



Interaktive Medien

Kapitel Audio

Prof. Dr.-Ing Timo Gerkmann
Signal Processing, Universität Hamburg

Mit Folien von: Prof. Dr. Frank Steinicke
Human-Computer Interaction, Universität Hamburg

Inhalt

- Schall, Frequenz und Lautstärke
- Auditive Wahrnehmung
- Digitalisierung und Codierung von Audiosignalen
- Praxis: Audiobearbeitung

Audio

Motivation

- Ohr nicht verschließbar, unbewusste Wahrnehmung als Normalfall
- direkt Kopplung der Schallverarbeitung mit Emotionen
- akustische Alarme
- ...

Fokus: Mediendesign

Auditory Icon

- **Auditory Icon** ist akustische Symbol, welches Objekt oder Vorgang im UI darstellt
- **Auditory Icon** wird meist durch natürliches Geräusch wiedergegeben

Auditory Icon

Beispiele

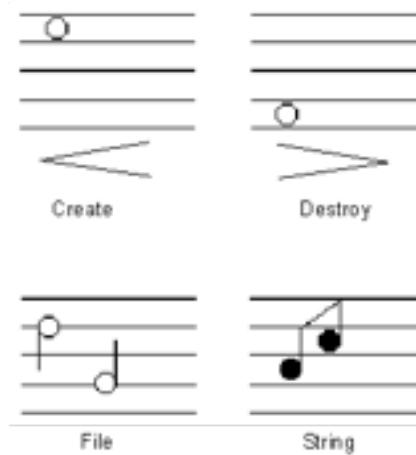


Auditory Icon Beispiel



Earcon

- Earcon ist synthetisches Geräusch zur abstrakten Codierung von Information im UI, z.B.



→ Bedeutung von Earcon muss erlernt werden

Earcon Beispiel





Interaktive Medien

Kapitel Audio

Schall, Frequenz und Lautstärke

Audiosignale

Physikalische Grundlagen

- **Schall** ist mechanische Bewegung eines physikalischen Mediums, die sich als Druckwelle ausbreitet (**Druckschwankungen**)
 - z.B. Luft, Wasser, ...
- ohne Medium keine Schallausbreitung, z.B. Weltall

Wellen

Longitudinal- und Transversal

- **Longitudinalwelle**: Oszillatoren schwingen in der Ausbreitungsrichtung
- **Transversalwelle**: Oszillatoren schwingen quer zur Ausbreitungsrichtung

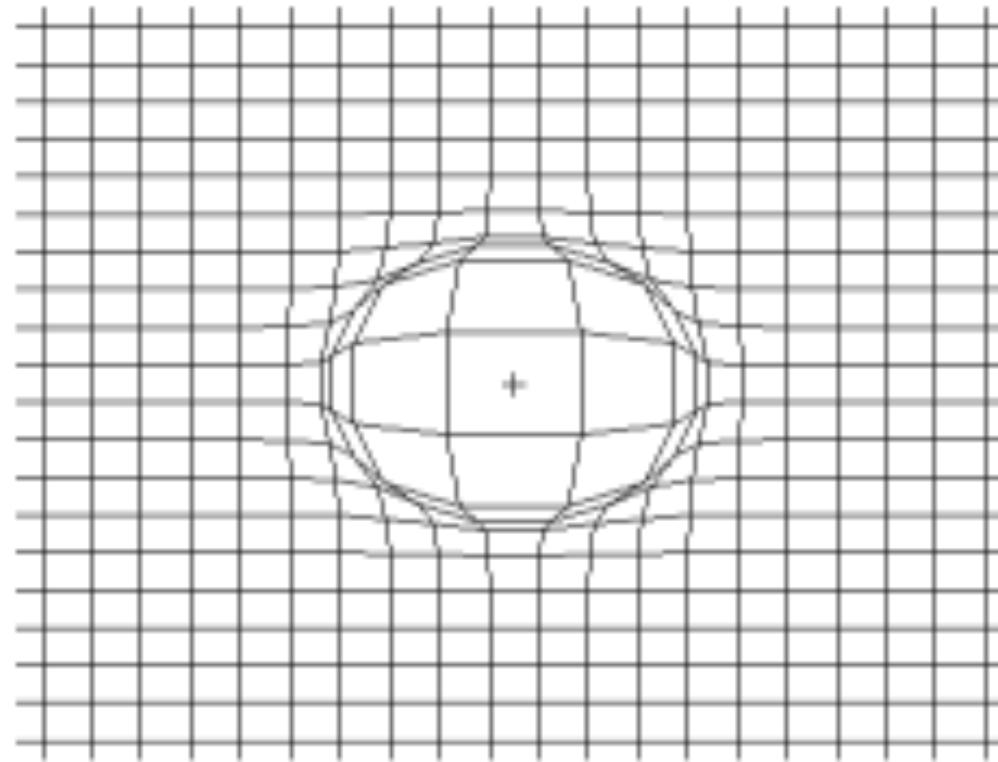
Longitudinalwelle



Transversalwelle

Longitudinalwelle

Bespiel

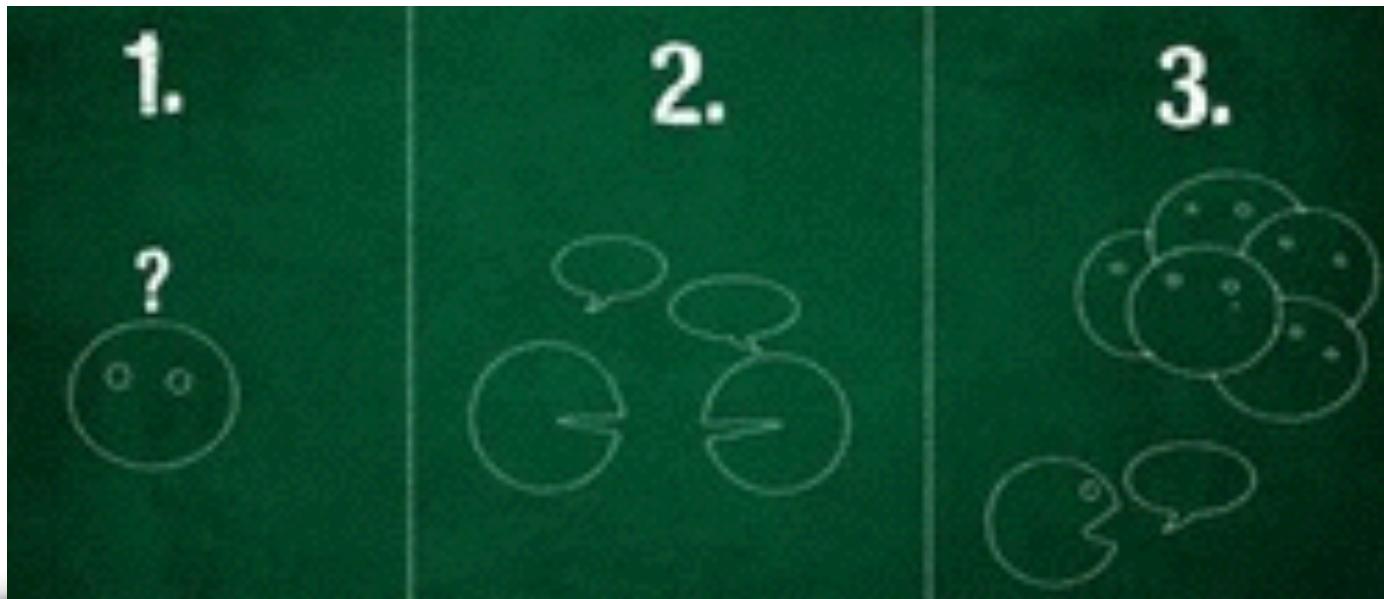


Audiosignale

Ausbreitungsgeschwindigkeit

- **Schallwellen** breiten sich im Raum konzentrisch um Entstehungspunkt aus
- **Schallwellen** breite sich in unterschiedlichen Medien mit unterschiedlichen **Ausbreitungsgeschwindigkeiten** aus
 - Beispiele: Luft: 331m/s bei 0°C und 343m/s bei 20°C

Think! Pair! Share!



Wie weit ist Gewitter bei entfernt, falls zwischen Blitz und Donner 3 Sekunden vergehen?



Wie weit ist Gewitter bei Schallgeschwindigkeit von 340m/s entfernt, falls zwischen Blitz und Donner 3 Sekunden vergehen?

A

ca. 1000m

B

ca. 3000m

C

ca. 2000m

D

ca. 4000m



Wie weit ist Gewitter bei Schallgeschwindigkeit von 340m/s entfernt, falls zwischen Blitz und Donner 3 Sekunden vergehen?

A

ca. 1000m

B

ca. 3000m

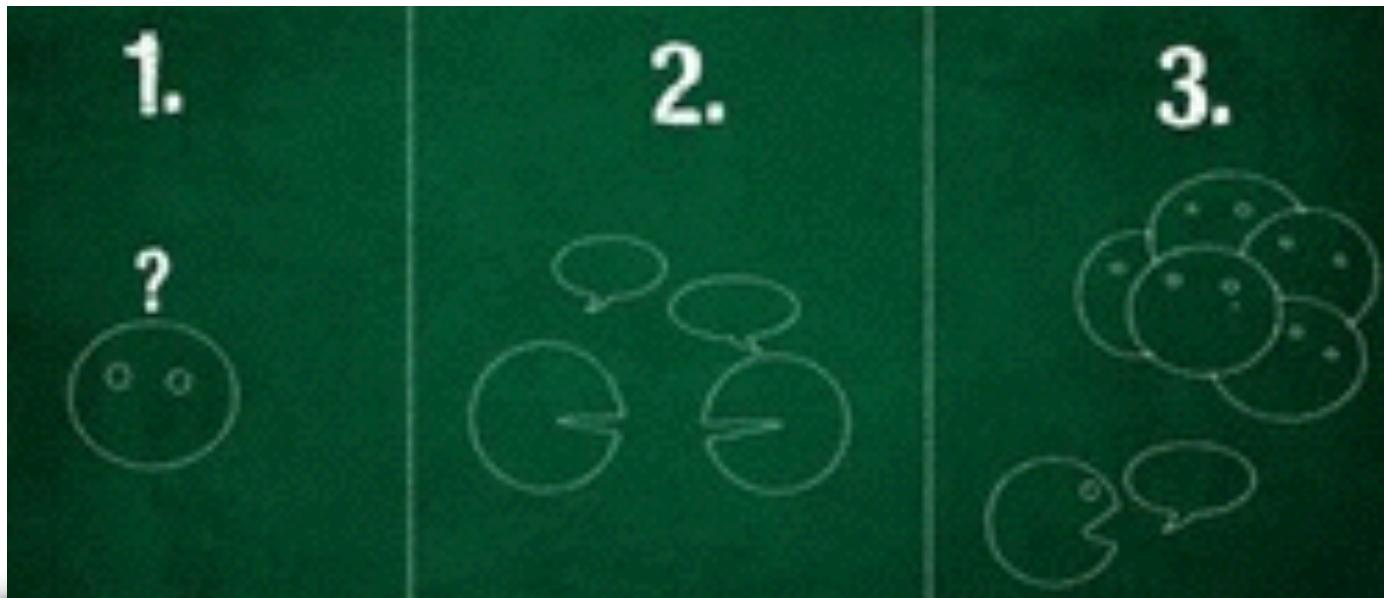
C

ca. 2000m

D

ca. 4000m

Think! Pair! Share!



