

Sounddesign



Das menschliche Gehör

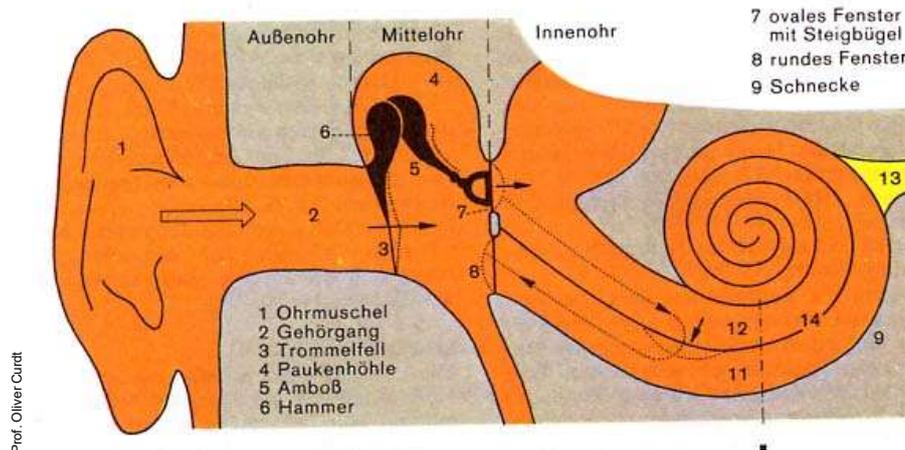
Prof. Oliver Curdt
Audiovisuelle Medien
HdM Stuttgart

Akustische Wahrnehmung



- „Das Auge führt den Menschen in die Welt, das Ohr führt die Welt in den Menschen ein.“
(Lorenz Oken, 1779 – 1851, Mediziner und Naturforscher)
 - Sehen: stark auf die Außenwelt gerichtet
 - Hören: nach Innen gerichtet, emotionaler als visuelle Wahrnehmung
- Ohr nicht „verschließbar“

Menschliches Ohr / Aufbau



Schallquellenwahrnehmung

- Ohrmuschel
 - äußerer Gehörgang
 - Mittelohr
 - Innenohr
 - Umwandlung in Nervenimpulse
 - Vergleich im Gehirn mit gespeicherten Reizmustern
 - Art des Schallereignisses (z. B. sinusähnlich, natürlich) ?
 - bekannt oder unbekannt ?
 - zusätzlicher visueller Eindruck ?

Tonhöhenwahrnehmung

- Reizung von Hörnerven auf bestimmten Teilen der Basilarmembran („Absoluthörer“)
 - ca. 18 000 Nervenzellen (Haarzellen)
- ca. 3000 verschiedene Tonstufen differenzierbar
- logarithmischer Zusammenhang bei der Tonhöhenempfindung
 - Schwingungsverhältnis der Oktave 2:1
- Hörbereich etwa 10 Oktaven
- Klavier: 7 Oktaven

Prof. Oliver Curtt

Lautstärkeempfindung

- Reaktion auf Druckschwankungen
- Hörschwelle $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ = 0 dB bei 1000 Hz
 - \cong 10 Watt Glühlampe aus 1000 km Entfernung
 - bei höherer Empfindlichkeit molekulares Rauschen der Luft hörbar
- Schmerzgrenze ab etwa 120 dB (\cong 20 Pa)
 - kurzzeitig sogar bis etwa 138 dB (\cong 160 Pa)
 - Sicherheitsmechanismus im Mittelohr
 - max. 194 dB, sonst unter Vakuum bei der Unterdruckwelle

