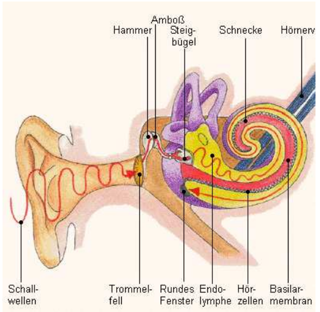
Gehörwahrnehmung: Agenda

- Schall und Schallausbreitung

- Aufbau des Gehörs
- Außenohr, Mittelohr, Innenohr
- Frequenzanalyse in der Cochlea

- Hörschwelle, Hörbereich, Lautheit
- Tonhöhe, Lautstärke, Klangfarbe
- Klangfarbe und Spektren
- Lärmempfindung, Schädigungen

- Sprache, Vokalartikulation



Motivation

wozu die Gehörwahrnehmung untersuchen?

- Forschung / Erkenntnisgewinn

  möglichst optimale Verfahren zur:

- Aufzeichnung / Speicherung / Wiedergabe von Audio
- so gut wie nötig - aber nicht besser (!)

- psychoakustische Verfahren, etwa MP3-Kompression
- bessere Algorithmen für Musik und Musikproduktion
- Raumsimulation für Spiele oder virtuelle Realität

- möglichst effiziente (low-level) Sprachverarbeitung
- medizinische Anwendungen, vor allem Hörgeräte

Schall

physikalischer Schallbegriff:

- alle elastischen Schwingungen eines Materials
- im allg. Fall longitudinal und transversal
- aber in Gasen (Luft) nur longitudinal (=Druckschwingungen)

- Schallgeschwindigkeit ca. 340 m/s in Luft
- Schallintensität lokale Druckänderung

Luftdruck auf Meereshöhe	1 bar	= 10.000 Pa
Schmerzschwelle	1 mbar	= 10 Pa
wahrnehmbare Druckänderung	10E-9 bar	= 0.00001 Pa

- Ohr hat optimale Empfindlichkeit
- weitere Steigerung: Wahrnehmen der Molekularbewegung

Schall: Leistung, dB

- Kenngrößen des Schallfelds: Druckamplitude P bzw. Intensität I
- Gesamtleistung: Integral der Intensität über eine Oberfläche
- Lautstärke (Intensität): dB

L / dB := 10 log10(I / I_ref)
:= 20 log10(P / P_ref)

P_ref := 0.00002 Pa

- alternativ: dB als Maß für das Verhältnis (p1/p2)

20 dB	zehnfacher Schalldruck
6 dB	doppelter Schalldruck
-6 dB	halber Schalldruck

Quelle	Leistung (typ.)
Sprache	10 µW
Geige	1 mW
Lautsprecher	100 W

Schall: Phon

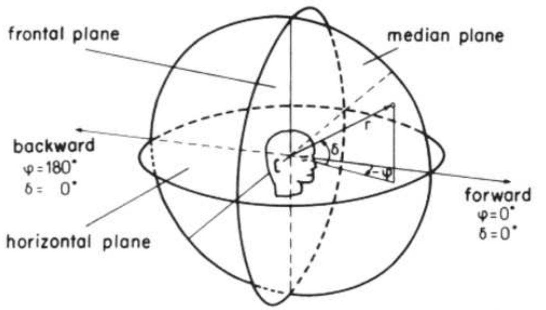
Phon: hörbezogene Einheit der Schallintensität
Intensität eines gleichlaut empfundenen Referenztons
logarithmische Skala notwendig (13 Größenordnungen)

```
L/phon := 10 * log10( I / I0 )
```

`I0` := Intensität der Hörschwelle bei 1000Hz
:= 10E-16 W/cm²

Quelle	Phon	
Hörschwelle	0	`(I = I0)`
Flüstern	10	`(I = 10*I0)`
Sprache	50	`(I = 100000*I0)`
laute Radiomusik	80	`(I = 100000000*I0)`
Disco,Preßlufthammer	130	(Schmerzschwelle)

Koordinatensystem



[Blauert]

Figure 1.4
A head-related system of coordinates used in auditory experiments; r is distance, φ is the azimuth, and δ is the elevation.

- sphärische Koordinaten sinnvoll
- bei Bedarf Umrechnung Welt/Kopf-Koordinaten

Schall: Nah- und Fernfeld

[Blauert]

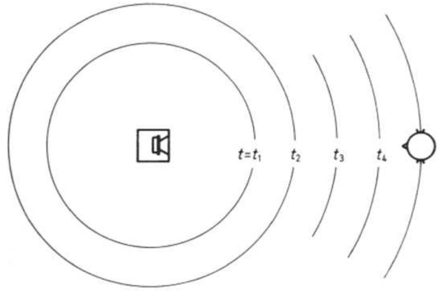


Figure 1.14
Any pulsating sound source that is small compared with the wavelength generates spherical waves at a moderate distance. As the distance is increased, the spherical waves become more and more plane.

- relative Größe / Entfernung von Quelle und Hörer

Schall: Nah- und Fernfeld

[Blauert]

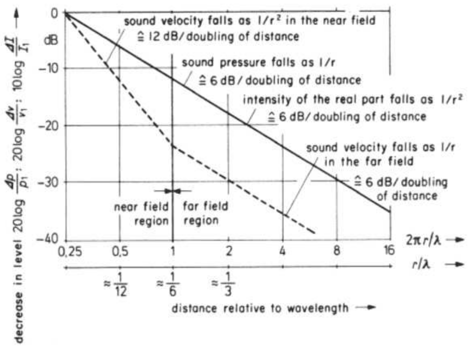


Figure 1.13
Pressure, velocity, and intensity of the sound field near to and distant from a spherical radiator of the zeroth order.

- typischer Abfall mit 6dB bzw. 12 dB / Entfernung

Schall: Beugung an einer Kugel

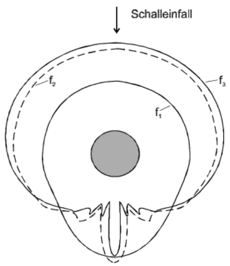


Abbildung 2.4: Beugungsbild bei Schallbeugung an einer Kugel für unterschiedliche Frequenzen, wobei $f_1<f_2<f_3$ [Kollmeier]

Bei niedrigen Frequenzen stellt die Kugel fast kein Hindernis dar, während bei hohen Frequenzen der Grenzfall der **geometrischen Akustik** bereits angenähert ist, d. h eine starke akustische Schattenwirkung und eine geringe seitliche Streuung. Interessanterweise entsteht immer auf der genau der Schalleinfallsrichtung abgekehrten Seite („auf der akustischen Achse“) ein Schalldruckmaximum, das man sich nach dem Babinetschen

Raumwahrnehmung

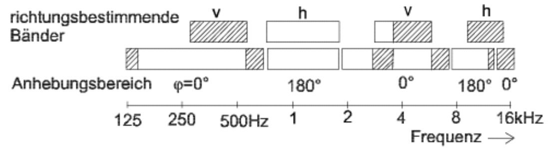


Abbildung 2.2: Richtungsbestimmende Bänder nach Blauert (aus Blauert, J. : Räumliches Hören. Nachschrift. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1985) Die erste Zeile gibt den Frequenzbereich an, bei dem in psychoakustischen Tests die Anwesenheit (schraffiert) oder Abwesenheit (nicht schreffiert) einer spektralen Anregung zu einer Lokalisation nach vorne („v“) bzw. hinten („h“) führt. Die zweite Spalte zeigt analoge Auswertungen aus Übertragungsfunktionen für Schalleinfall von vorn ($\varphi = 0°$) bzw. von hinten ($\varphi = 180°$). [Kollmeier]