Ab welcher Geschwindigkeit in km/h
durchbricht Flugzeug die Schallmauer?



Ab welcher Geschwindigkeit in km/h durchbricht
Flugzeug die Schallmauer?

A

ca. 800km/h

B

ca. 1200km/h

C

ca. 1600km/h

D

ca. 2000km/h



Ab welcher Geschwindigkeit in km/h durchbricht Flugzeug die Schallmauer?

A

ca. 800km/h

B

ca. 1200km/h

C

ca. 1600km/h

D

ca. 2000km/h

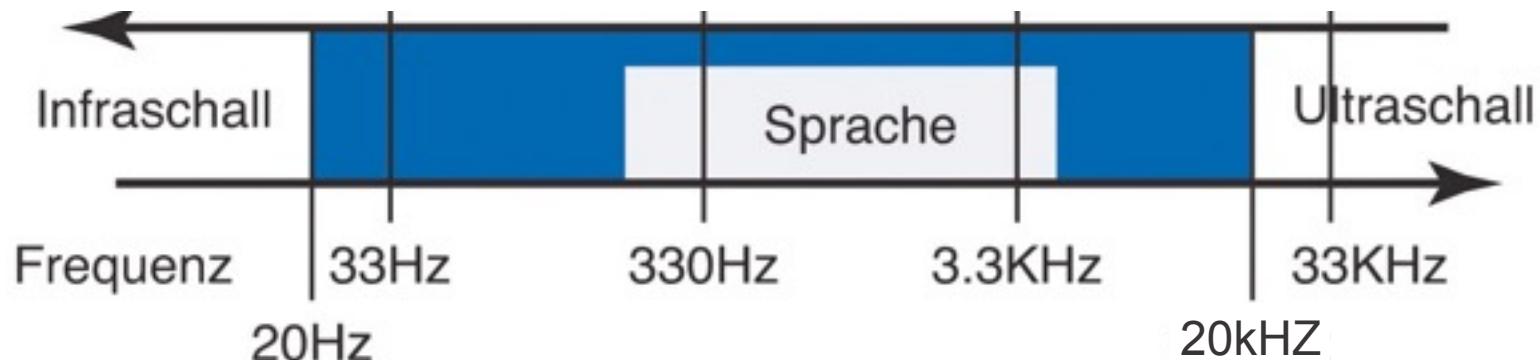
Ton & Geräusch

- akustischer Reiz entsteht durch (schnelle)
Luftdruckschwankungen
 - **unregelmäßig Luftdruckschwankungen**
werden als Geräusche wahrgenommen
 - **periodische Luftdruckschwankungen**
werden als Ton wahrgenommen
 - ▶ **Wellenlänge**, z.B. in mm
 - ▶ **Frequenz**, z.B. f in Hz

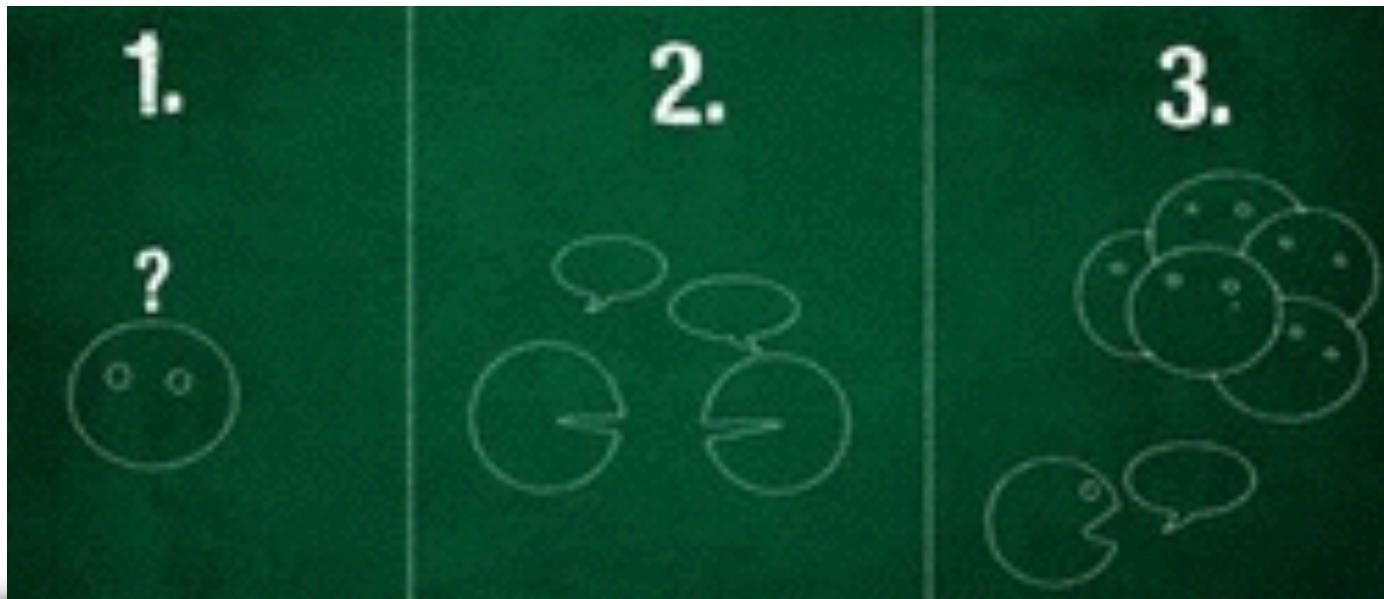
Frequenzen

Hörbares Spektrum

- **Hörbares Spektrum** liegt im Idealfall (junger, normal hörender Mensch) im Frequenzbereich von 20Hz bis 20kHz

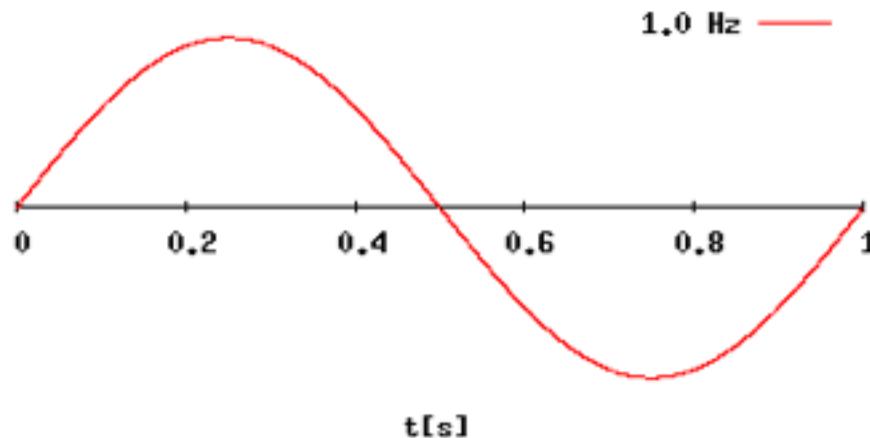


Think! Pair! Share!



Schallgeschwindigkeit $c_s = 343\text{m/s}$

Welche Wellenlänge haben somit hörbare
Audiodrähte?



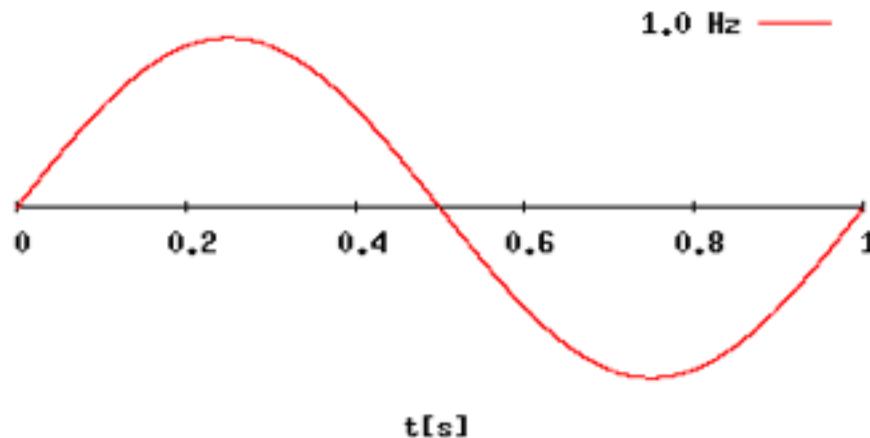
Welche Wellenlänge haben somit hörbare Audiowellen mit einer Schallgeschwindigkeit von $c_s = 343\text{m/s}$?

A ca. 17cm bis 170m

B ca. 0,17cm bis 17m

C ca. 1,7cm bis 17m

D ca. 17cm bis 17m



Welche Wellenlänge haben somit hörbare Audiowellen mit einer Schallgeschwindigkeit von $c_s = 343\text{m/s}$?

