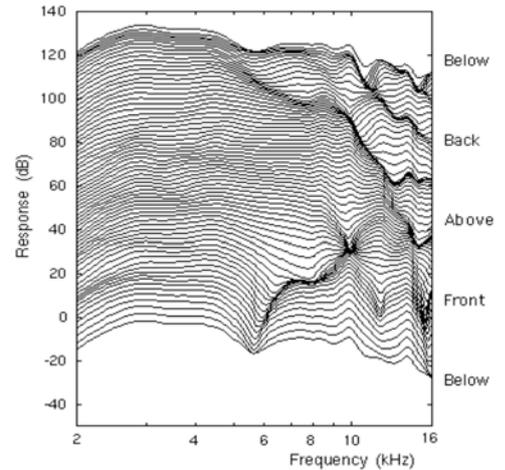
Hinweise (cues) für räumliches Hören

- Interaural intensity difference (IID)
- Interaural time difference (ITD)
- Head related transfer functions (HRTF)

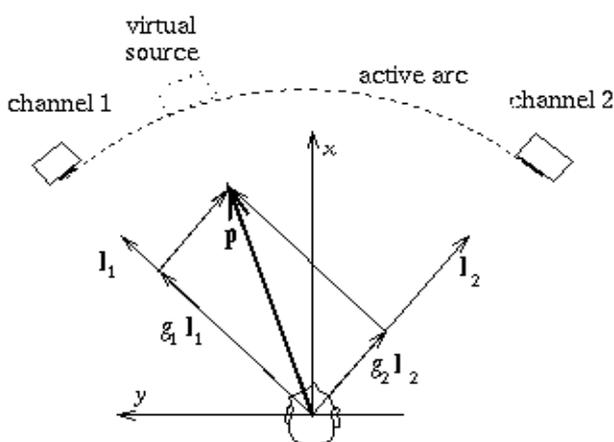


Head Related Transfer Function

- Für alle Positionen rund um den Kopf Impulsantwort von der Position zu beiden Ohren messen → HRIR
- Fourier-Transformation davon ist die HRTF
- Enthält alle physikalischen cues für die Lokalisierung
- HRTF ist von Mensch zu Mensch verschieden
- Sobald HRTF für beide Ohren bekannt ist, kann mit einem Kopfhörer Raumklang (also auch vorne/hinten und oben/unten) erzeugt werden

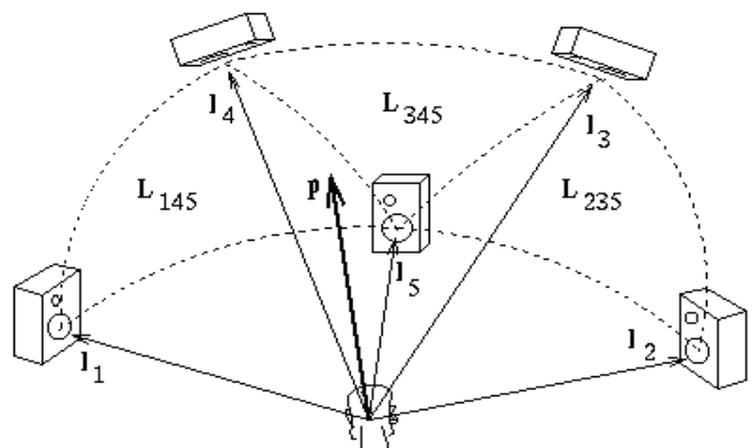


Vector Based Amplitude Panning (VBAP)