Raumwahrnehmung

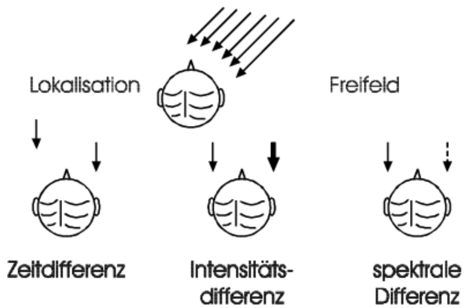


Abbildung 5.11: Physikalische Merkmale für die Lokalisation [Kollmeier]

- für 3D-Audio müssen alle Effekte beachtet werden
- zusätzlich Doppler-Effekt für bewegte Quellen

Raumwahrnehmung: Cone of confusion

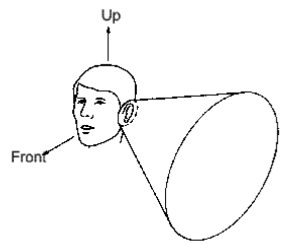
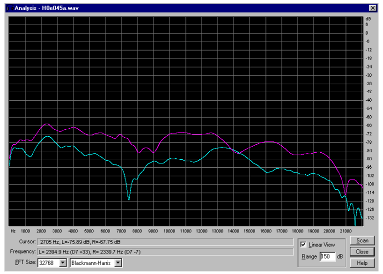


Abbildung 2.1: Cone of confusion, d.h. Fläche im dreidimensionalen Raum, auf der sämtliche Schalleinfallsrichtungen dieselbe interaurale Zeit- und Pegeldifferenz aufweisen (aus Moore, B. C. J.: Perceptual Consequences of Cochlear Damage. Oxford University Press, Oxford 1995) [Kollmeier]

Raumwahrnehmung: HRTF

von vorne



45 Grad seitlich

Head-related transfer function

- individuelle Kopf (Außenohr)- Übertragungsfunktion
- mißt Intensität des Schalls am Trommelfell, links/rechts separat
- außerordentlich komplexe Winkel/Frequenzabhängigkeit
- Beispieldaten: sound.media.mit.edu/KEMAR.html

absolute Hörschwelle

[Terhardt]

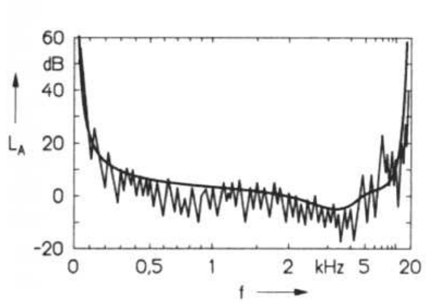


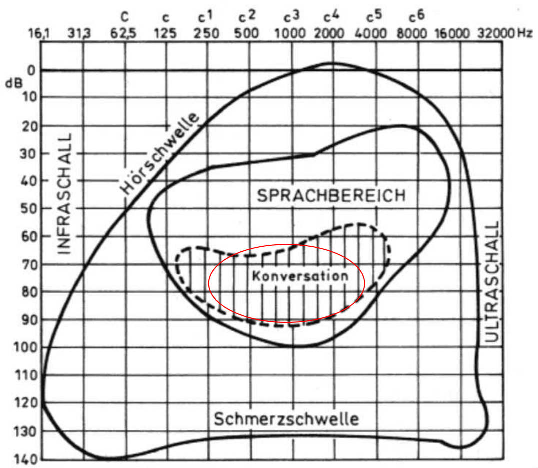
Abb. 9.11. Monaurale Absoluthörschwelle für Sinustöne. Glatte Kurve: Mittelwert des Schwellenpegels L_A von normalhörenden Personen. Gezackte Kurve: Mit der Methode des pendelnden Regelns (Békésy tracking) gemessen (25jähriger Mann, rechtes Ohr). Abszisse: Tonfrequenz, SPINC-skaliert; Ordinate: Schallpegel

- geringe Empfindlichkeit bei tiefen und hohen Tönen
- maximale Empfindlichkeit zwischen 2..5 KHz

=> Loudness-Kurven

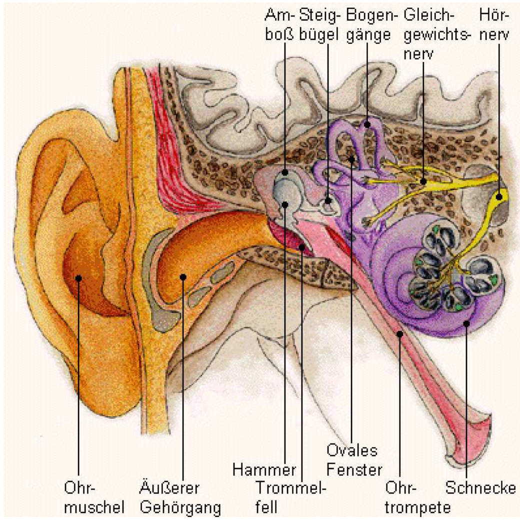
Hörbereich und Sprachbereich

[ct 10/89]



gute Sprachverständlichkeit im "Hauptsprachbereich" (ca. 300-3500 Hz)

Ohr: Schema



drei Untereinheiten:

- Außenohr
- Mittelohr
- Innenohr

bzw.:

- Verstärkung, Delay
- Impedanzwandlung
- Frequenzanalyse

[glasklar Mensch 3D]

Ohr: Schema

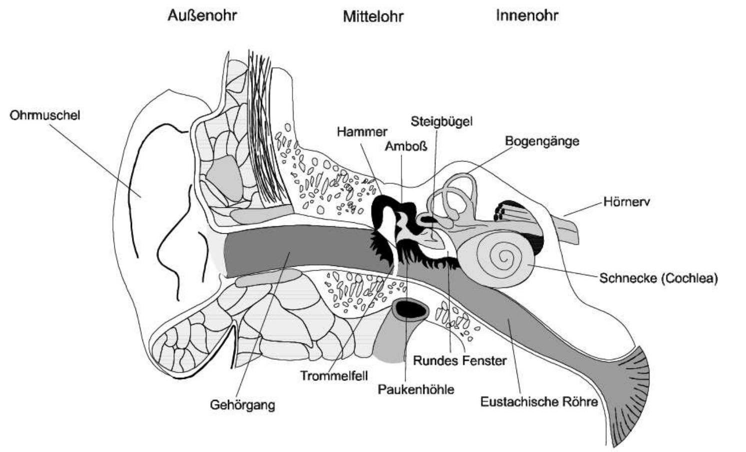


Abbildung 1.1: Übersicht über den Aufbau des Gehörs

[Kollmeier]

Gehör: Modell der Signalverarbeitung

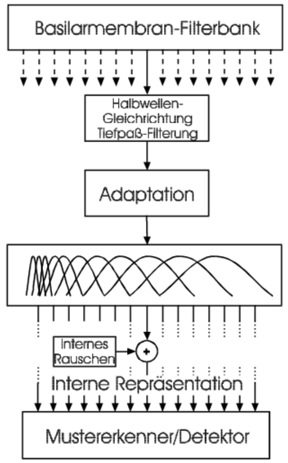


Abbildung 1.4: Modell der effektiven Signalverarbeitung nach Dau et al. (1997)