A ca. 17cm bis 170m

B ca. 0,17cm bis 17m

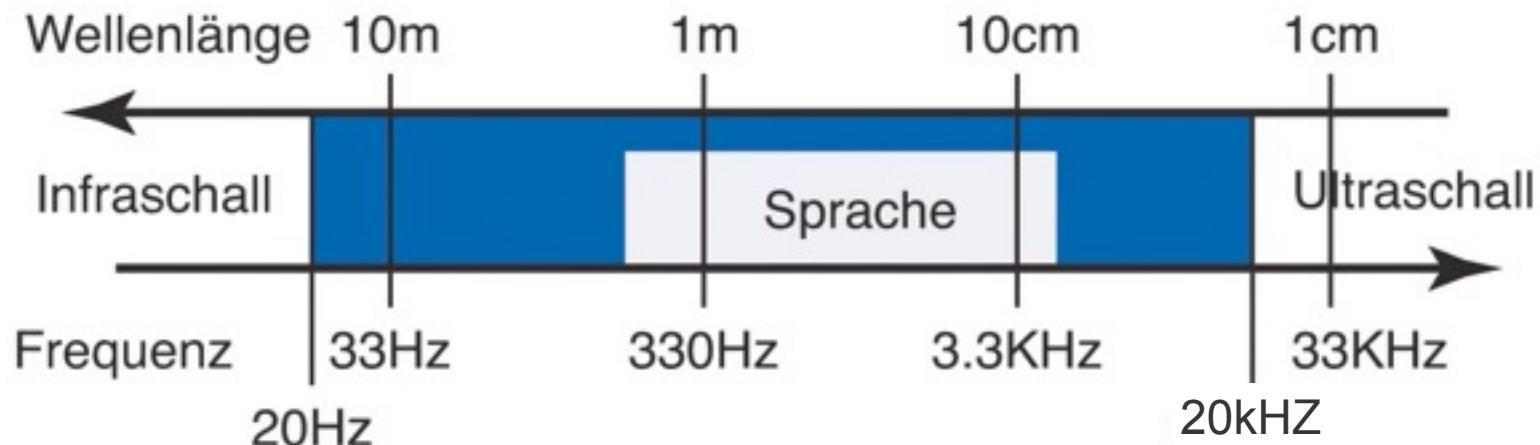
C ca. 1,7cm bis 17m

D ca. 17cm bis 17m

Frequenzen

Hörbares Spektrum

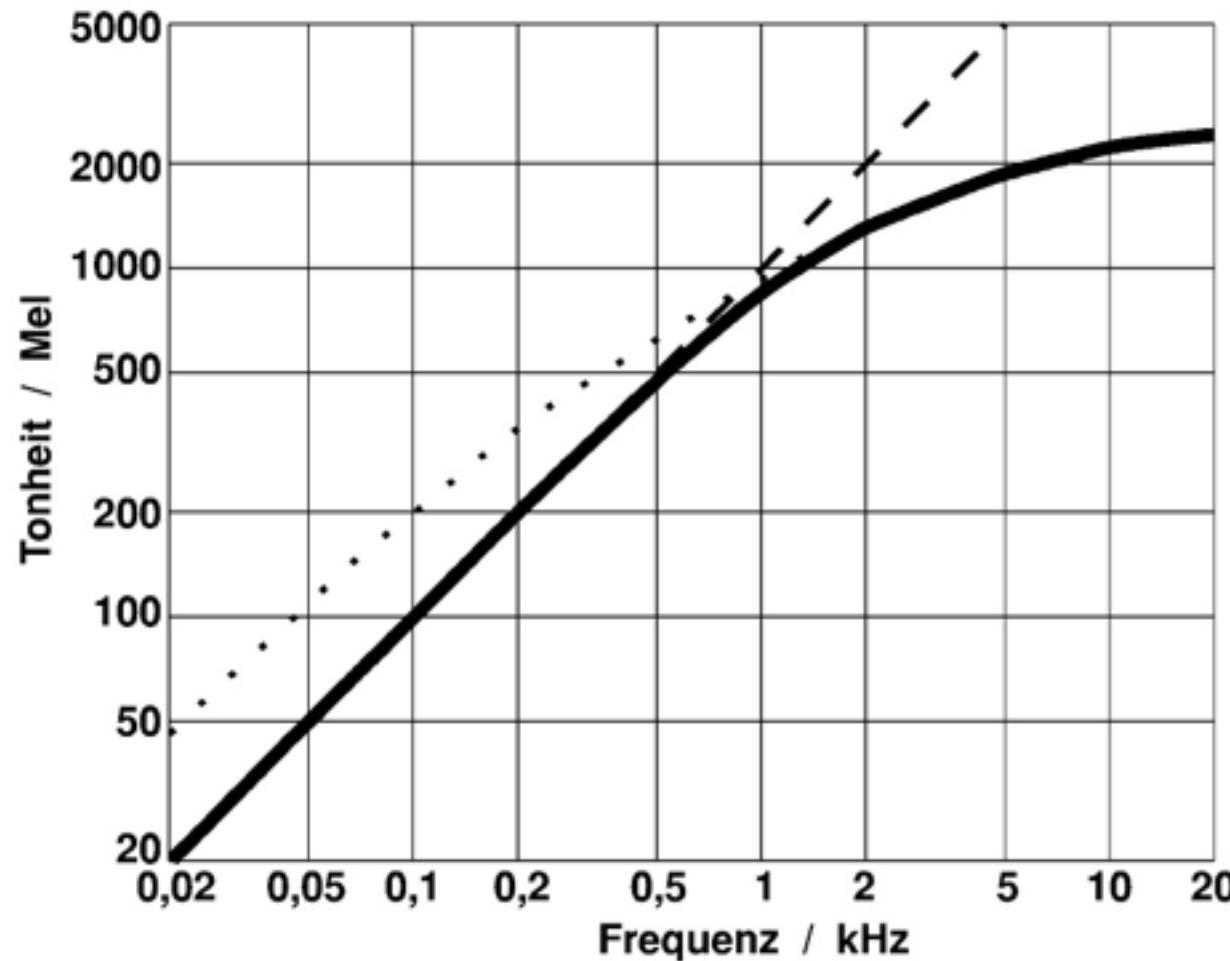
- **Hörbares Spektrum** liegt im Idealfall (junger, normal hörender Mensch) im Frequenzbereich von 20Hz bis 20kHz



Tonhöhe

- **Tonhöhe / Tonheit** (engl pitch) ist eine psychoakustische Größe. *Tonhöhe* wird aber häufig mit der Grundfrequenz des Schalls gleichgesetzt
 - geringe Grundfrequenz --> niedrige Tonhöhe
 - hohe Grundfrequenz --> hohe Tonhöhe
- Diskriminierungsfähigkeiten des Menschen liegt (bei niedrigen Frequenzen) im Bereich

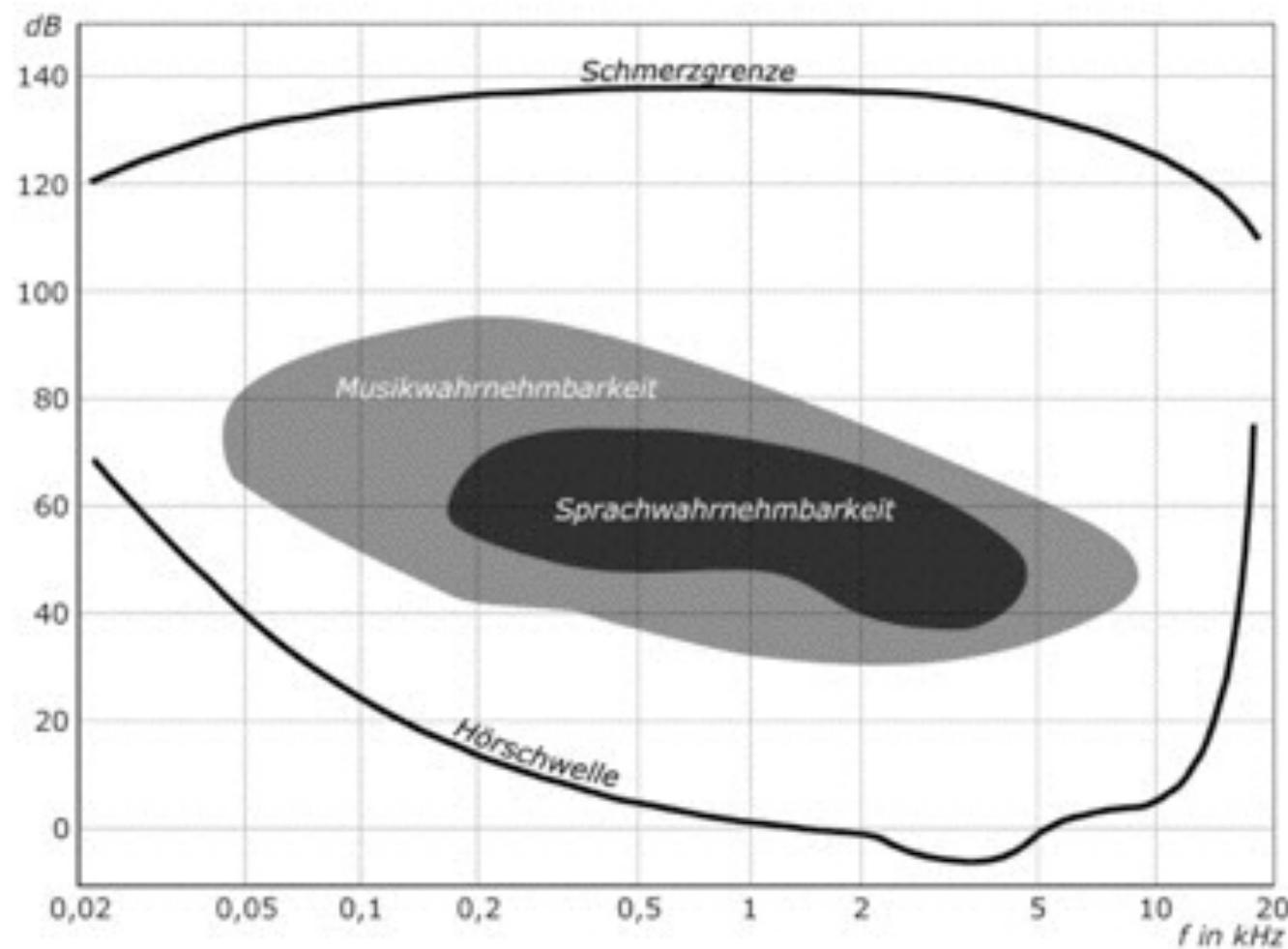
Tonhöhe / Tonheit: wahrgenommene Tonhöhe



Lautstärke

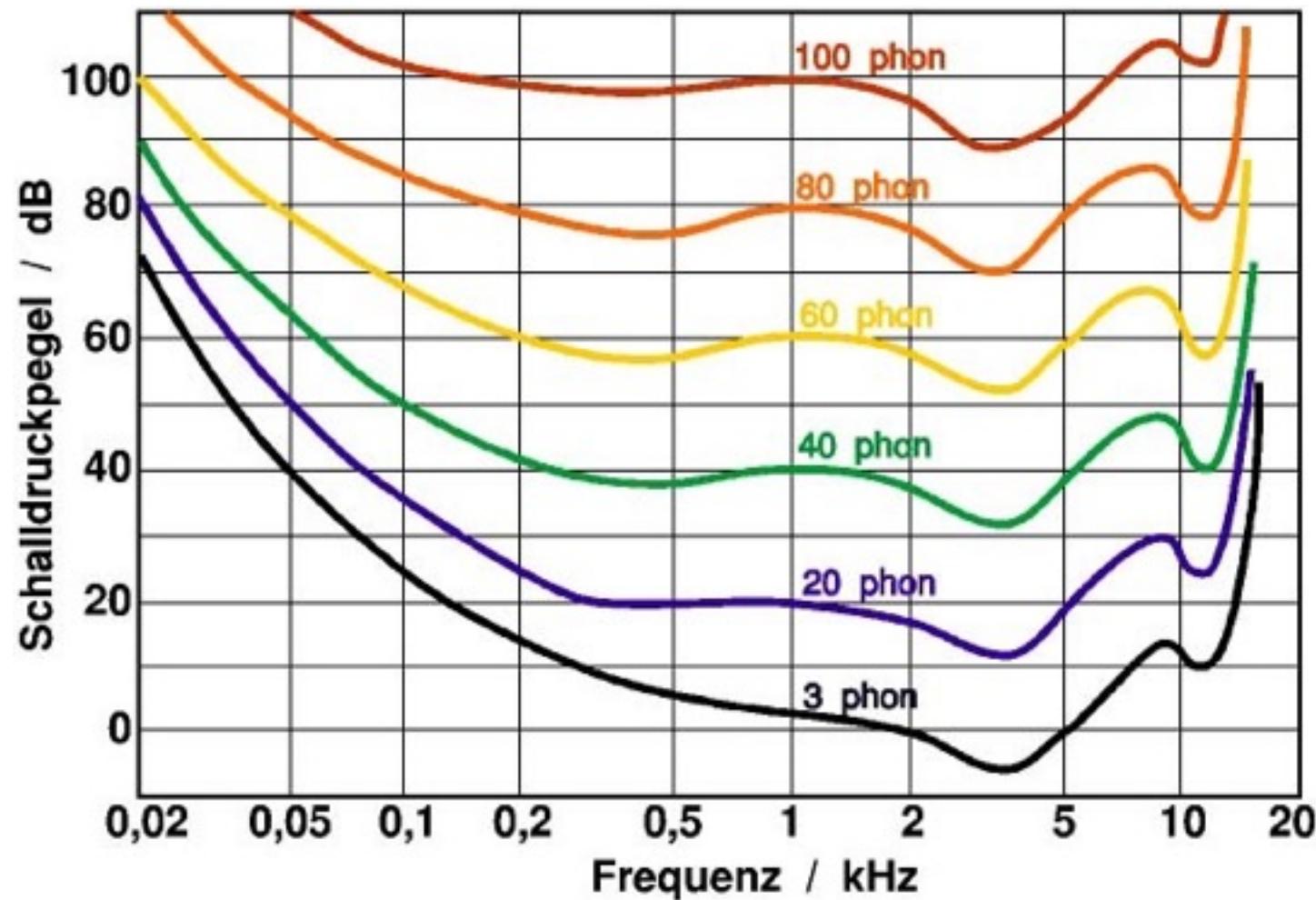
- **wahrgenommene Lautstärke** hängt vom Schalldruckpegel, Frequenzspektrum und Zeitverhalten des Schalls ab
- **Schalldruckpegel [dB]** entspricht der physikalisch gemessenen Luftdruckänderung.
- **Lautstärkepegel [phon]** psychoakustisches Vergleichsmaß, z.B.: Hörereignis mit 40phon ist genauso laut wie ein Sinus bei 1000Hz mit Schalldruckpegel 40dB.