$$p = g_1 l_1 + g_2 l_2 = Lg$$

$$g = p^T L^{-1}$$



$$p = g_1 l_1 + g_2 l_2 + g_3 l_3 = Lg$$

$$g = L^{-1} p^T$$

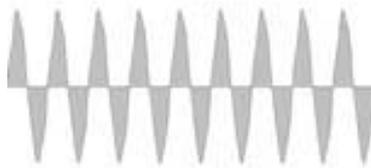
➔ 3D Raumklang über Lautsprecher

Empfindungen: Klang und Geräusch

- Töne sind vom Menschen wahrnehmbare kleine Luftdruckänderungen
 - Warum empfinden wir manchen Ton als "Musik"?
- Primärempfindungen der Tonwahrnehmung:
 - Tonhöhe (Bsp. verschiedene Klaviertasten)
 - Lautstärke (Bsp. Trommelanschlag)
 - Klangfarbe (Bsp. gleicher Ton auf verschiedenen Instrumenten)
- Klang:
 - alle drei Primärempfindungen wahrnehmbar 
- Geräusch:
 - nur Lautstärke wahrnehmbar 

Periodizität

- Klänge sind, als Signalform betrachtet, *periodisch* (d.h. wiederholen Teilabschnitte)
- Geräusche sind schlechter strukturiert und meist aperiodisch.



Blockflöte



LKW



Violine



Fahrradkette



Frequenzspektrum, Oberschwingungen

- *Frequenz* (Tonhöhe):
 - Maß für die Häufigkeit, mit der sich positive und negative Spannungen abwechseln, Maß 1 Hertz = 1 Schwingung/s
- Audiosignal:
 - besteht aus Vielzahl von überlagerten Frequenzen (Frequenzspektrum)
 - *Bandbreite*: Differenz zwischen höchster und niedrigster Frequenz
 - Beispiel: Ton eines Musikinstrumentes
- *Grundton*: Wahrgenommene Tonhöhe
 - Größter gemeinsamer Teiler aller am Signal beteiligten Frequenzen
 - Oft: Tiefste enthaltene Teilfrequenz
- *Obertöne*:
 - *reine Obertöne*: ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz
 - zusätzlich: geräuschhafte Tonanteile (z.B. Zupfgeräusch)
 - Obertonspektrum ist für charakteristischen Instrumentklang bestimmend

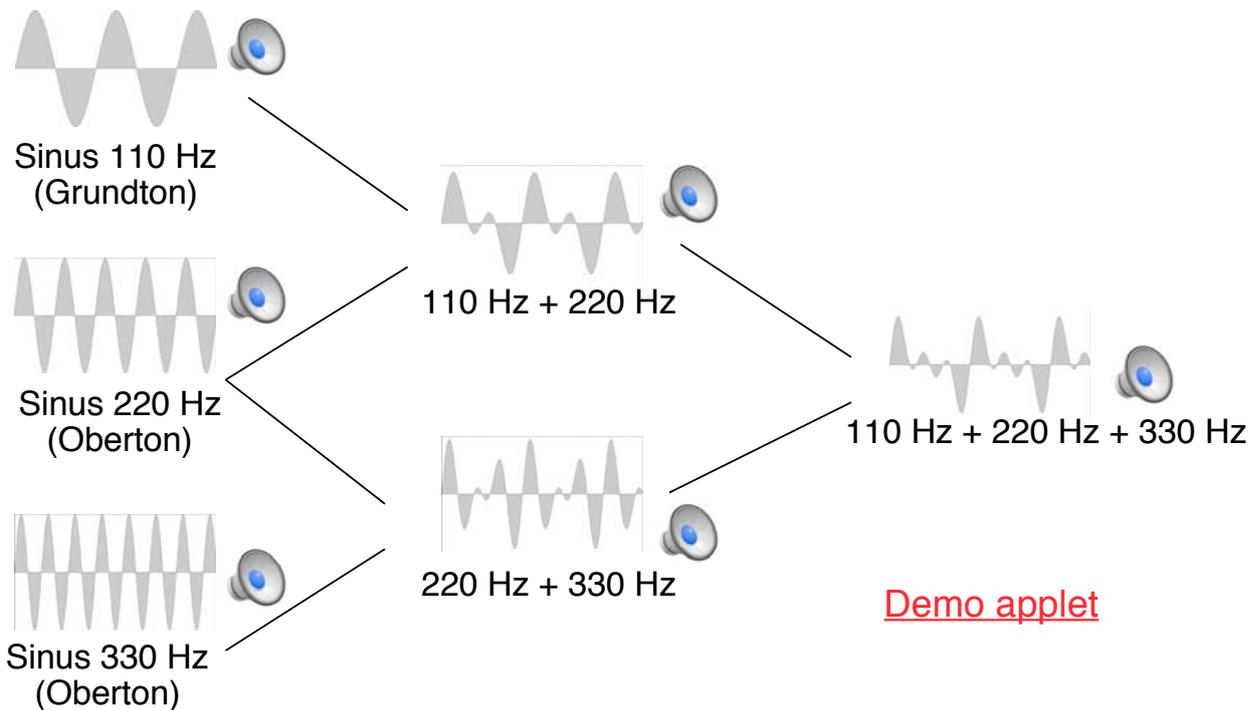
[Demo applet](#)