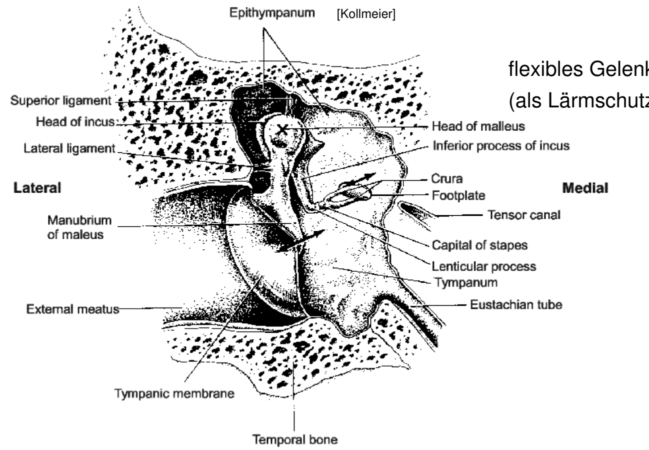
[Kollmeier]

Gehör: Teile, Funktion, Störungen

Anteil des Gehörs	Funktion	Störung	Audiologische Diagnostik
Außenohr	Richtungsabh. Filterung / Bündelung	Ohrmißbildung	klinisch
Mittelohr	Impedanztransformation Luft → Wasser	Schalleitungs-Schwerhörigkeit (z.B. Erguß, Otitis media)	Otoskopie Impedanzaudiometrie Stimmgabeltest
Innenohr	Umwandlung Wasserschall → Nerven-erregung, Frequenz-Orts-Transformation	Cochleäre Schwerhörigkeit (z.B. Lärm, Alter, ...)	Ton-Audiogramm Otoakustische Emissionen Überschwellige Tests
Hörnerv / Hirnstamm	Kodierung akustischer Information, Auswertung interauraler Unterschiede, Modulations-Kodierung	Retrocochleäre (neurale) Schwerhörigkeit, Lokalisationsstörung	Hirnstamm-Audiometrie Sprachaudiometrie Bildgebende Verfahren
Cortex	Sprachwahrnehmung, komplexe Verar-beitung	zentrale Hörstörungen (z.B. Aphasie)	Zentrale Sprachtests

[Kollmeier]

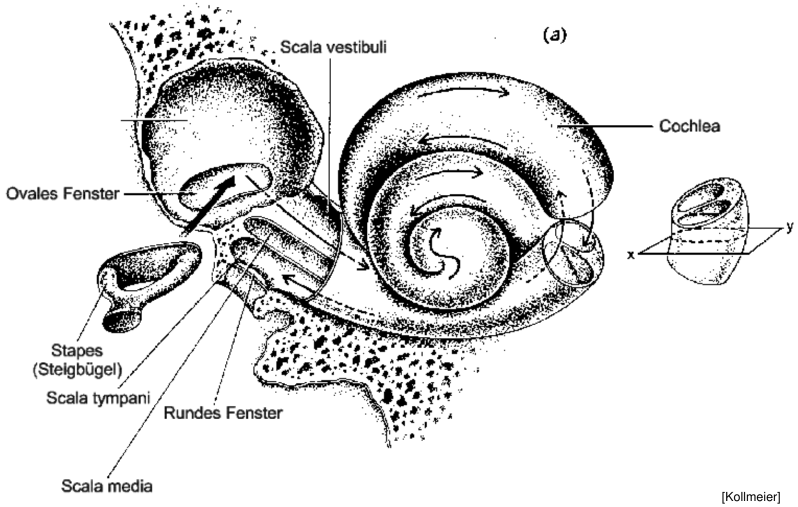
Mittelohr



flexibles Gelenk
(als Lärmschutz)

- Verstärkung (Impedanzwandlung), Übergang Luft nach Wasser
- Trommelfeld ca. 20fache Fläche des ovalen Fensters

Innenohr: Aufbau und Cochlea



[Kollmeier]

Innenohr: cortisches Organ

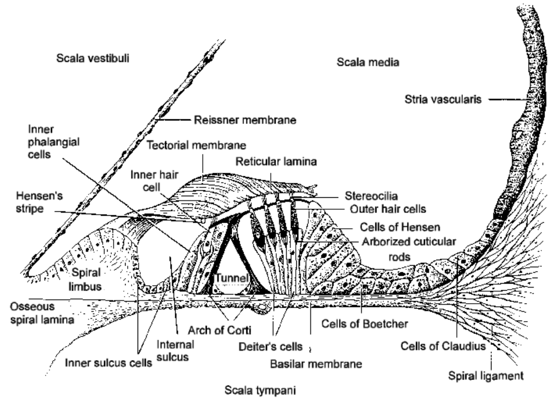
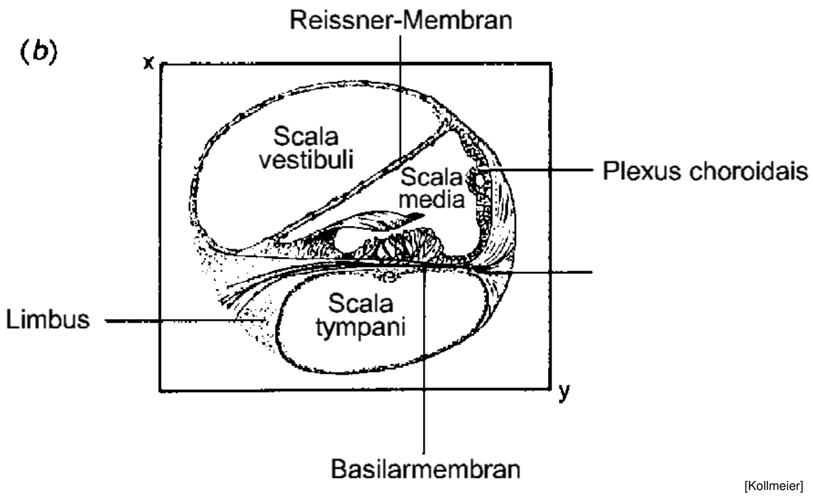


Abbildung 3.7: Schematische Darstellung des Cortischen Organs (aus Gulick, W. L., Gescheider, G. A., Frisina, R. D.: Hearing. Oxford University Press, Oxford 1989)

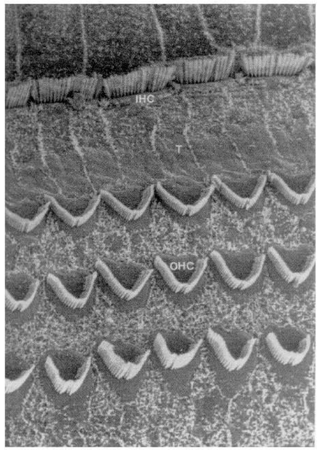
[Kollmeier]

Innenohr: cortisches Organ



[Kollmeier]

Innenohr: Haarzellen



innere Haarzellen
"Sensoren"

äußere Haarzellen
"Aktoren"

Abbildung 3.8: Detailansicht der Innenohr-Anatomie, IHC = Innere Haarzellen, OHC = Äußere Haarzellen (aus Dallos, P., Popper, A. N., Fay,R. R. (Hrsg): The Cochlea. Springer Verlag, New York 1996)

[Kollmeier]

Cochlea und Nerven

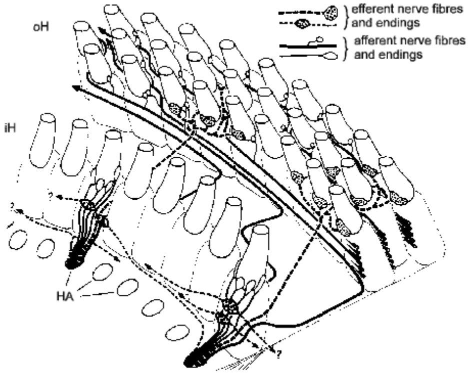


Abbildung 4.5: Schematische Ankopplung der Haarzellen an den Hörnerven (oH: äußere Haarzellen, iH: innere Haarzellen) (aus Luce, R.D.: Sound and Hearing. Lawrence Erlbaum Verlag, New Jersey 1993) [Kollmeier]