Lautstärke Wahrnehmung



Isophone

Kurven gleicher Lautstärke





Alexander Graham Bell, 1875

(Dezi)bel

- **Dezibel** ist logarithmische Maßeinheit zur Kennzeichnung von Pegeln und Maßen
 - **Dezibel (dB) = 1/10 Bel (B)**
- **Dezibel** dient zur Kennzeichnung des Verhältnisses der Energiegröße P_2 und P_1 (:=Schalldruck bei Hörschwelle $2 \cdot 10^{-5}$ Pascal)

$$L = \log_{10} \left(\frac{P_2^2}{P_1^2} \right) B = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_2^2}{P_1^2} \right) dB = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) dB$$

Umrechnung dB

Beispiele

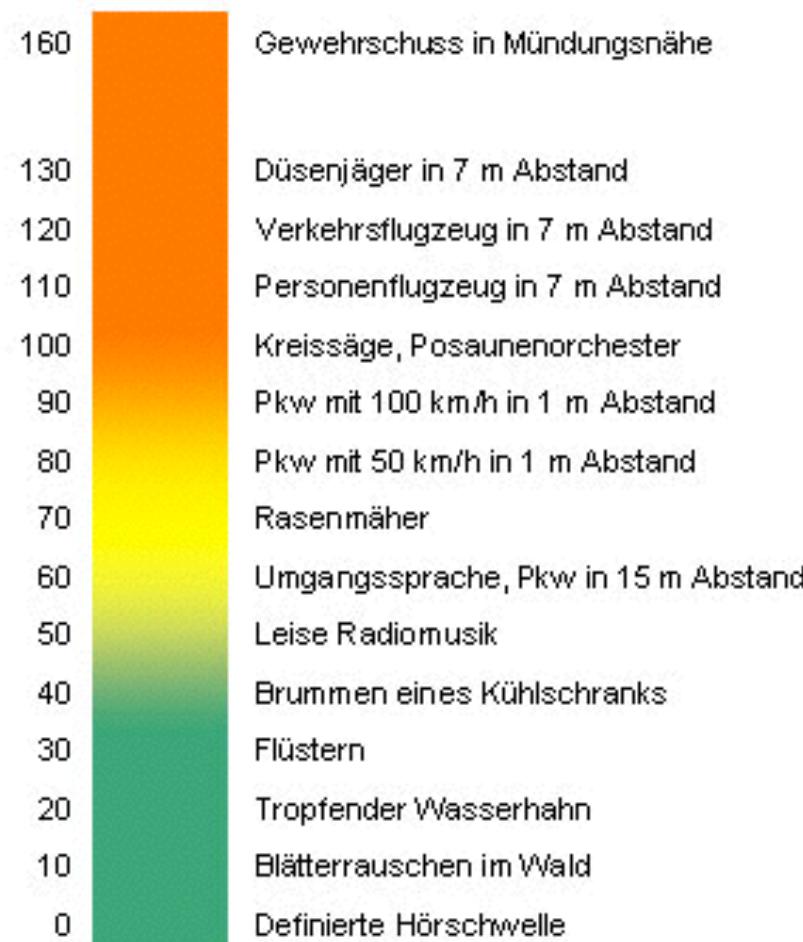
Sprechen →
Blätter rascheln →

P2 / P1	L
10000	80dB
100	40dB
10	20dB
4	12dB
2	6dB
1,26	2dB
1	0dB
0,79	-2dB
0,5	-6dB
0,25	-12dB
0,1	-20dB
0,01	-40dB
0,0001	-80dB

← Schreien
← Flüstern
← Hörschwelle

Pegelbereiche

Bsp: Lärm in dB



Lautstärke

Beispiel: $\pm 10\text{dB}$

Freude, schöner Götterfunken

Allegro maestoso

Ludwig van Beethoven

The musical score consists of two staves of music for piano. The top staff is in common time (indicated by a 'C') and has a key signature of one sharp (F#). The bottom staff is also in common time and has a key signature of one sharp (F#). The music is composed of eighth and sixteenth notes. The tempo is marked as 'Allegro maestoso'. The composer's name, 'Ludwig van Beethoven', is written at the end of the score.

This is a continuation of the musical score from the previous slide, showing the next section of the piece.



- 10 -

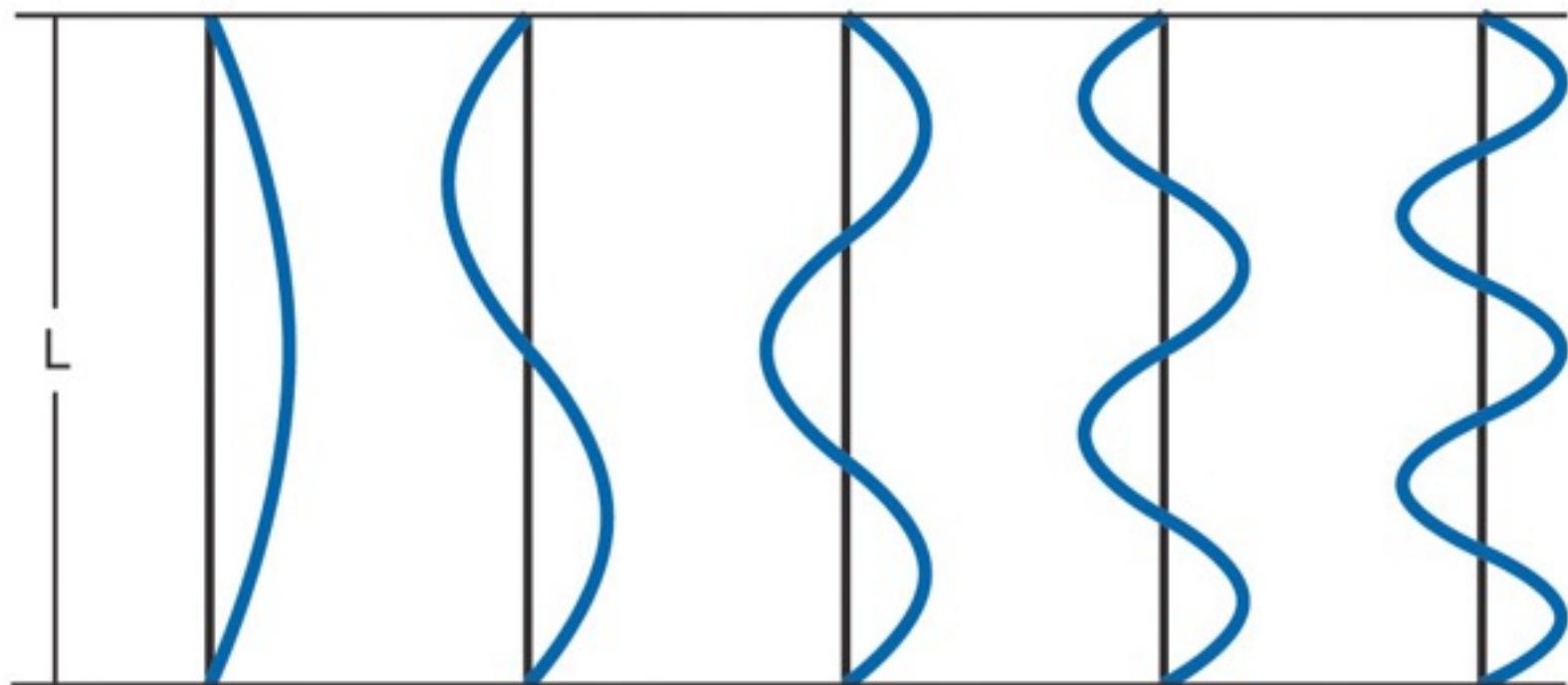
Töne

Grundton & Obertöne

- Töne werden oft dadurch erzeugt, dass Gegenstand (Saite, Stimmbänder) in Schwingung versetzt wird
- Schwingung der n-fachen Grundfrequenz wird **n-te Harmonische** oder **(n-1)-te Oberton** genannt