Harmonische Schwingungen

$$s(t) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \sin(k \cdot 2\pi \cdot f \cdot t + \theta_n)$$

- *Harmonische Schwingung (harmonischer Ton)*:
 - Beschreibbar durch Sinus- und Cosinusfunktionen
- *Harmonisch komplexe Schwingung (Klang)*:
 - Zusammengesetzt aus harmonischen Teilschwingungen
 - Grundton und ganzzahlige Vielfache
- *Klänge ohne Grundton*:
 - Zusammengesetzt aus harmonischen Teilschwingungen
 - Keine ganzzahligen Vielfachen einer Grundfrequenz
 - Z.B. Pauken, Gongs

Überlagerung harmonischer Schwingungen



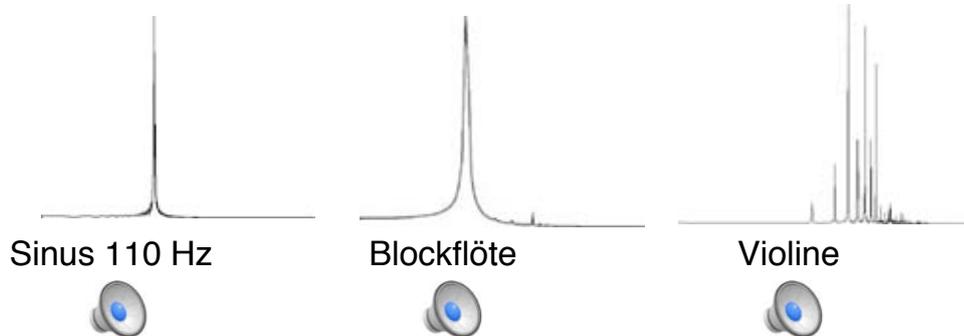
Interferenz und Schwebung

- **Interferenz:** Überlagerung von Schallwellen exakt gleicher Frequenz
 - konstruktive Interferenz (*in phase*):
 - » Übereinstimmung der Phasenlage
 - » Addition der Amplituden
 - destruktive Interferenz (*out of phase*):
 - » Gegenphasige Lage (180° verschoben)
 - » Subtraktion der Amplituden – Auslöschung
- **Schwebung:** Überlagerung von Wellen annähernd gleicher Frequenz
 - konstruktive und destruktive Interferenz wechseln sich ab
 - Amplitudenverlauf beschreibt neues Signal mit Frequenz = Differenz der überlagerten Frequenzen
- Diskussion: Was passiert, wenn ich bei meiner Stereoanlage einen Lautsprecher richtig, den andern mit +/- vertauscht anschlieÙe?

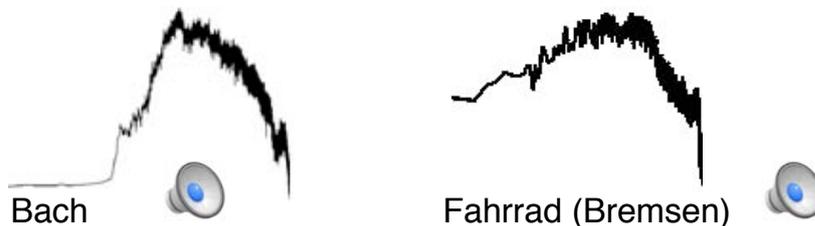
Frequenzspektren

- Frequenzspektrum von Klängen
 - Anzahl diskreter Spektrallinien (Grund- und Obertöne)
- Frequenzspektrum von Geräuschen
 - kontinuierliches Spektrum diverser Frequenzen