Cochlea: Halbwellengleichrichtung

[Kollmeier]

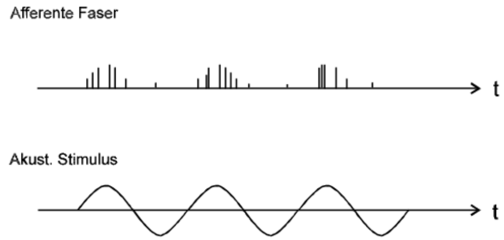


Abbildung 4.6: Halbwellengleichrichtung bei der Kodierung eines akustischen Stimulus in der Haarzelle bzw. im nachgeschalteten auditorischen Nerv (schematisch). Dagestellt ist die Aktivität des Hörnerven, die nur während der positiven Halbwellen des Eingangs-Stimulus auftritt

- innere Haarzellen reagieren nur auf Dehnung
- Nerven-Spikes nur für positive Halbwellen

Basilarmembran

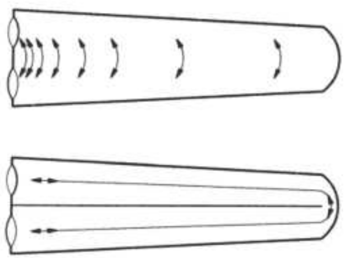


Abb. 9.9. Wenn die Basilarmembran nicht vorhanden wäre (obere Skizze, ausgestreckter Cochleakanal), würde die Flüssigkeitsbewegung sich bei Auslenkung des ovalen Fensters wegen der inneren Reibung auf den basalen Teil (links) konzentrieren. Wenn dagegen der Kanal über einen Teil seiner Länge durch eine elastische Membran unterteilt wird (unten), wird bei sehr langsamer Auslenkung die Strömung um die Membran herum gezwungen, während rasche Auslenkung wegen der Massenträgheit der bewegten Flüssigkeitssäule zur Querauslenkung der Membran führt, und zwar umso weiter links, je rascher die Auslenkung erfolgt

[Terhardt]

- mechanische Lösung zur Frequenzanalyse

Haarzellen: otoakustische Emission

[Kollmeier]

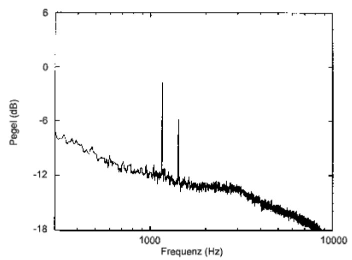


Abbildung 3.17: Gemitteltes Leistungsspektrum bei der Bestimmung einer spontanen otoakustischen Emission, die durch vereinzelte Spitzen im Spektrum gekennzeichnet ist. (aus Uppenkamp, S.: Grundlagen und Anwendung der otoakustischen Emissionen zur objektiven Hörprüfung. Dissertation, Universität Göttingen 1992)

- Haarzellen sind aktive Stellglieder
- harmlose spontane Emission, bis zum Tinnitus

Ohr und Hörbahn

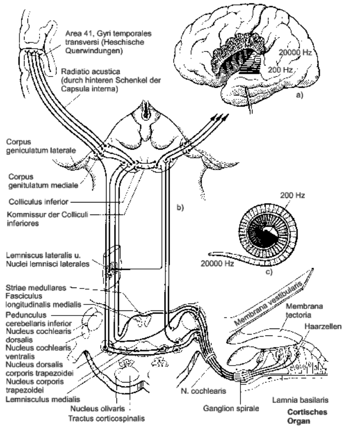
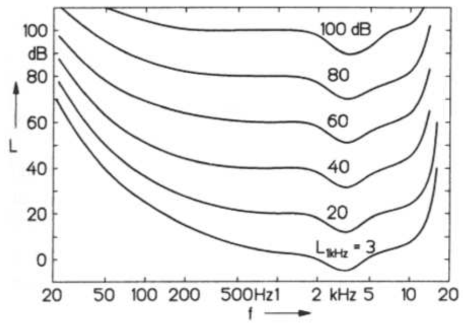


Abbildung 4.12: Übersicht über die Anatomie der Hörbahn (aus Duus, P.: Neurologisch-topische Diagnostik. Thieme Verlag, Stuttgart 1995).

[Kollmeier]

Lautheit



[Terhardt]

Abb. 10.8. Kurven gleicher Lautheit von Sinustönen im ebenen Schallfeld: Schallpegel L eines Sinustones (Ordinate), welcher die gleiche Lautheit hervorruft wie ein 1 kHz-Ton mit dem angegebenen Pegel, in Abhängigkeit von der Tonfrequenz f (Abszisse)

- bei leisen Tönen schwache Wahrnehmung von Höhen/Bässen
- Empfindlichkeitsmaximum bei ca. 3 KHz
- "loudness"-Regler am Hifi-Verstärker zur Kompensation

Inter-Spike Histogramme

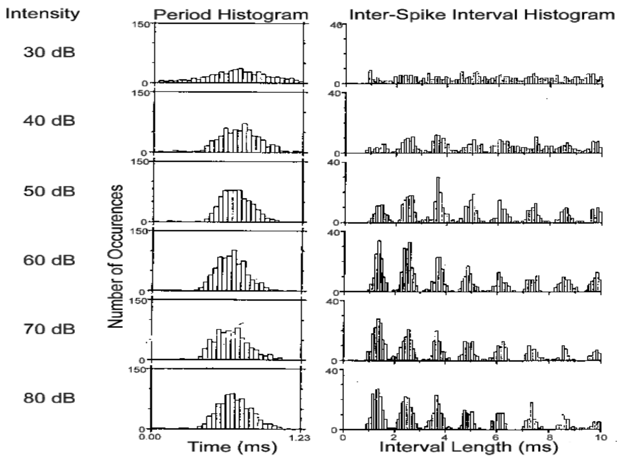


Abbildung 4.9: Periodenhistogramm und Inter-Spike-Intervall-Histrogramm für eine Hörnervenfaser bei systematischer Erhöhung der Intensität eines sinusförmigen Reizes von ca. 800 Hz von 30 dB auf 80 dB.

[Kollmeier]

Tuningkurven: Schema

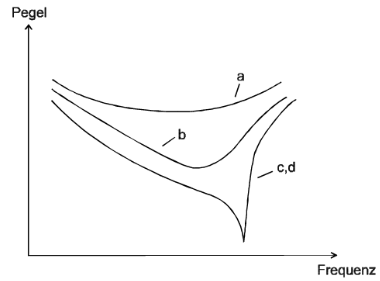
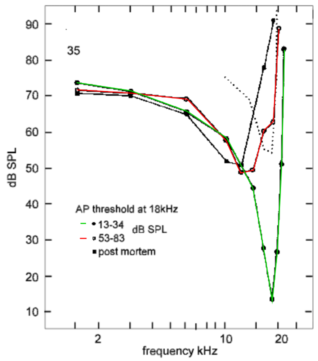


Abbildung 3.6: Schematischer Verlauf von „Tuning-Kurven“, d. h. des Pegels eines Sinustons, der zum Erreichen einer bestimmten Auslenkung der Basilarmembran (bzw. zu einer bestimmten Erhöhung der Nervenfaser-Feuerrate gegenüber der Spontanrate) notwendig ist, als Funktion der Frequenz. Dargestellt sind schematisch die Ergebnisse für (a) optisch/stroboskopisch (v. Békésy), (b) Mößbauertechnik, (c) neuere Laser-Interferometrische Messungen, (d) neurophysiologisch