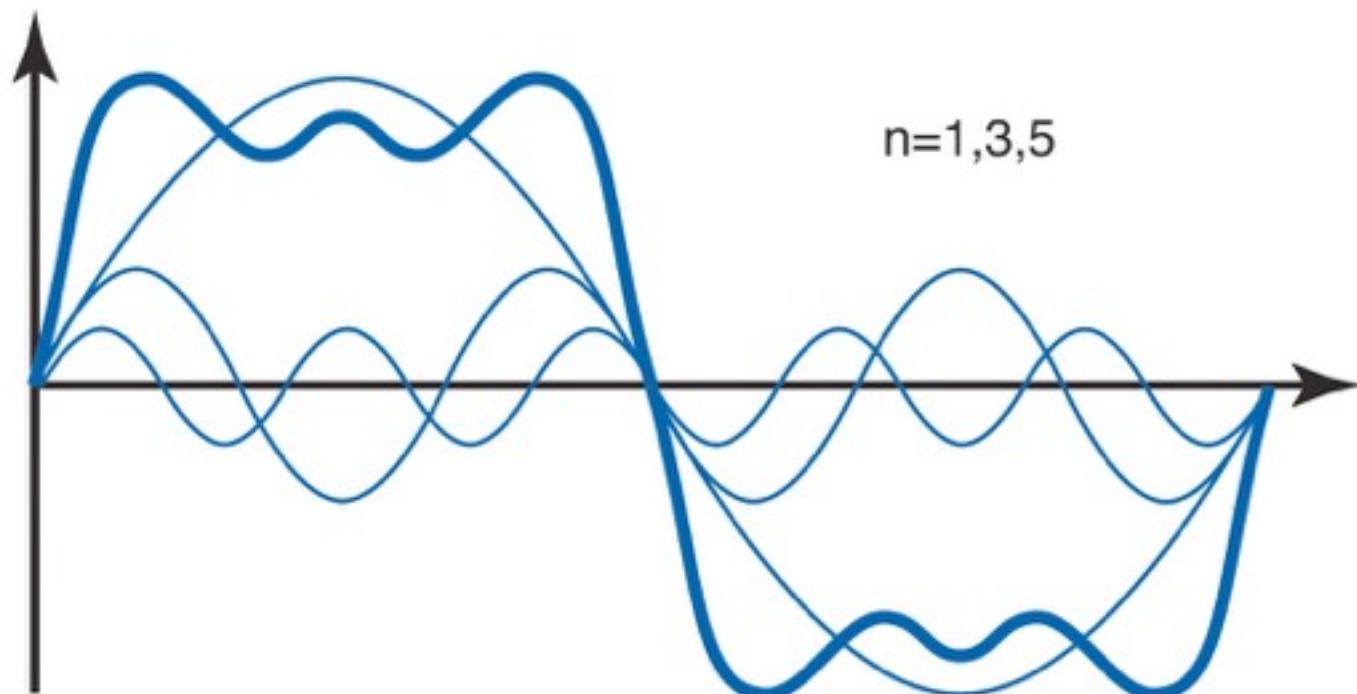
Harmonische

Bsp: Grundton & Obertöne



Addition von Obertönen

Beispiel



Klangfarbe

- **Klangfarbe** eines Tons ist spezifisches Gemisch aus **Grundton** und **Obertönen**
 - **Klangfarbe** hängt von Beschaffenheit des Tonerzeugers (z. B. Instrument, Singstimme) ab
 - **Klangfarbe** und **(Ein-)schwingverhalten** lassen uns Töne auditiv unterscheiden

Fouriertransformation

Fourier-Reihe

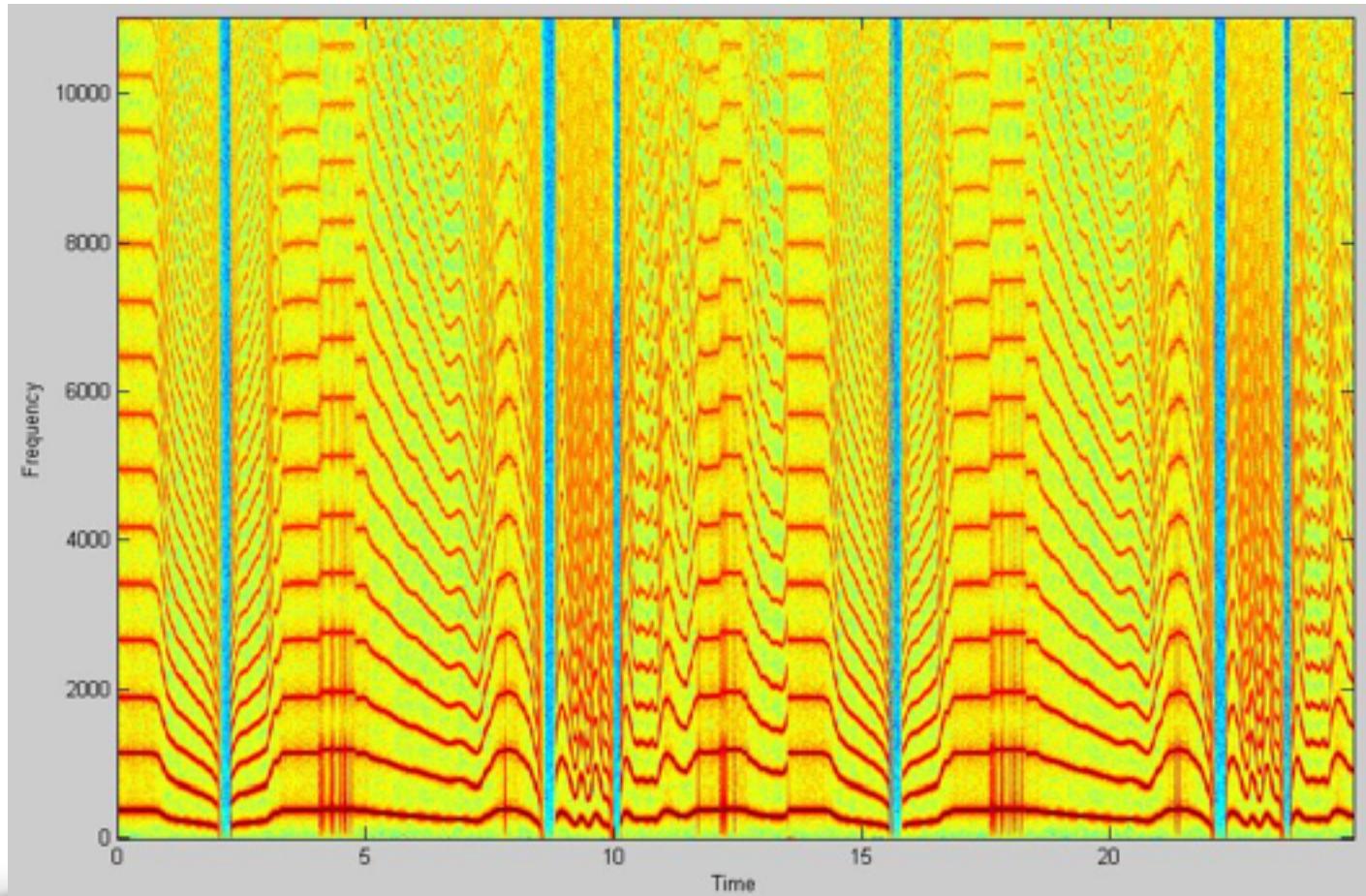
- Jede periodische Schwingung lässt sich durch unendliche Summe von sich überlagerten Cosinus-Schwingungen annähern

$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cdot \cos(k \cdot \omega_0 \cdot t + \theta_k)$$

- Grundfrequenz ω_0
- Anteil k-ten harmonische Schwingung a_k
- Phasenverschiebung der k-ten harmonischen Schwingung θ_k

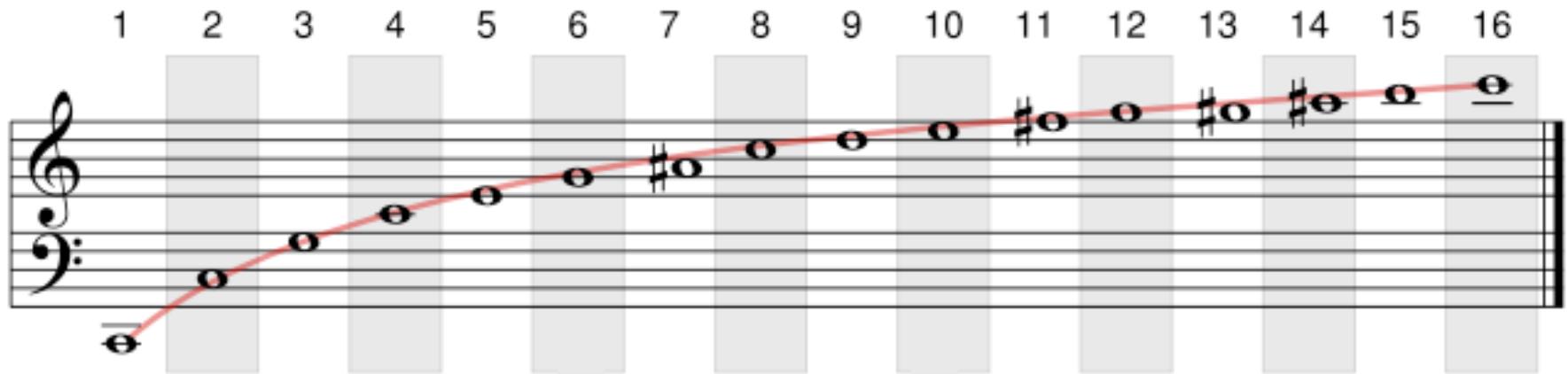
Frequenzspektrum

Beispiel: DFT



Obertonreihe

Beispiel



Schallwandler

- am Anfang jeder elektroakustischen Übertragungskette steht **Schallwandler** oder **elektroakustischer Wandler**
- Beispiele
 - Mikrofon
 - einige Musikinstrumente leiten direkt aus mechanischer Schwingung elektrisches Signal ab, E-Gitarre, E-Piano ...