Prof. Oliver Curtt

Lautstärkeempfindung

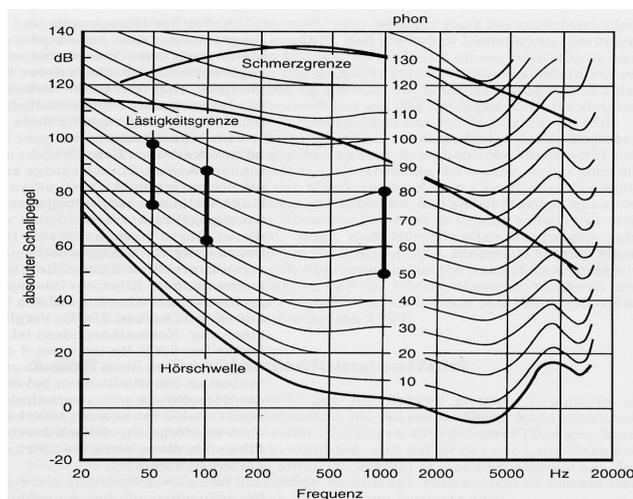
- Empfindlichkeitsbereich von 1 : 1 000 000 bei 1000 Hz (Schalldruckpegel)
 - ⇒ log. Maßstab (Weber-Fechnersches Gesetz)
 - ⇒ Bel bzw. Dezibel für „handliche“ Zahlenwerte

- Hörbereich ca. 16 Hz ... 20 kHz (altersabhängig)
 - ⇒ Hörschwelle rückt an Lästigkeitsgrenze besonders für hohe f

- Kurven gleicher Lautstärke (nach Fletcher und Munson)

Prof. Oliver Curtt

Kurven gleicher Lautstärke



Prof. Oliver Curtt

Quelle: Jürgen Meyer, Akustik und musikalische Aufführungspraxis

Lautstärkeempfindung

- größte Empfindlichkeit zwischen 2 und 5 kHz
⇒ Hinweis für Beschallung
- Phon-Skala = dB-Skala bei 1000 Hz
- Pegel von 80 dB ruft unterschiedlichen Lautstärkeindruck hervor, abhängig von f
- gültig für lang angehaltene Sinustöne von 0° Schalleinfallswinkel !!!
- Pegeländerungen \neq Lautstärkeänderung !!!

Prof. Oliver Curdt

Lautstärkeempfindung

- Wechselwirkung von Mix und Abhörlautstärke
- „gehörriichtige“ LautstärkeEinstellung bei Verstärkern,
 - Frequenzkorrektur bei leiser Wiedergabe

Prof. Oliver Curdt





Soundesignbeispiele



- Vertonung eines Werbefilms (90 sec)



- Vertonung eines Kurzfilms (3 min)



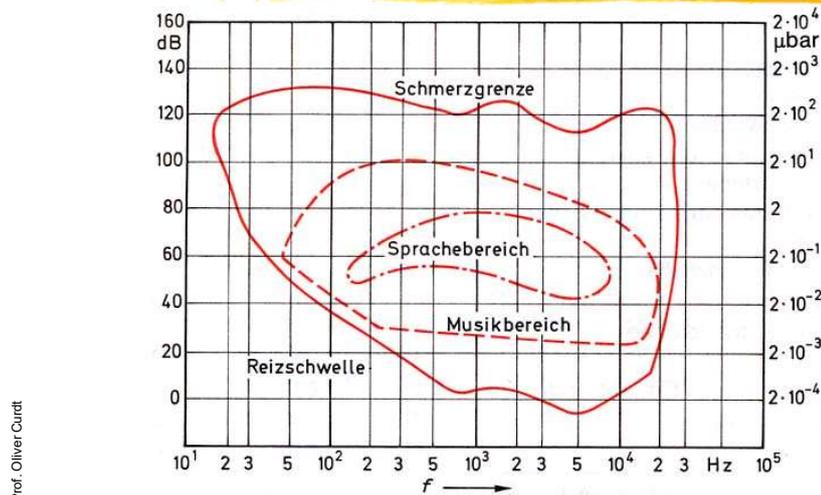
- 3 versch. Locations / Sportarten

- Kombination aus natürlichen Geräuschen und surrealer Tonkulisse

- Werbefilm Kamera (100 sec)



Hörbereich / Hörfeld



Prof. Oliver Curdtt

Bild 1.12

Fläche des Hörbereiches mit Sprach- und Musikbereich

Lautstärkeempfindung

- Übertragung vom Ohr zum Gehirn durch Reize im Nervensystem
 - Anzahl der Impulse maßgeblich für Lautstärke
 - ca. 1000 Impulse / Sekunde bei sehr großer Lautstärke
- ⇒ Verarbeitungsgeschwindigkeit im Gehirn !!!
- ⇒ quasi „digitale“ Übertragung durch Nervensystem