[Kollmeier]

Tuningkurven: gemessen



- hohe Güte
- keineswegs passiv
- aktive Regelung

Abbildung 4.7: Schematische Tuning-Kurve (Reizintentsität an der Schwelle als Funktion der Frequenz des Stimulus) für zwei verschiedene sensitive Hörnervenfasern sowie für den Zustand nach abgestellter Blutzufuhr (post mortem). (aus Moore, B. C. J.: Frequency Selectivity in Hearing. Academic Press, London 1986)

[Kollmeier]

Maskierung

Mithörschwelle eines Sinustones bei Verdeckung durch Schmalbandrauschen. In Abb.11.4 sind drei Mithörschwellen von Sinustönen verdeckt durch Schmalbandrauschen der angegebenen Mittenfrequenzen dargestellt [1125]. Die Fourier-Spektren der maskierenden Schmalbandgeräusche sind durch Verwendung von Bandpaßfiltern hoher Flankensteilheit auf Bandbreiten von ungefähr 100, 160 und 700 Hz beschränkt [CD 2].

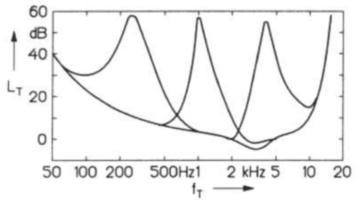


Abb. 11.4. Mithörschwellen von Sinustönen bei Verdeckung durch frequenzgruppenbreite Schmalbandrauschen mit den Mittenfrequenzen 250, 1000, 4000 Hz und dem Maskiererpegel $L_M = 60$ dB. Nach [1125]

[Terhardt]

- Frequenzanalyse in der Cochlea nicht perfekt
- laute Töne verdecken benachbarte leisere
- Ausnutzung in psychoakustischen Modellen (MiniDisc, MP3, usw)

Tuningkurven: Katzen

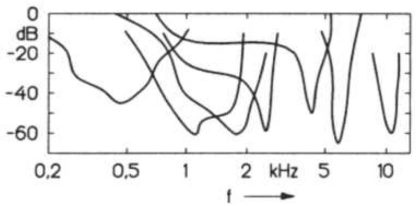
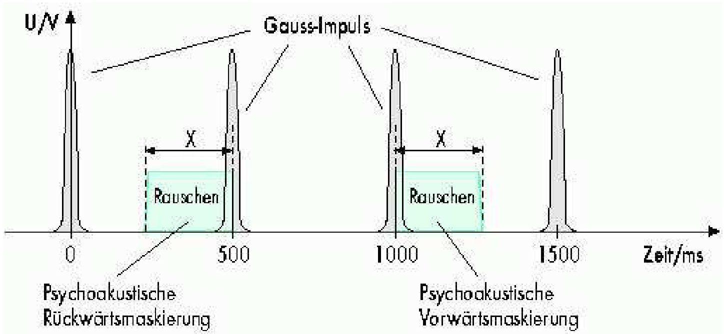


Abb. 9.10. Tuningkurven, gemessen an anästhesierten Katzen. Jede Kurve gehört zu einer anderen Faser des akustischen Nerven. Die Ordinate gibt denjenigen Schallpegel eines Sinustones an, welcher zur Erregung einer festen Anzahl von Aktionspotentialen pro Zeiteinheit erforderlich ist. Abszisse: Frequenz des Sinustones. Nach Kiang [501]

[Terhardt]

- hohe Güte der Frequenzselektion
- "aktive" Frequenzbereiche der Fasern überlappen
- menschliches Gehör entsprechend

Maskierung: temporal



[ct]

- laute Töne verdecken spätere leisere Töne
- und frühere leisere Töne (!!)
- Ausnutzung in psychoakustischen Modellen (MiniDisc, MP3, usw)

Frequenzauflösung

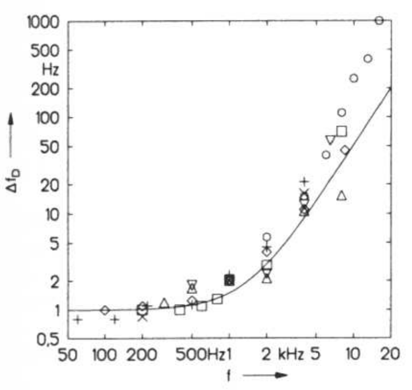


Abb. 9.19. Meßergebnisse zum eben wahrnehmbaren Frequenzunterschied zwischen aufeinanderfolgenden Sinustönen (Ordinate, Δf_D) in Abhängigkeit von der Tonfrequenz f (Abszisse). Kreise: Henning [434]; Quadrate: Wier et al. [1064]; aufwärtsgerichtete Dreiecke: Fastl [280]; abwärtsgerichtete Dreiecke: Moore & Glasberg [645]; Rauten: Walliser [1040]; x: Rosenblith & Stevens [795]; +: Harris [412]. Die durchgezogene Kurve gibt die angenäherte Repräsentation der Meßergebnisse durch (9.70) an

[Terhardt]

- bis 1 Hz Frequenzauflösung (bei geübten Personen)

Tuningkurven vs. Tonhöhe

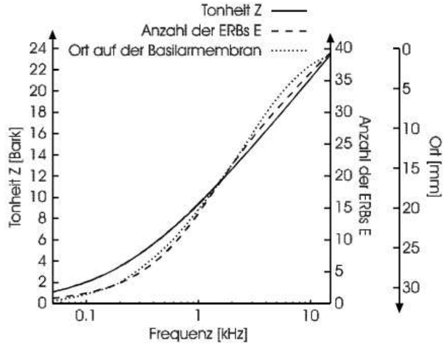


Abbildung 5.3: Mel-Skala, Bark-Skala, ERB-Skala

- wahrgenommene Tonhöhe korrespondiert mit Position
- passende Skalen

Frequenzgruppen

Tabelle 9.1: Frequenzgruppen nach Zwicker 1982

z/Bark	f_u/Hz	f_o/Hz	Δf_G/Hz	f_m/Hz
0	0	100	100	50
1	100	200	100	150
2	200	300	100	250
3	300	400	100	350
4	400	510	110	450
5	510	630	120	570
6	630	770	140	700
7	770	920	150	840
8	920	1080	160	1000
9	1080	1270	190	1170
10	1270	1480	210	1370
11	1480	1720	240	1600
12	1720	2000	280	1850
13	2000	2320	320	2150
14	2320	2700	380	2500
15	2700	3150	450	2900
16	3150	3700	550	3400
17	3700	4400	700	4000
18	4400	5300	900	4800
19	5300	6400	1100	5800
20	6400	7700	1300	7000
21	7700	9500	1800	8500
22	9500	1200	2500	10500
23	12000	15500	3500	13500
24	15500			

[Zoelzer]

Tonhöhenwahrnehmung?