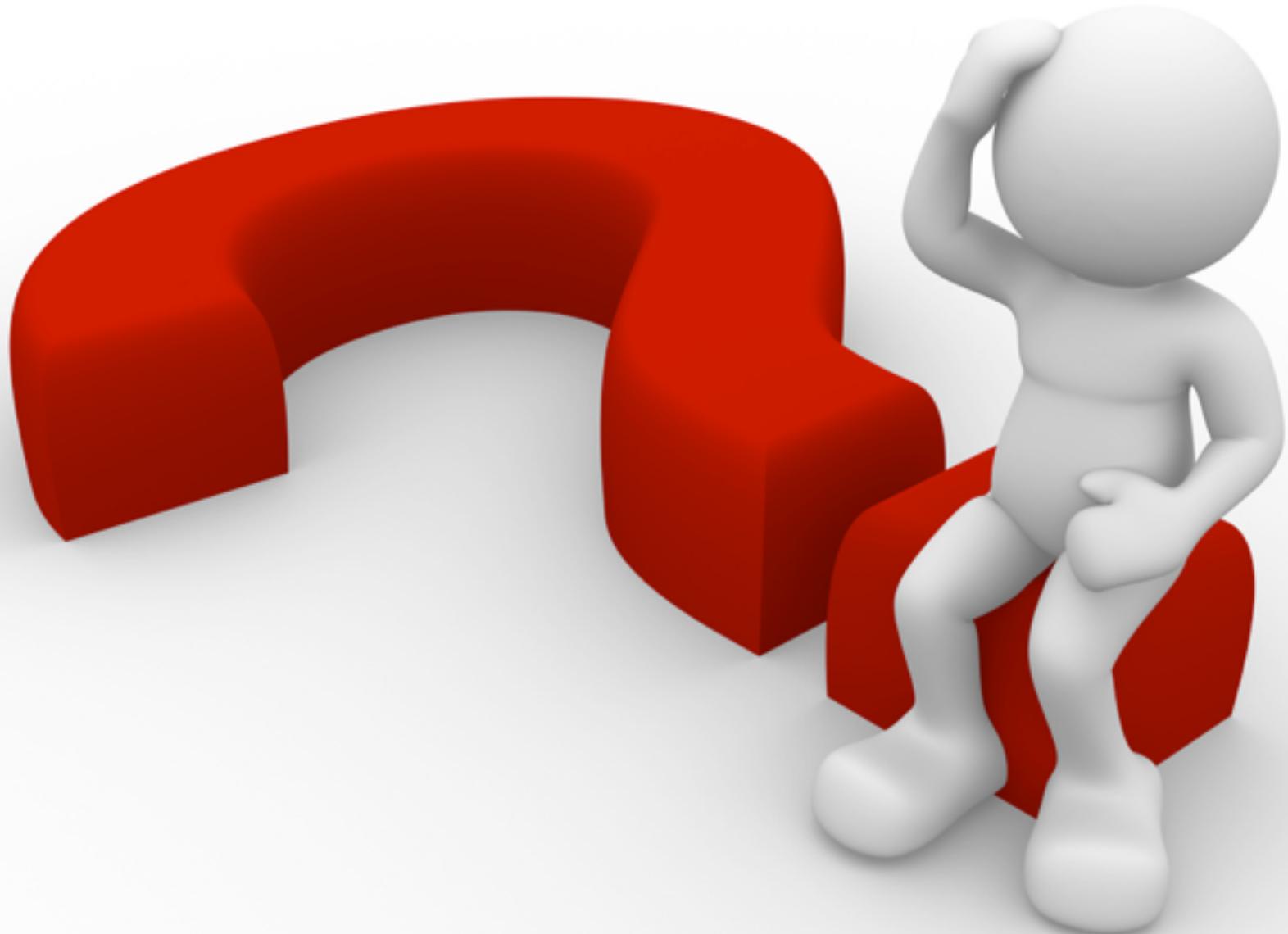
Fokus Mediendesign

MIDI

- **Musical Instrument Digital Interface (MIDI)**
ist Protokoll für Austausch musikalischer Steuerinformationen zwischen elektronischen Instrumenten
- Beispiel:
 1. Byte: MIDI-Kanal 1
 2. Byte: Note C3
 3. Byte: Anschlagstärke 103

Übertragung

- zur Übertragung von Schallwellen wird analoger (z.B. Magnetband) oder digitaler **Zwischenträger** (z.B. CD) benötigt
- **Zwischenträger** erlaubt Transport ursprünglicher Schallinformation





Interaktive Medien

Kapitel Audio

Psychoakustik

Psychoakustik

- **Psychoakustik** erfasst Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen eines Schallsignals und den dadurch ausgelösten Sinnesempfindungen

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

Psychophysik

- **Psychophysik** bezieht sich auf Wechselbeziehungen zwischen
 - **subjektivem Erleben** und
 - **quantitativ messbaren Reizen**

Weber-Fechner-Gesetz

- **Weber-Fechner-Gesetz** beschreibt Zusammenhang zwischen **Reizstärke R** und **Erlebnisintensität E**:

$$E = k \cdot \log R + f$$

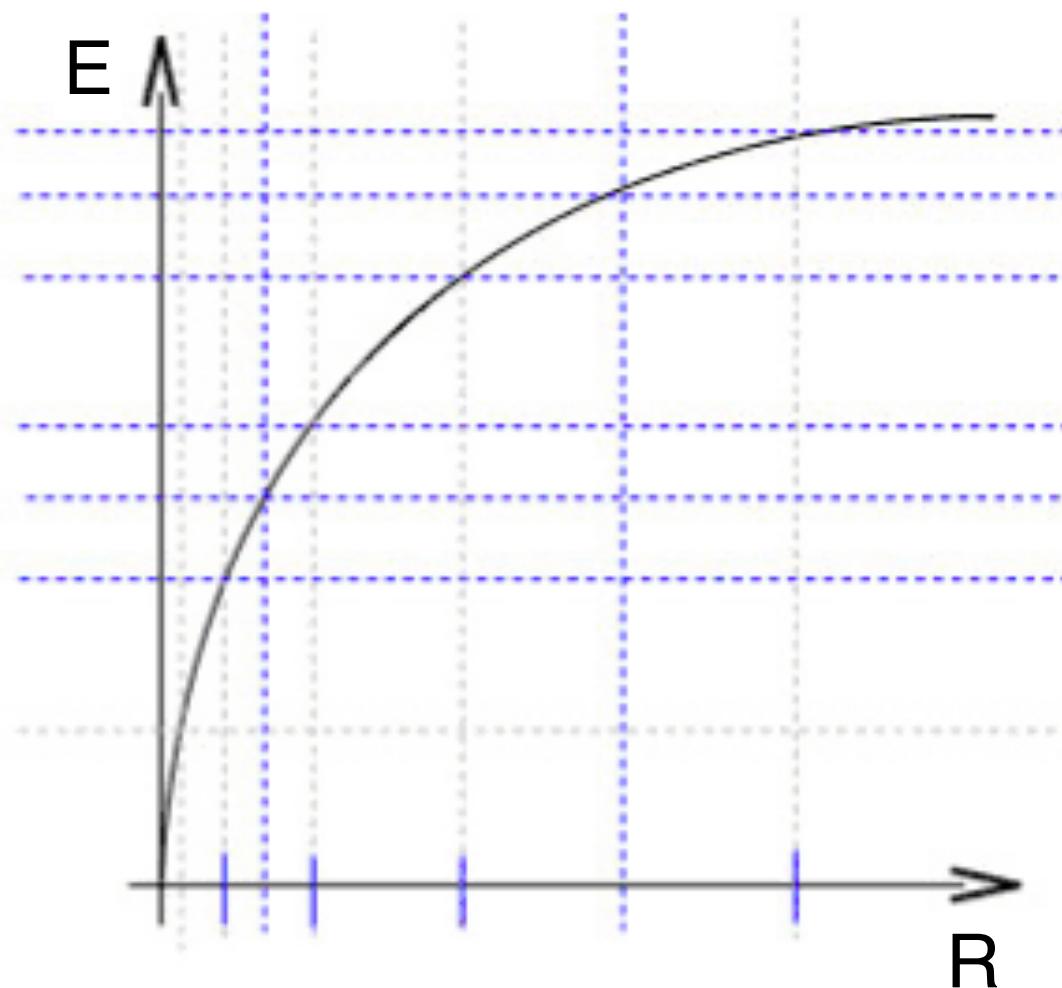
mit Konstanten k und f

Weber-Fechner-Gesetz

- **Weber-Fechner-Gesetz** besagt, dass subjektiv empfundene Stärke von Sinneseindrücken proportional zum Logarithmus der objektiven Intensität des physikalischen Reizes verhält
- Experimenteller Nachweis durch gerade noch wahrnehmbaren Unterschied (engl. **Just Noticeable Difference**)

Weber-Fechner-Gesetz

Beispiel



Hören

- **Hören** ist Sinneswahrnehmung von Schall, der sich in Form von Wellen in Medium mit **Schallgeschwindigkeit** c ausbreitet
- **Schwingungen** werden über Umgebungsmedium (Luft, Wasser) oder Untergrund (Vibrationen) übertragen
 - z.B. Feststoffe, Flüssigkeiten oder Gas
- Hören von Geräuschen basiert auf **Vibrationen im Ohr**

Ohr

Aufgaben

- **Ohr** ist Sinnesorgan, mit dem Schall aufgenommen wird
- **Ohr** unterteilt sich **Außenohr**, **Mittellohr** und **Innenohr**
- **Ohr** nimmt Änderungen des Luftdrucks wahr, transformiert diese in elektrische Signale, die über Hörnerv an Gehirn weitergeleitet werden

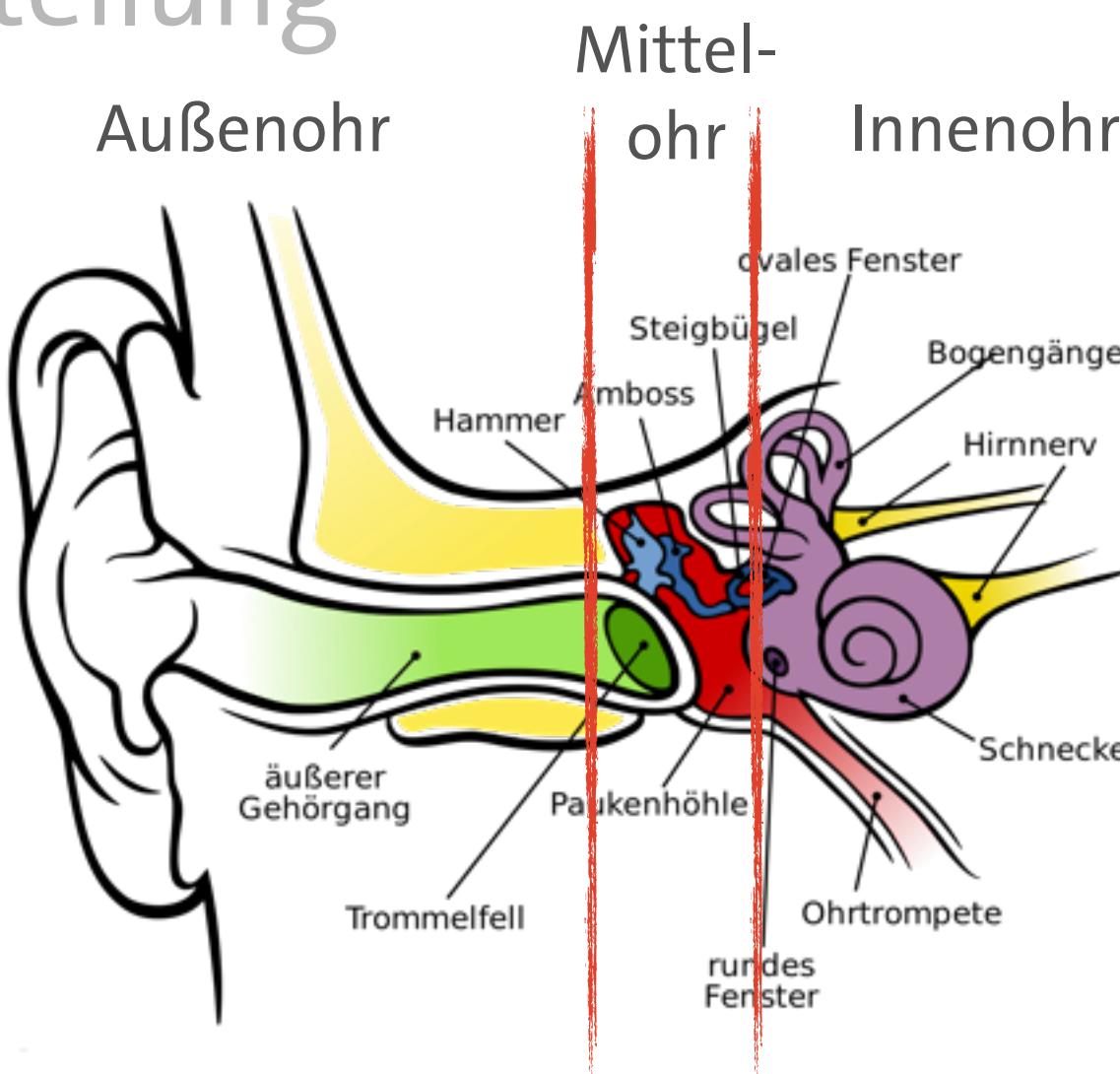
Ohr

Unterteilung

1. **Außenohr** beginnt bei Ohrmuschel und geht über Gehörgang zum Trommelfell
2. **Mittelohr** beginnt beim Trommelfell, geht über Gehörknöchelchenkette bis zur Schnecke (**Cochlea**)
3. **Innenohr** ist Schnecke und Hörnerv