Prof. Oliver Curdtt

Lautstärkeempfindung

- Lautstärkeindruck wird geprägt von gesamter akustischer Energie (Leistung • Dauer), nicht etwa Leistung (Energie pro Zeiteinheit)
- Effekt bei Tondauer < 250 ms
- Unterschied in der Wahrnehmung:
 - kurzer Ton gegenüber Dauerton

Prof. Oliver Curtt

200 ms	100 ms	20 ms
-1 dB	-2,5 dB	-7 dB

Lautstärkeempfindung – Impulse

- 3 kHz-Ton in verschiedenen Längen
 - erst 1000 ms als Referenz, dann kürzerer Ton, jeweils zweimal vorgespielt
 - 1000 ms
 - 300 ms
 - 100 ms
 - 30 ms
 - 10 ms
 - 3 ms



Prof. Oliver Curtt

Lautstärkeempfindung

- Pegelerhöhung zu Beginn eines längeren Tones erhöht empfundene Lautstärke
 - +3 dB in den ersten 50 ms \Rightarrow 1 dB
 - Bedeutung von Einschwingvorgängen
 - prägnante Spielweise der Musiker
- Hinweise zum Mix ...
 - \Rightarrow Attack-time bei Kompressoren, Transientendesigner
 - \Rightarrow „Ziehen“ von Neueinsätzen
 - \Rightarrow Bedeutung von Impulsen

Prof. Oliver Curdt

Subjektive Wahrnehmung

- Lautstärkeempfindung
 - \Rightarrow Neumann Contest 1998, C 7 
- Klangerkennung ohne Einschwingvorgang
 - \Rightarrow Neumann Contest 1998, B 4 
 - \Rightarrow Neumann Contest 2003, B 8 

Prof. Oliver Curdt

Subjektive Tonhöhenwahrnehmung

- nach Roger Shephard (1964)
- „unendliche Tonleiter“
als akustische Täuschung
- Shepard-Risset-Glissando
 - Jean-Claude Risset (Komp.)
- The Piano Shepard Tone



Die unendliche Treppe von Escher

Prof. Oliver Curtt

Quelle: Peter Zastrow, Phonotechnik

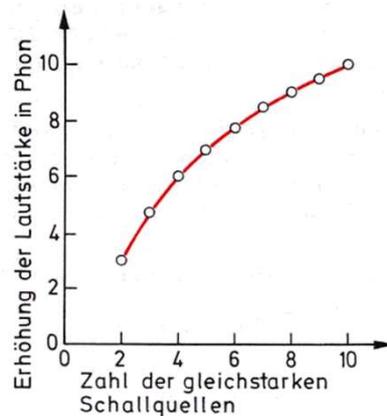
Addition von Schallquellen

- bei mehreren Schallquellen unterschiedlicher Lautstärke wird die Gesamtlautstärke im wesentlichen von der lautesten bestimmt

10 phon $\hat{=}$ Verdopplung der Lautheit

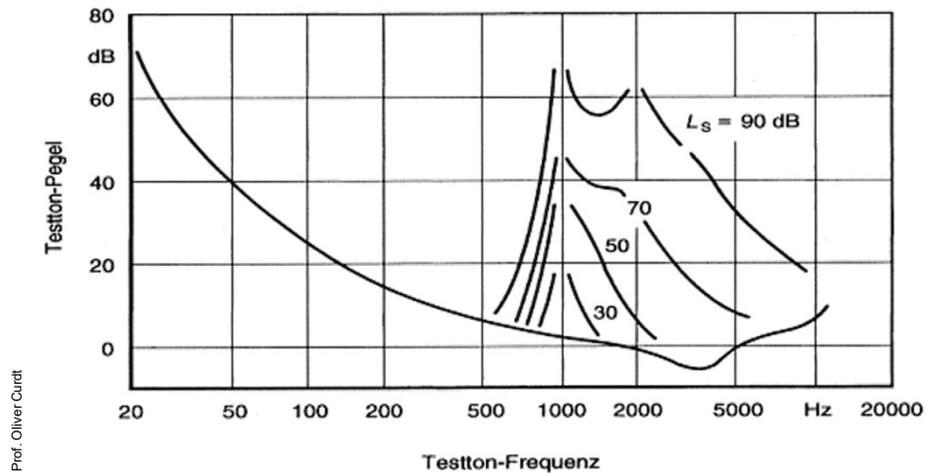


Pegelveränderungen werden im „Leisen“ sensibler wahrgenommen als im „Lauten“.