- Messungen
- vgl. Tuningkurven

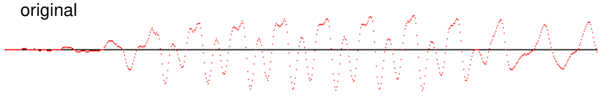
- tiefe Frequenzen:
  ca. 100 Hz Bandbreite
- hohe Frequenzen:
  log. Breite der Gruppen

=> "Bark" Frequenzskala

- Ausgangspunkt für
  psychoakustische Modelle

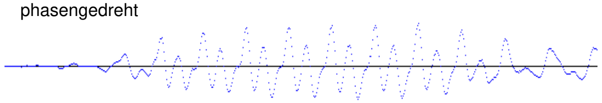
Phasen: Hilbertfilter

original



Sprachsample "Oberseminar"

phasengedreht



[vdHeide]

- Ohr unempfindlich gegen Phaseninformation
- verändertes Signal klingt einzeln (vollkommen) gleich
- erst bei Interferenzen mehrerer Signale hörbar
- Phasengang vieler Systeme (Telefon!) extrem schlecht

Klangfarben

akustisches Signal mit vielen Teiltönen:

- keine Wahrnehmung aller Einzeltöne

- sondern Zuordnung zu Quellen/Instrumenten
- tiefste Frequenz bestimmt die wahrgenommene Tonhöhe
- Obertonspektrum identifiziert die Quelle
- mit Eigenschaft "Klangfarbe"

- Klangfarbe auch stark vom "attack" des Klangs abhängig
  (=> Synthesizer mit kurzen Samples plus Schleifen)

- entsprechend automatische "Sprecheridentifikation"
- komplexe Zusammenhänge für Akkordwahrnehmung

Klangfarben: Beispiele

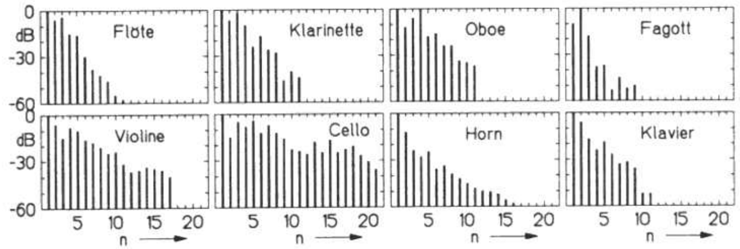


Abb. 8.12. Teiltonspektren verschiedener Musikinstrumente schematisch

[Terhardt]

- Streicher mit reichem Obertonspektrum
- Flöten mit sehr reinen Tönen (insb. Blockflöte)
- Klavier stark anschlag- und tonhöhenabhängig

- aber auch "Attack-Phase" maßgeblich für Klangwahrnehmung

Klangfarben: Spektrogramm

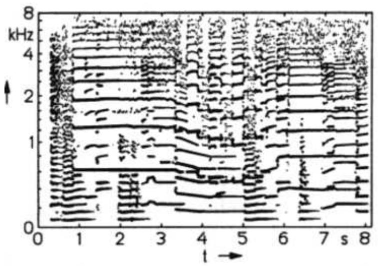
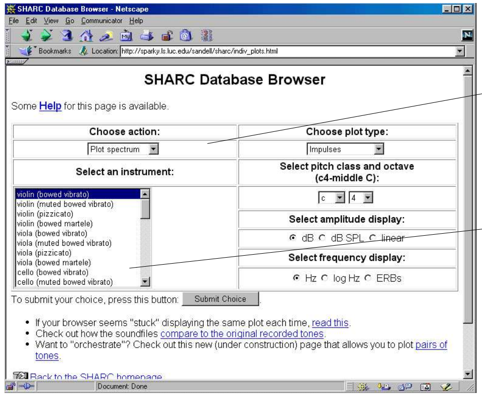


Abb. 1.9. Beispiel eines Teiltonzeitmusters. Ausschnitt einer mehrstimmigen Blasmusikdarbietung. Die hauptsächlich beteiligten Instrumente sind Trompete, Posaune, Klarinette und Tuba. Die instantane Teilton-Amplitude wird durch die Strichstärke angedeutet. Ordinate Bark-skaliert. Nach [969]

[Terhardt]

Abb. 1.10. Transkription der Trompeten- und der Tuba-Stimme des Musikbeispiels, dessen Teiltonzeitmuster in Abb. 1.9 dargestellt ist

Klangfarben: SHARC-Datenbank

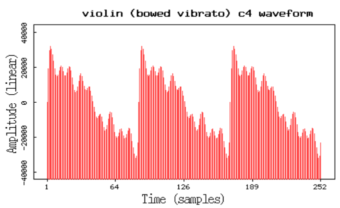


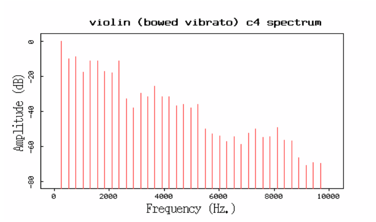
Samples oder
zugehörige Spektren

viele Instrumente
diverse Tonhöhen
Spieltechniken

- www.sparky.ls.luc.edu/sandell/sharc/indiv_plots.html
- schönes Web-Interface zu Samples und Spektren
- kein Zusammenhang mit den "SHARC" Signalprozessoren

Klangfarben: Violine



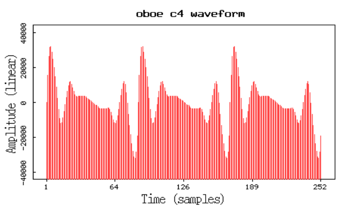


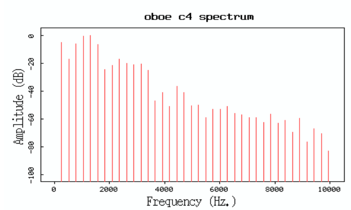
[SHARC database]

- Sägezahnform: reiches Obertonspektrum
- auch viele gerade (angenehme) Obertöne

- typisch für Streichinstrumente

Klangfarben: Oboe





[SHARC database]

- irreguläre Wellenform
- außergewöhnlich reiches Obertonspektrum

- andere Blasinstrumente mit weit weniger Obertönen
- z.B. Blockflöten fast reine Sinusklänge (plus Anblasgeräusche)

Sprache

"niedere" Aspekte:

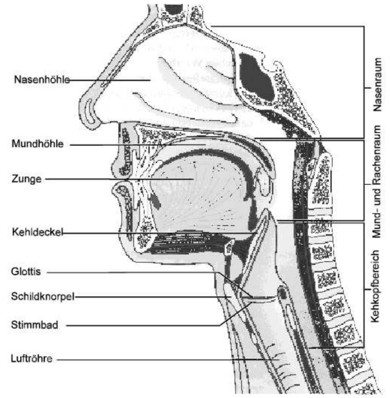
- Sprachsignale, Spektren, Formanten, ...
- Trennung stimmhafte / stimmlose Laute

- Synthese / Analyse von Sprachsignalen
- low-bitrate Kodierung (z.B. für Mobiltelefone)

"höhere" Sprachverarbeitung:

- NATS (von Hahn, Menzel)
- WSV (Habel, Freksa)

Sprache: Vokaltrakt



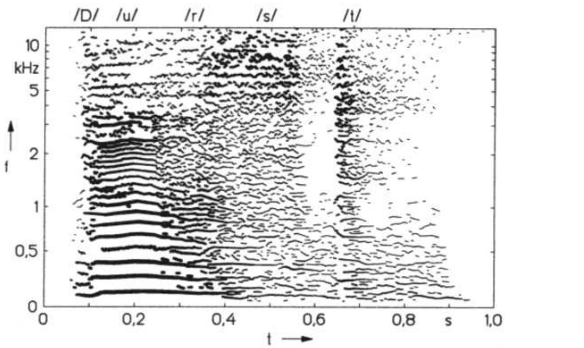
- Glottis, Stimmband
- Klang zusätzlich durch Zungen-/Lippenstellung

- typische Spektren:
  Mann / Frau / Kind
  normal / erregt

Abbildung 6.1: Vokaltrakt im Querschnitt (schematisch) (aus Kießling, J., Kollmeier, B., Diller, G.: Versorgung und Rehabilitation mit Hörgeräten. Thieme Verlag, Stuttgart 1997)