Ohr

Aufteilung



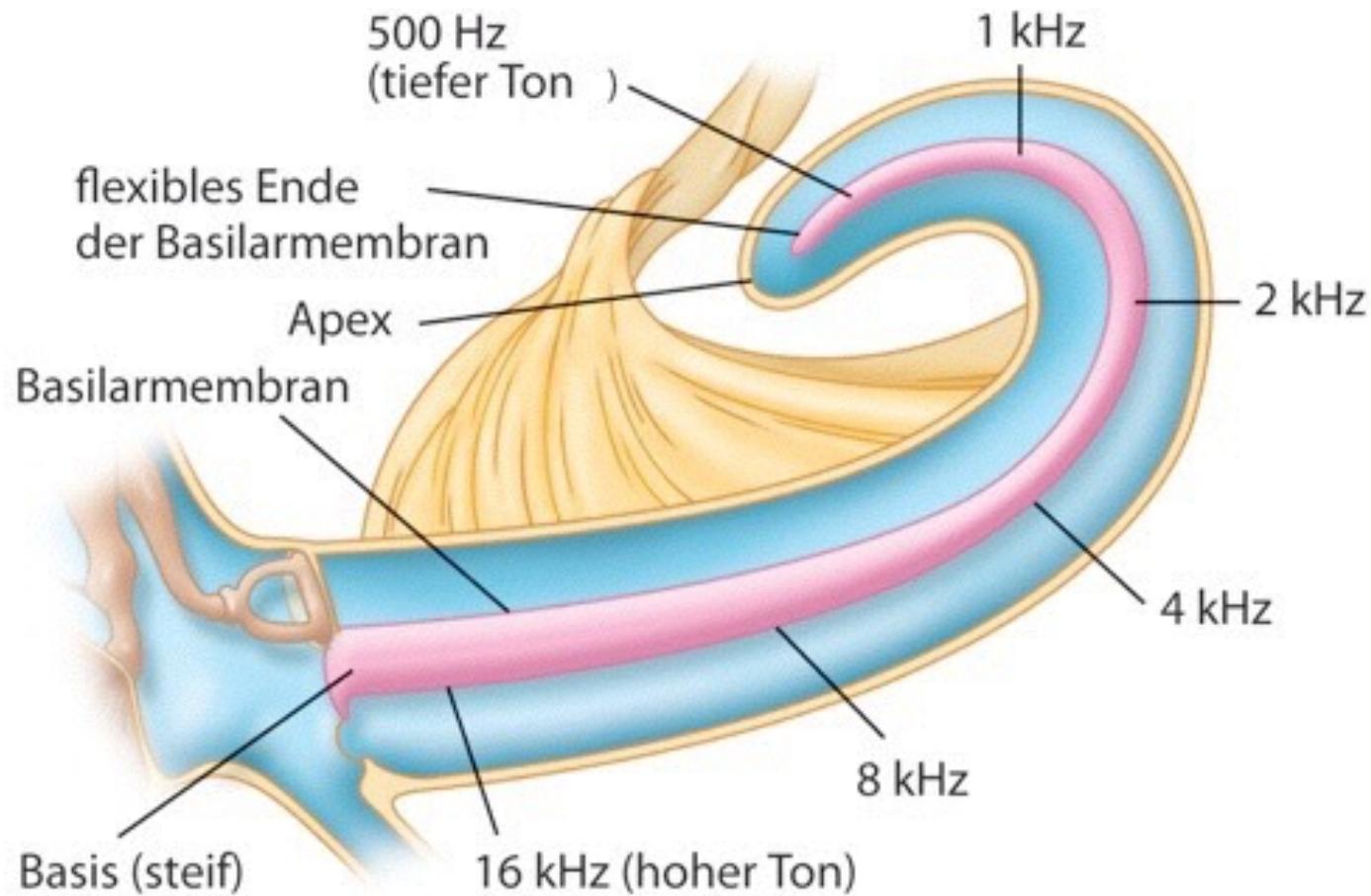
Mittelohr

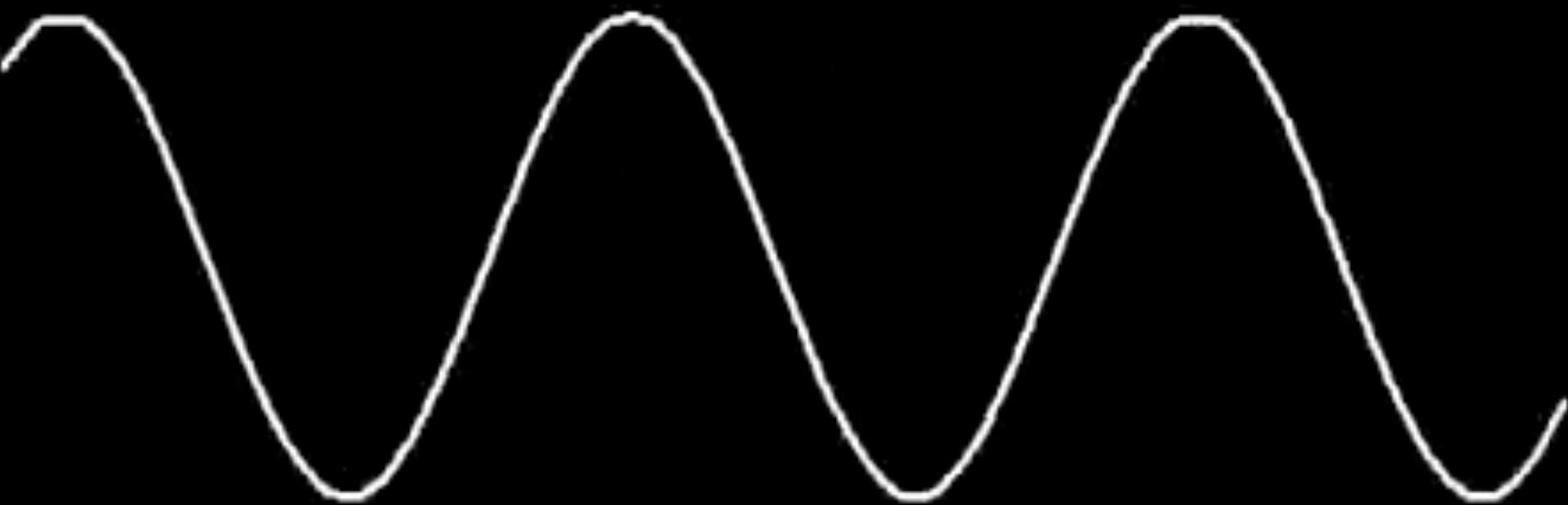
Trommelfell

- **Trommelfell** ist dünne (0,1 mm), kegelförmige Hautschicht, die zwischen Gehörgang und Mittelohr liegt
 - **Verdichtung** und **Verdünnung** des Luftdrucks führt dazu, dass Schallwellen im Ohrkanal **Trommelfell** vor und zurück schieben
- Vibration des **Trommelfells**

Gehörschnecke

Sensitivität







Zentrales Hören

1. **Transduktion** (Umwandlung von Schallwellen in neuronale Impulse)
2. **Gruppierung** der Klangbilder
3. **Szenenanalyse** und **Extraktion** von auditiven Eigenschaften
4. **Interpretation** der auditiven Umgebung

Geräuschlokalisierung

- **Lokalisierung** (Bestimmung von Richtung und Distanz) von **Geräuschquellen** wird durch **interaurale Unterschiede** und **Form der Ohrmuschel** abgeleitet
- **Lokalisierungsfähigkeit** des auditiven Systems ist sehr limitiert

Geräuschlokalisierung

Distanzhinweise

- **Interaurale Unterschiede**
 - Phasenverschiebung der Frequenzen
 - Interaurale Lautstärkenunterschiede
 - Dämpfung durch Ohrmuschel
- **Geräuschspektrum:** entfernte Geräusche klingen gedämpfter
- **Lautstärke:** entfernte Geräusche sind leiser

Geräuschlokalisierung

Distanzhinweise

- **Bewegungsparallaxe:** nahe Geräusche bewegen sich schneller am Hörer vorbei als entfernte
- **Reflektionen:** in geschlossenen Räumen erreicht direktes Geräusch Hörer schneller als die Reflektionen; Verhältnis gibt Aufschluss über Distanz

Geräuschlokalisierung

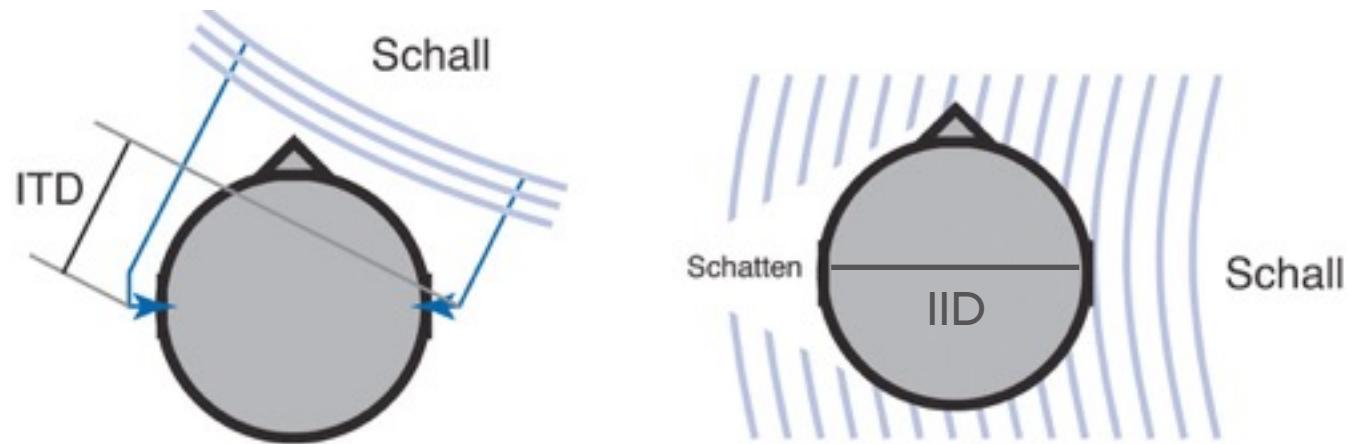
Bsp: Interaurale Differenzen

- **Interaurale Zeitdifferenz (engl. interaural time difference, ITD)**
 - zeitlicher Unterschied zwischen Hören mit linkem und rechtem Ohr
- **interaurale Intensitätsdifferenz (engl. interaural intensity difference, IID)**
 - Intensitäts-Unterschied zwischen Hören mit linkem und rechtem Ohr