Prof. Oliver Curtt

Mithörschwelle



Verdeckungseffekte

- Schmalbandrauschen bei 1 kHz \rightarrow 70 dB
- Testfrequenzen 600, 800, 1000, 1300, 1700 und 2300 Hz in verschiedenen Lautstärken (75 dB, 55 dB und 35 dB)
- Versuch 1 (75 dB): alles hörbar
- Versuch 2 (55 dB): 1 kHz-Ton (fast) unhörbar
- Versuch 3 (35 dB): Töne mit 800, 1000, 1300 und 1700 Hz (fast) unhörbar



Verdeckungseffekte

- verdeckende Wirkung steigt mit zunehmender Lautstärke
 - ⇒ polyphone Musik bei leisem Spiel durchsichtiger
 - ⇒ Abhörlautstärke beim Mix

Verdeckungseffekte

- Mithörschwellen bei zeitlich begrenztem Störton
- Nachverdeckung (nahezu pegelunabhängig):
 - Erholungsphase des Ohres
 - ersten ms unverändert
 - linearer Abfall ... 200 ms
 - nach 200 ms ursprüngliche Hörschwelle
 - in der Praxis: Überlagerung mit Ausklingvorgängen und Nachhall

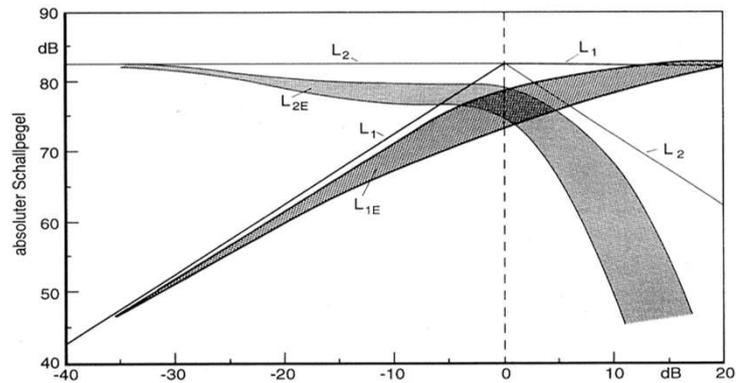
Verdeckungseffekte

- Vorverdeckung:
 - Gehör verarbeitet leisen Schall langsamer als lauterem (Lautstärke $\hat{=}$ Anzahl von Impulsen pro Zeiteinheit)
 - beschränkt auf Zeitbereich < 20 ms
⇒ Verdeckung von kurzen Ansatzgeräuschen

Verdeckungseffekte

- zeitliche Definition des Einschwingvorganges
 - mit zunehmender Dynamik 7, 10, 15 dB unter endgültigem Wert
 - ⇒ leise Töne werden später wahrgenommen
 - ⇒ Erfassen rhythmischer Strukturen
 - ⇒ Zusammenspiel verschiedener Instrumente

Gegenseitige Verdeckung



Prof. Oliver Cürdt



Sprache + Rauschen



Solo-Gesang + Big Band



Solo-Tp + Rhythm
+ Pos + Sax + Tp

Gegenseitige Verdeckung

- gegenseitige Verdeckung:
 - „Drosselung“ der Lautstärke
 - Empfundene Lautstärke eines 1 kHz-Tones (60 dB):
 - nur 50 dB bei 30 dB Rauschen
 - unhörbar bei 40 dB Rauschen !!!
- ⇒ Grundlagen für Datenreduktion !!!
- ⇒ Maskierung von Störgeräuschen