[Kollmeier]

Sprache: Spektrogramm "Durst"



[Terhardt]

Abb. 7.14. Teiltonzeitmuster des Wortes *Durst*, gesprochen von einem Mann. Die instantane Amplitude der Teiltöne wird durch die Strichstärke angedeutet. Ordinate Bark-skaliert. Nach [1050]

- außerordentlich komplex: Problem Spracherkennung

Sprache: Spektren, Formanten

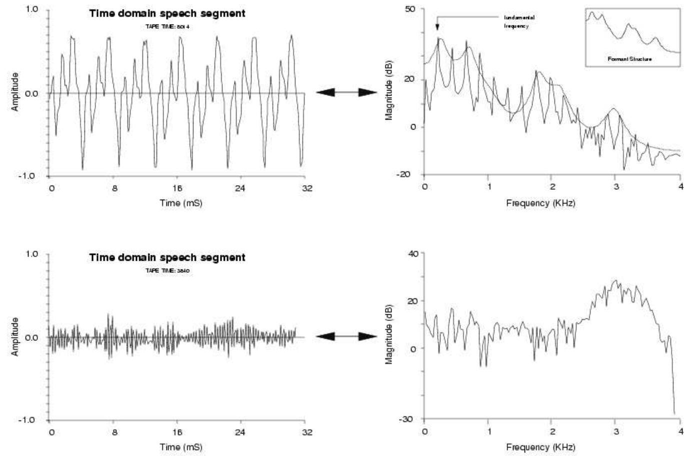
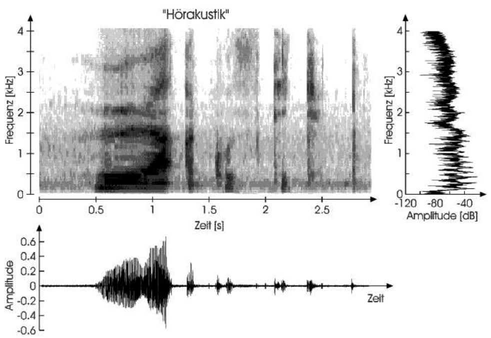


Fig. 1. Voiced and Unvoiced Segments and their short-time spectra. [Spanias]

Sprache: Spektrogramm

Formanten, d. h. die Frequenzbereiche, bei denen der Vokaltrakt eine besonders hohe Verstärkung des akustischen Signals bewirkt. Die Formanten stellen sich damit als Spitzen im Spektrum dar und sind charakteristisch für den jeweils artikulierten Vokal (s. unten).



komplexes Spektrum

komplexer Zeitverlauf

Abbildung 6.2: Zeit-Signal (unten), Spektrum (rechts) und Spektrogramm (links oben) des Wortes „Hörakustik“ [Kollmeier]

Sprache: Artikulation

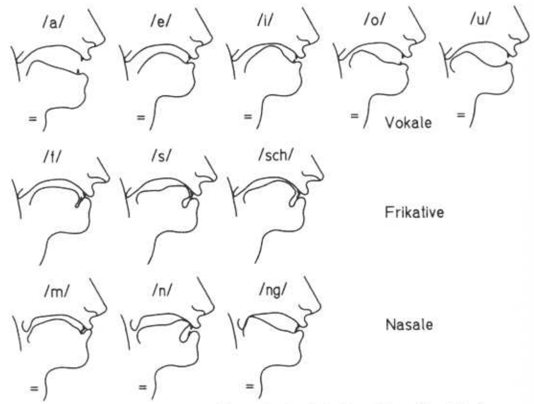
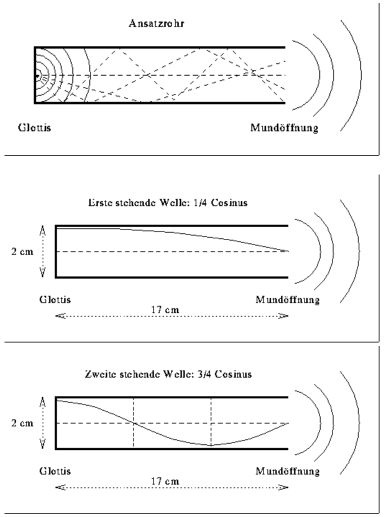
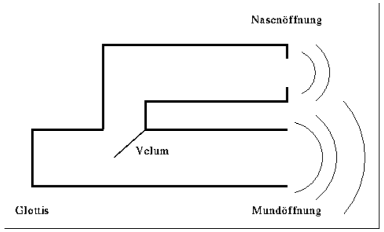


Abb. 7.1. Schematische Darstellung der Artikulation einiger Sprachlaute

- Zungen- und Lippenstellung maßgeblich [Terhardt]

Sprache: Vokaltrakt





- Stimmband + Resonanzrohr
- Lage der Formanten:

Wellenlänge: L/4 = 17cm

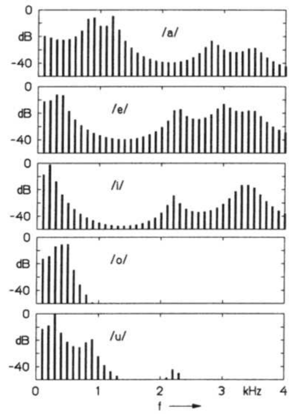
F1 = c/L = 340m/s / 68cm = 500 Hz

F2 = 1500 Hz

F3 = 2500 Hz

F3 = 3500 Hz

Sprache: Teiltonspektren der Vokale

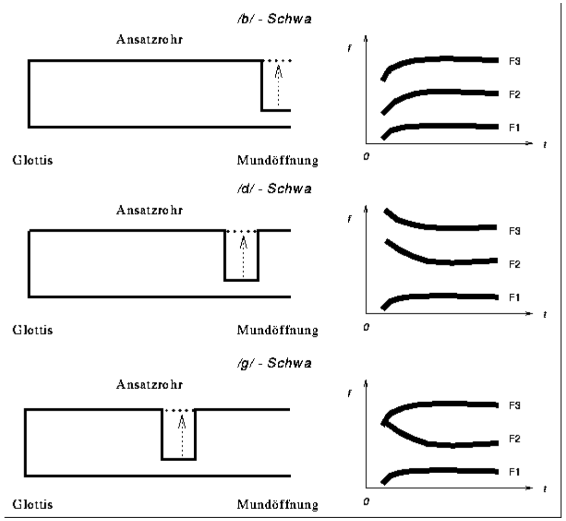


[Terhardt]

Abb. 7.10. Die Teiltonspektren der Vokale, berechnet mit Gleichung (7.31) für die willkürlich gewählte Stimmbandfrequenz 100 Hz. Die ersten drei Formantfrequenzen entsprechen denen von Tabelle 7.1; die vierte Formantfrequenz beträgt bei allen Vokalen 3,5 kHz

- Spektren der Vokale, Formanten deutlich sichtbar

Sprache: Konsonanten bdg



Sprache: Vokaldreieck

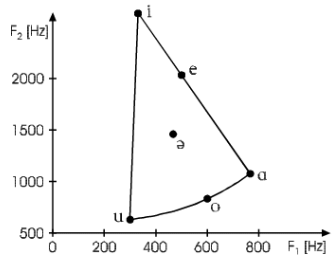
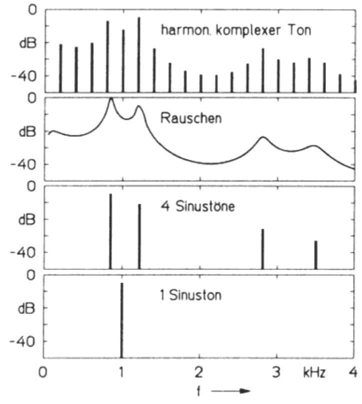