Klänge:

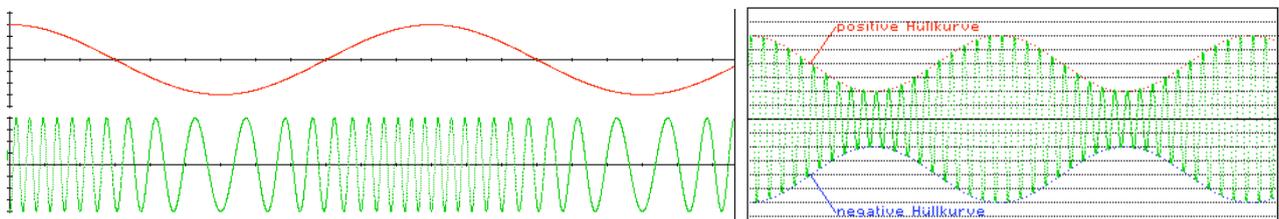


Geräusche:



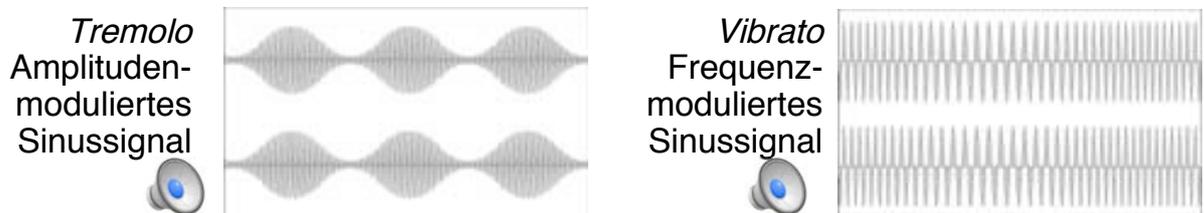
Modulation

- Modulation:
 - gezielte Überlagerung einer Grundfrequenz (Träger) mit einem Nutzsignal
 - Anwendung in der Übertragungstechnik (z.B. Rundfunk)
- Amplituden-Modulation (AM):
 - Hüllkurve der Trägerfrequenz (Amplitude) in Abhängigkeit vom Nutzsignal verändert
- Frequenz-Modulation (FM):
 - Abweichung von der Basisfrequenz in Abhängigkeit vom Nutzsignal
- Diskussion: Warum bedeutete beim analogen Rundfunk der Wechsel von AM auf FM eine Qualitätsverbesserung?



Zeitlicher Verlauf von Schallsignalen, Transienten

- Mikroskopischer Zeitbereich: $0,05 \text{ ms} < t \leq 50 \text{ ms}$
 - Hörbare Frequenzen (20 Hz bis 20 kHz)
- Zeitbereich der Übergangsklänge (*Transienten*): $50 \text{ ms} < t \leq 150 \text{ ms}$
 - Modulation hörbarer Frequenzen
 - So "schnell" (20 Hz bis 7 Hz), dass noch als Variation des Klangs wahrgenommen
- Makroskopischer Zeitbereich: $t > 150 \text{ ms}$
 - Verlauf eines Klangs (z.B. gespielte Note) über die Zeit (Hüllkurve)
 - Formaler Aufbau eines Musikstücks
 - Tempo, Metrum, Rhythmus
- Beispiele für Transienten:



Informationsgehalt akustischer Szenen

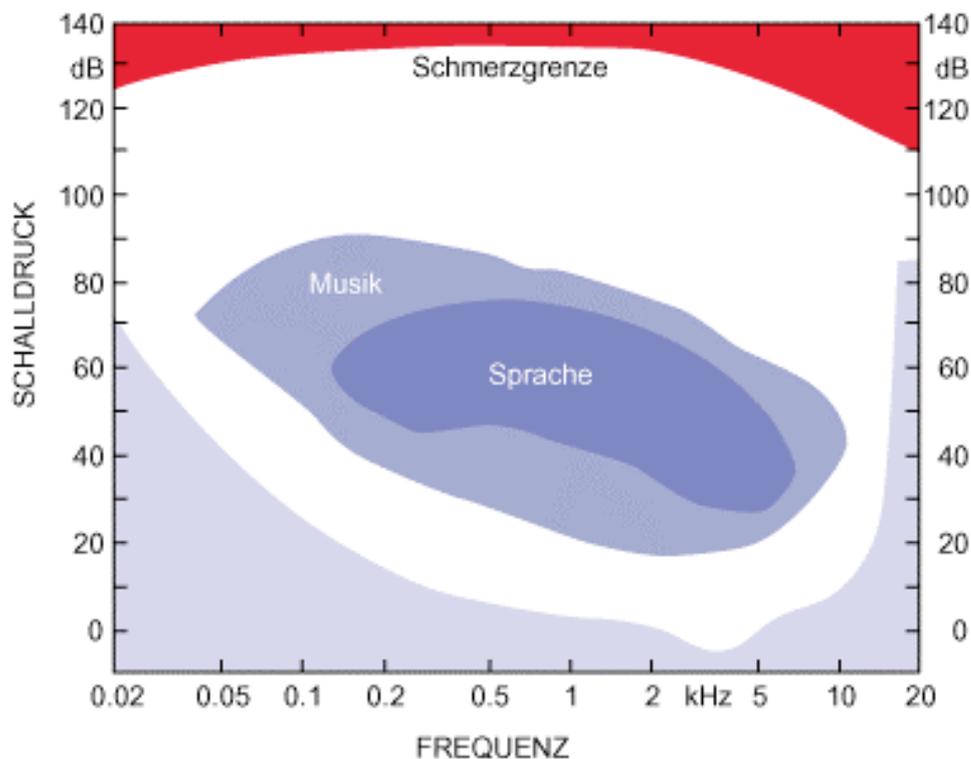
- Umgebung des Menschen ist durch Vielzahl verschiedenartiger Geräusche geprägt
- Menschlicher Gehörsinn (= Hörapparat + Nachverarbeitung)
 - Kann gezielt Aufmerksamkeit auf sehr spezifische Teilsignale richten: *Cocktailparty-Effekt*
 - Nimmt Hintergrundinformationen neben selektierter Information weiter wahr (z.B. Alarmsignale, Durchsagen)
 - Kann räumlich weit verstreute Informationsquellen integrieren (wesentlich geringere Verdeckung als in der Optik)
 - Kann sehr genau verschiedene Schallereignisse differenzieren („Mischfarben“ vs. Wahrnehmung gleichzeitiger Töne)
- Digitale Tonverarbeitung muss sich mit der Informationsverarbeitung im Gehirn befassen, nicht nur mit dem physikalischen Hörorgan

Psychoakustik

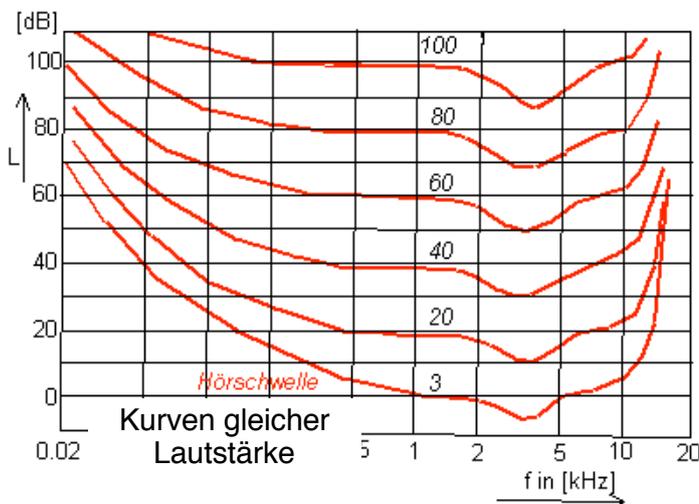
- Die *Psychoakustik* versucht kausale Zusammenhänge zwischen den physikalischen Größen eines Schallsignals und den dadurch ausgelösten Empfindungen zu erfassen.