Prof. Oliver Cürdt

Differenztöne

- durch Überlagerung zweier Töne entsteht für das menschliche Gehör subjektiv ein dritter Ton
 - Beispiel: Neumann Contest 2003, C 11 
- Anwendungsbeispiele:
 - Orgelbau: günstige Abstimmung des 2. und 3. Teiltones erzeugt subjektiv wahrgenommenen Grundton (Gehör „ergänzt“)
 - ⇒ Einsparen des 16` bzw. 32`-Registers
 - Arrangements, Instrumentationen

Prof. Oliver Curtit

Richtungshören

- Horizontalebene (Seitenlokalisierung)
 - ⇒ sehr gut entwickelt
- Entfernung (Tiefenlokalisierung)
 - ⇒ weniger gut entwickelt
 - ⇒ nur wenige Ebenen diskret wahrnehmbar (ca. 3-4)
 - ⇒ Auswirkung auf Mix ... Pyramide
- Vertikalebene (Höhenlokalisierung)
 - ⇒ weniger gut entwickelt

Prof. Oliver Curtit

Richtungssshören

- möglich auf Grund von
 - Pegeldifferenzen
 - Laufzeitdifferenzen
 - Spektraldifferenzen

- Spektraldifferenzen
 - spektrale Veränderung des Signals abhängig vom Einfallswinkel durch Form von Ohrmuschel und äußerer Gehörgang
 - werden nicht bewusst wahrgenommen

Prof. Oliver Curtt

Richtungssshören

- Spektraldifferenzen
 - besonders wichtig, wenn Schallquelle in Medianebene
⇒ keine Pegel- und Laufzeitdifferenzen
 - Lokalisation: vorne – hinten – oben – unten
 - richtungsbestimmende Frequenzbänder:
⇒ „Blauertsche“ Bänder

Prof. Oliver Curtt

Richtungshören – Spektraldifferenzen

■ „Blauertsche“ Bänder

- vorne ⇒ 250 ... 500 Hz und 2,5 ... 4 kHz
- hinten ⇒ um 1 kHz und oberhalb von 12 kHz
- oben ⇒ um 8 kHz

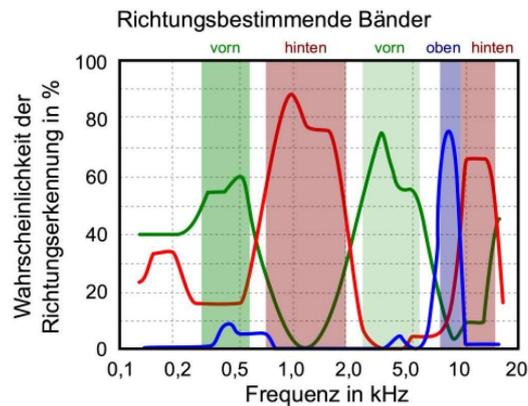
- funktioniert nur bei breitbandigen Signalen

- je größer die vorhandenen Erfahrungswerte, umso präziser die Lokalisation

Prof. Oliver Curtit

Quelle: Wikipedia, https://de.wikipedia.org/wiki/Blauertsche_Bänder

„Blauertsche“ Bänder



Prof. Oliver Curtit

Beispiel für Binauralisierung: Hörspiel „Rotkäppcheneffekt“

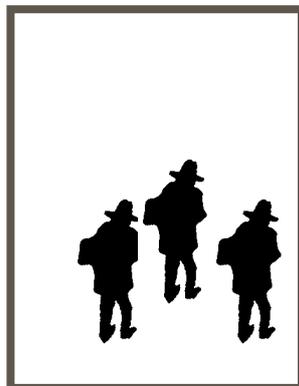


Signale mit gleichem Pegel



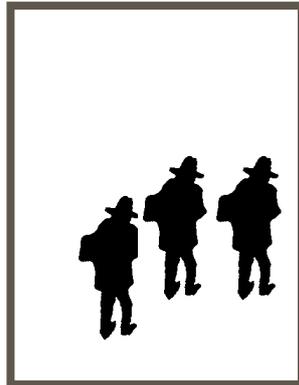
Prof. Oliver Curdt

Signale mit gleichem Pegel



Prof. Oliver Curdt

Signale mit gleichem Pegel



Prof. Oliver Curdt

Signale mit gleichem Pegel



Ablenkung der Sinne
beim Ballspiel
(ohne Ton)