Abbildung 6.1.4: Vokaldreieck. Aufgetragen ist die Frequenz des ersten Formanten F_1 (Abzisse) und des zweiten Formanten F_2 (Ordinate) für unterschiedliche Vokale (schematisch) [Kollmeier]

- typische Frequenzen / Formanten der Vokale
- verhältnismäßig einfache Erkennung von stimmhaften Lauten

Sprache: Vokalkategorien



[Terhardt]

Abb. 12.2. Die Gestaltkategorie eines Vokals kann durch Schallsignale vermittelt werden, welche sich drastisch voneinander unterscheiden. Vier Beispiele, welchen die Vokalkategorie /a/ gemeinsam ist, sind dargestellt

- Wahrnehmung: jeweils als Vokal /a/

=> perceptual speech coding

Lärm: Pegelbereiche

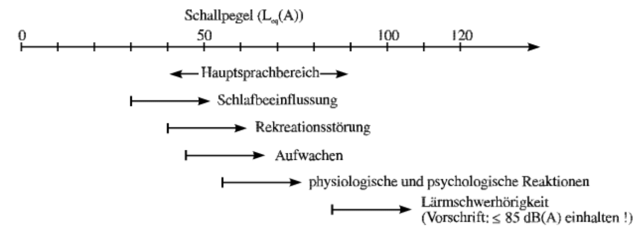
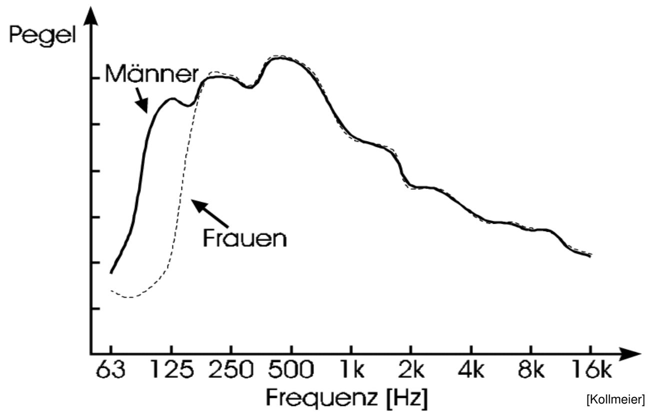


Abbildung 3.12: Pegelbereiche, für die unterschiedliche Schallwirkungen beim Menschen auftreten

[Kollmeier]

- Lärmpegel an Straßen selten unter 50 dB(A) ...
- laufender Computer:
- Nadeldrucker: 70+ dB(A)

Sprache: Frequenzbereiche

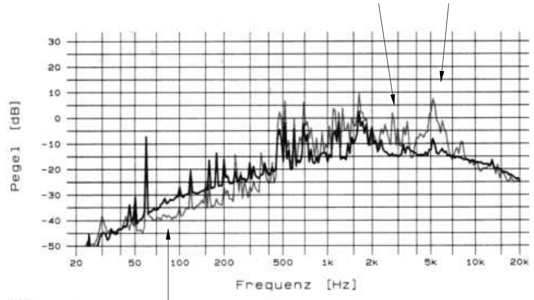


[Kollmeier]

- Frequenzspektrum oberhalb 200 Hz identisch
- Männer mit tieferen Frequenzen zw. 60 und 250 Hz

Lärm: Festplatte normal und gedämpft

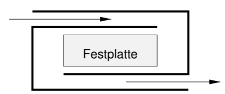
Dämpfung



Die beiden Emissionsspektren der Test-Harddisk zeigen, daß die Dämpfung durch das Labyrinth-Gehäuse vor allem 'Heultöne' im Bereich von 500 Hz bis 5 kHz um bis zu 20 dB senkt. Hier aufgetragen finden Sie den Verlauf des Schalldruckpegels. Das heißt, 3 dB entsprechen in der Lautstärkeempfindung Faktor 1,414, 10 dB Faktor 3,16 und 20 dB Faktor 10. Was Ihnen die Diagramme allerdings nicht direkt sagen: ohne Dämpfung ist die Platte recht unangenehm laut, mit Dämpfung flüsterleise.

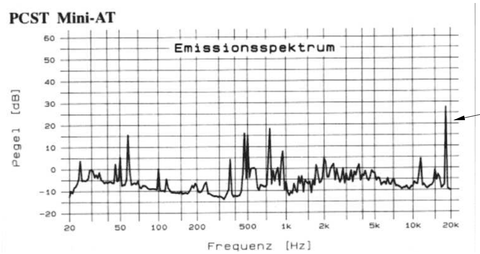
132 c't 1989, Heft 10

hier sogar lauter

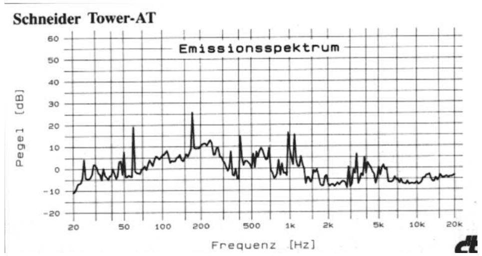


- Schalldämpfung ist nicht einfach...

Lärm: Emissionsspektren, 1989



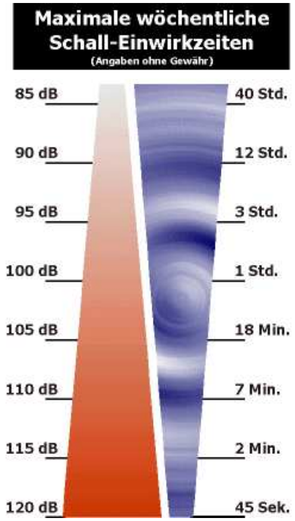
Monitor (EGA)



- kaum Gemeinsamkeiten

- Gehäusedämpfung
- Netzteil/CPU-Lüfter
- Platten, CDROM, ...

Lärm: Schädigung



Lärm: Schädigungen

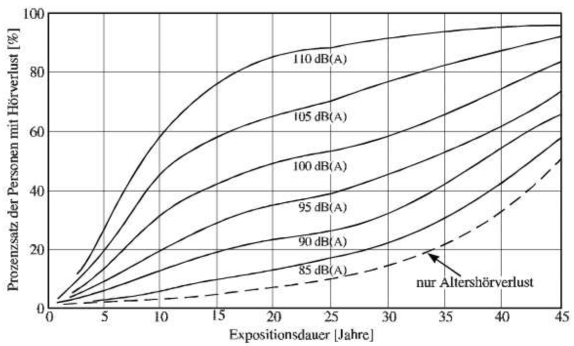


Abbildung 3.13: Entwicklung von Hörverlust in Abhängigkeit von der Schalldosis gemäß ISO-1999 [Kollmeier]

- bei höheren Pegeln Schäden innerhalb von Sekunden

Gehör: Zusammenfassung

Gehör außerordentlich leistungsfähig:

- überdeckt 13 Größenordnungen Schalldruck
- fast optimale Empfindlichkeit
- Hörbereich etwa 20Hz .. 20 KHz
- Frequenzanalyse "mechanisch" in der Cochlea

- komplexe Verarbeitung/Erkennung im Gehirn
- Wahrnehmung Klang vs. Geräusch

  insbesondere zur Raumwahrnehmung:
- Zeit- und Intensitätsdifferenzen der Signale
- Kopfübertragungsfunktion
- Auswertung von Echos

=> entsprechende Modelle für effiziente Signalverarbeitung