Mensch wahrnehmbare Eigenschaft	Computer physikalische Kenngröße
Tonhöhe	Grundfrequenz
Lautstärke	Druckamplitude
Klangfarbe	Frequenzspektrum

Hörfläche



Lautstärke und Frequenz



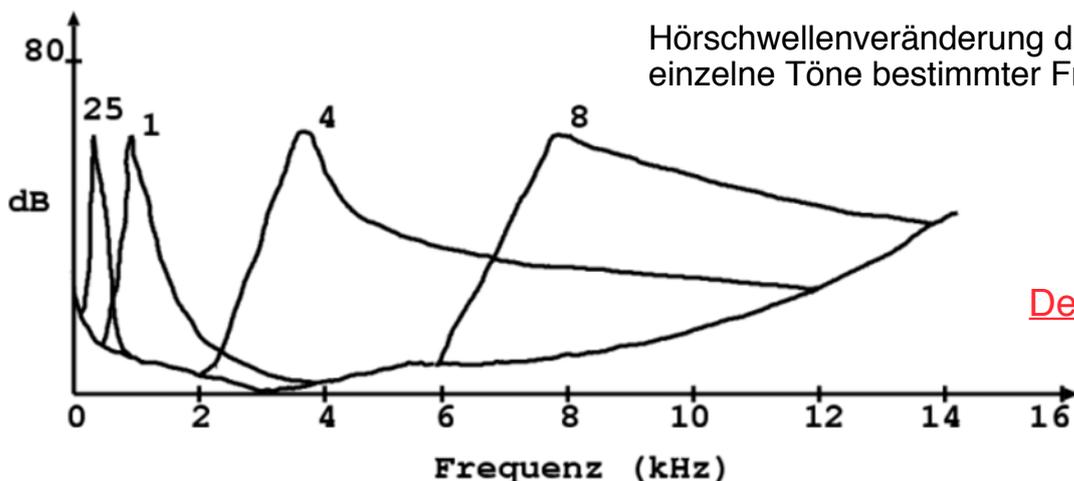
- Die Hörschwelle ist abhängig von der Frequenz:
 - Größte Empfindlichkeit bei ca. 2 – 5 kHz
- Gleich empfundene Lautstärke frequenzabhängig bei verschiedenem Schalldruck
 - *Subjektive* Lautstärke gemessen in *Phon*
 - x Phon: Lautstärke vergleichbar zu 1 kHz Ton bei Schalldruck von x dB (SPL)

- Korrektur der Frequenzabhängigkeit durch Gewichtungskurven (A, B, C)
 - meistverwendet A-Kurve (40 Phon), dB(A)
 - für höhere Lautstärken B- und C-Kurven

„Loudness“ hebt bei ger. Lautstärke Bässe und Höhen gemäß dieser Kurven an

Frequenz-Maskierung

- Frequenzwahrnehmung durch die Schnecke:
 - endliche Breite des betroffenen Bereichs
 - dadurch Überlappung benachbarter Frequenzbereiche
- Ein lauter Ton einer bestimmten Frequenz macht leisere Töne ähnlicher Frequenz unhörbar.



[Demo applet](#)

Zeitliche Maskierung

- Die Hörwahrnehmung beruht auf dem Mittelwert eines Zeitintervalls von ca. 30 ms
 - Ein lauter Ton beeinflusst die Wahrnehmung einer frequenzähnlichen Tons auch, wenn der zweite Ton in direkter zeitlicher Nachbarschaft liegt
 - Vorwärtsmaskierung: Nachfolgende Töne kaum wahrnehmbar
 - Rückwärtsmaskierung:
 - » Auch vorausgehende Töne betroffen (in kürzerem Zeitabstand)