Prof. Oliver Curdt

bei unterschiedlicher Räumlichkeit

Subjektive Wahrnehmung

- subjektiver Lautstärkeindruck bei gleichem Pegel:
 - Direktsignal 
 - räumliches Signal 

Präzedenzeffekt

- Gesetz der 1. Wellenfront ab 3 ms in Kombination mit dem Haas-Effekt
 - Schallquellenlokalisierung nach 1. Wellenfront (z. B. Direktschall ↔ Reflexionen, Schallrückwürfe)
 - bis + 10 dB bei 5 ... 30 ms Differenz

Cocktailpartyeffekt

- binaurale Verdeckung:
 - Testschall und Störschall aus unterschiedlichen Richtungen
 - Verdeckung weniger stark als bei monaural (1 Ohr oder identisch an beiden Ohren)
 - selektives Herausheben bei mehreren Schallquellen

- ⇒ Panorama im Mix ...

Prof. Oliver Curdt

Cocktailpartyeffekt

- ⇒ Musiker beim Ensemblespiel
 - Konzentration
 - Übung
 - Klangvorstellung

- Voraussetzungen:
 - Pegel 10 ... 15 dB über Mithörschwelle (wegen Ortung)

Prof. Oliver Curdt

Präzedenzeffekt

- 16 ... 18 dB bzw. 1 ... 1,5 ms für max. Auslenkung
 - bei Laufzeitunterschieden > 2 ms nur noch Klangfarbenveränderungen und Lautstärkeerhöhungen, ggf. räumlicher Eindruck
 - Echoschwelle ab etwa 30 ... 60 ms erreicht
 - Abhängig von Signalstruktur, Verdeckungseffekte
 - Im Übergangsbereich zur Echoschwelle Ausdehnung der Phantomschallquelle häufig über die komplette Lautsprecherbasisbreite.

Prof. Oliver Curt

Empfindlichkeit bei Vibrato

- periodische Änderungen der Frequenz oder Amplitude (Vibrato)
 - ⇒ Sänger, Bläser, Streicher, ...
- Vibrato < 5 Hz
 - „Wimmern“, zeitlicher Verlauf hörbar
- Vibrato > 6 Hz
 - einheitliche Tonhöhe (Mittenfrequenz)
 - einheitliche Lautstärke (Maximalwert)
 - Gefühl einer inneren Bewegung
 - mehr Volumen

Prof. Oliver Curt

Empfindlichkeit bei Vibrato

- Vibrato 10 ... 15 Hz (Amplitude)
 - ⇒ Rauigkeit im Klang, abhängig von
 - Grundtonfrequenz
 - Schwankungsfrequenz
 - relative Stärke der Amplitudenschwankung
 - ⇒ Mikrofonabstand !!!
- Problematik von Vibrato bei Aufnahmen
 - dichte Mikrofonierung
 - Klangvolumen, Auffälligkeit

Prof. Oliver Curtt

Akustische Wahrnehmung

- Vielzahl akustischer Reize
 - aus allen Richtungen – kein „Blickwinkel“
 - ⇒ wichtig für Raumeindruck bei Kopplung mit Bild !!!
 - ⇒ selektives Hören
 - ⇒ viel unbewusste Wahrnehmung
 - allerdings gilt: unbewusst ≠ unwichtig !!!
 - wecken von **Emotionen** und **Assoziationen**
 - Veränderungen, Bewegung, Dynamik
 - ⇒ keine Statik

Prof. Oliver Curtt

Akustische Wahrnehmung

- Rückschlüsse auf die Schallquelle
 - Größe, Beschaffenheit
 - Anregung (Art, Tempo, Stärke)
 - Entfernung, Raum, akustische Perspektive
 - Charakter, Stimmungslage von Personen
 - Korrespondenz von Inhalt und Tonfall

Akustische Wahrnehmung

- Hören als subjektive Erfahrung
 - mit Worten nur bedingt beschreibbar
- Zeitlupe selten hilfreich ↔ visuell

Akustische Wahrnehmung



- Einfluss von Hörsinn und Gleichgewichtsorgan auf
 - Körperhaltung, Muskelspannung
(z. B. spannende Erzählung)
 - Motorik (Mitwippen bei rhythmischer Musik)