Interaurale Differenzen

Head-Related Transfer Functions

- Unterschiede der Signale, welche linkes und rechtes Ohr erreichen, lassen sich durch **Head-related Transfer Functions (HRTFs)** spezifizieren

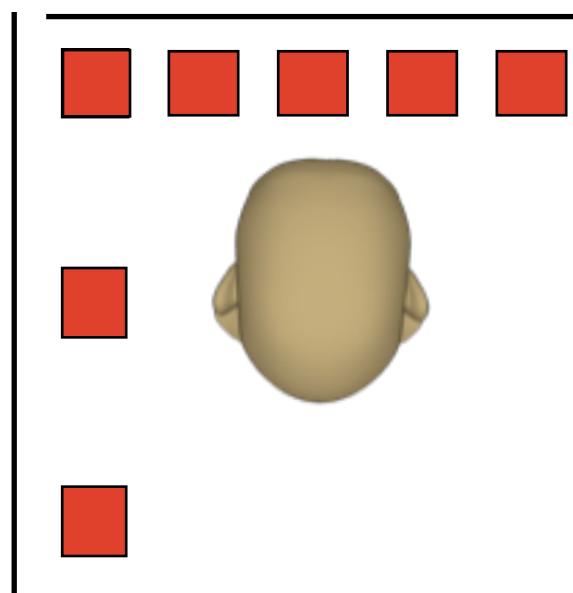


Geräuschlokalisierung

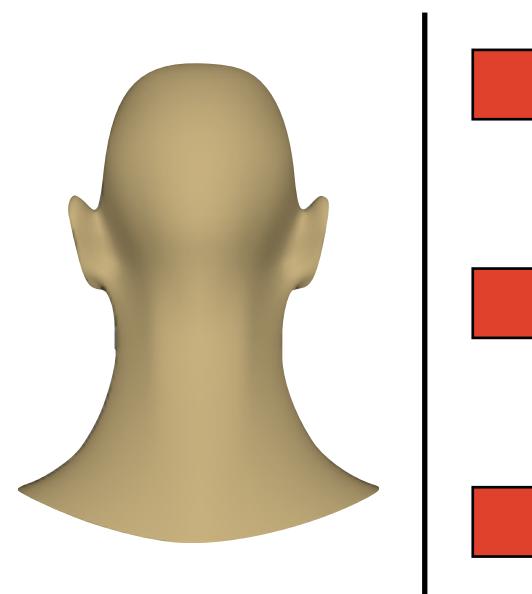
Beispiel

Horizontal: ca. 5 Quellen

Tiefe: ca. 3 Quellen



Vertikal: ca. 3 Quellen



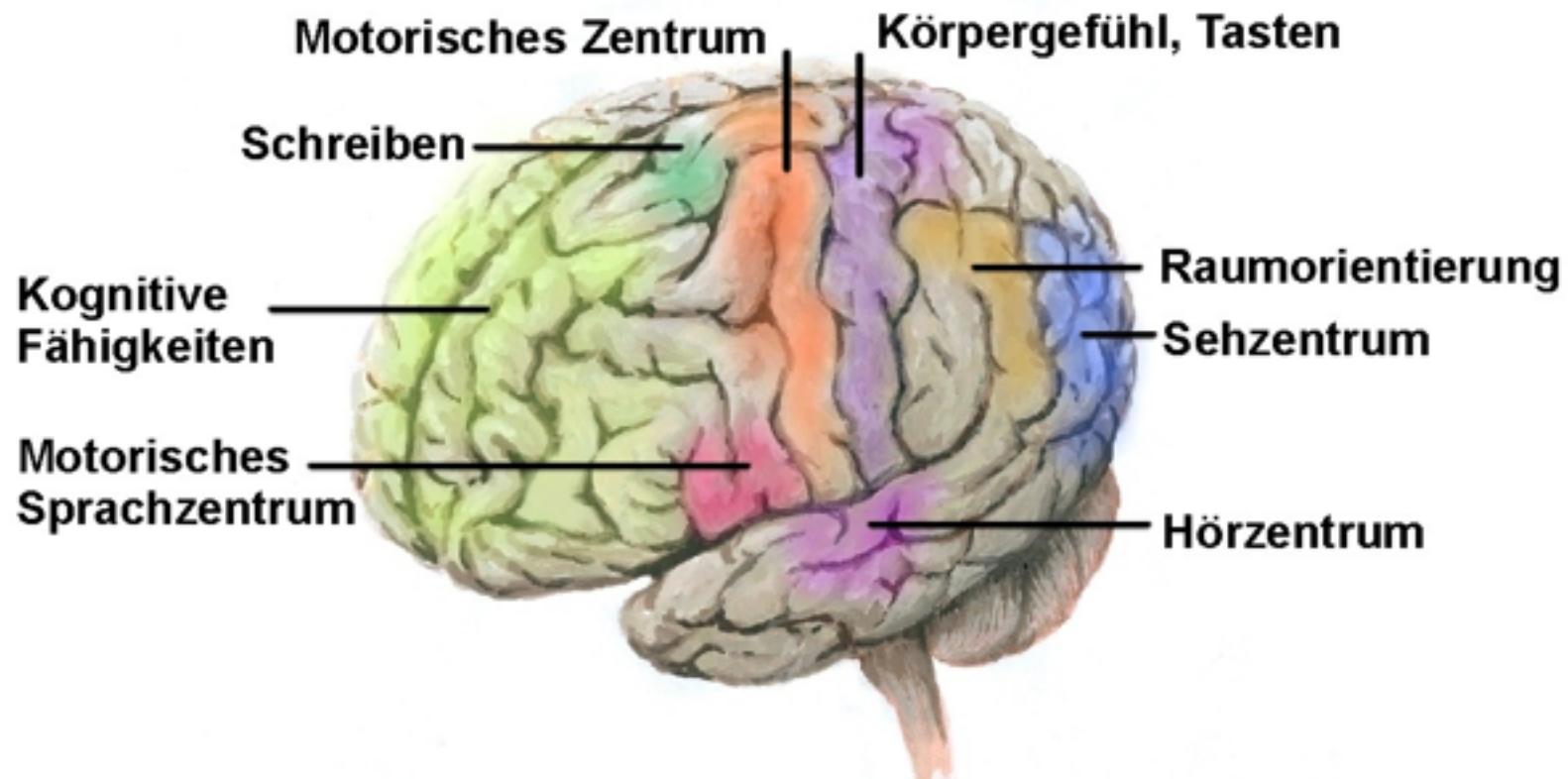
Hören

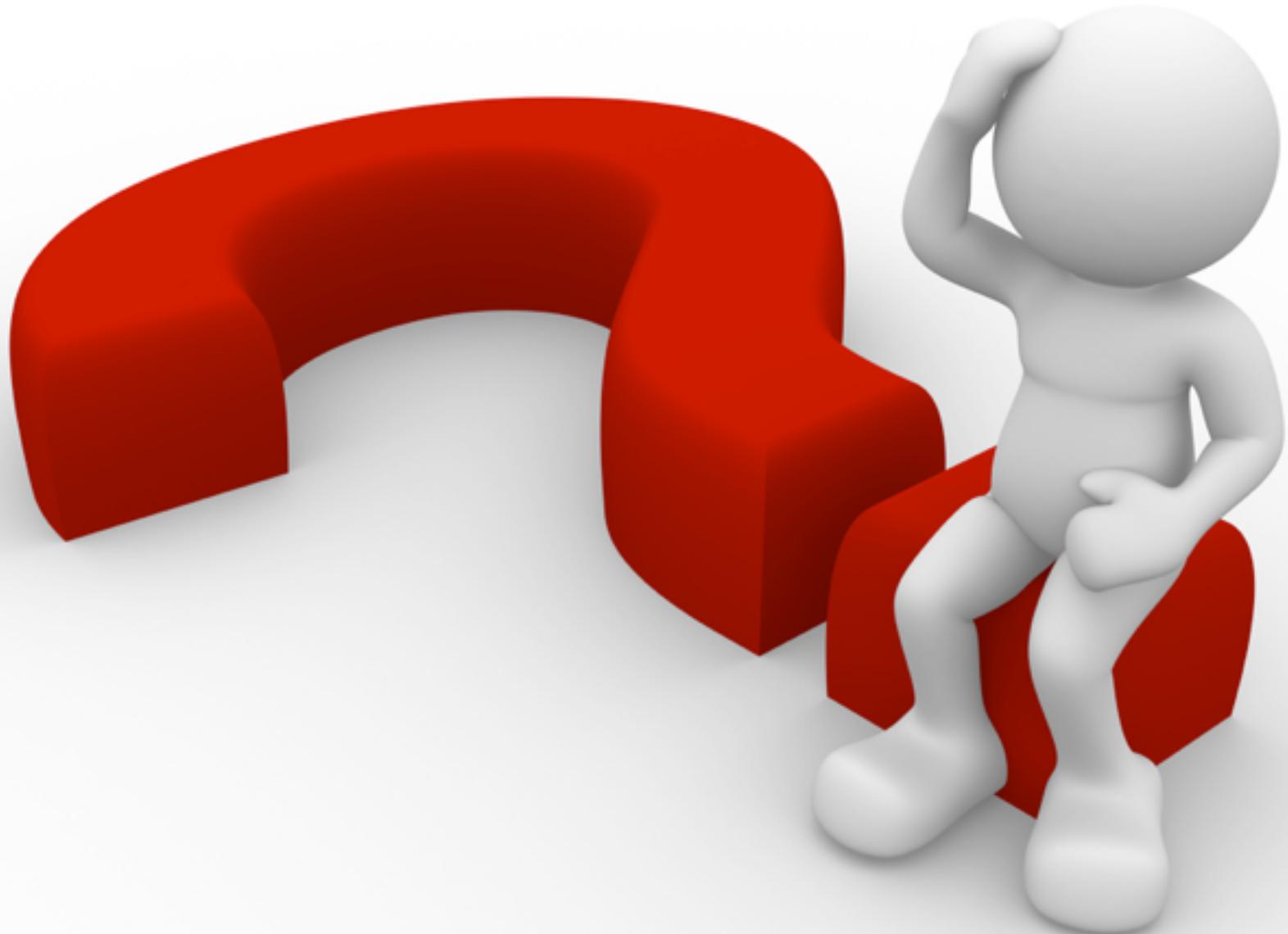
Untergliederung

- **Periphere Teilstufen:** Außen- und Mittelohr dienen Schallaufnahme und -weiterleitung
- **Zentrale Teilstufen (Zentrales Hören):**
 - Verarbeitung: Vorverarbeitung auditiver Signale in zentraler Hörbahn
 - Wahrnehmung: bewusste Auswertung ankommender Informationen im zentralen auditiven Kortex

Gehirn

Auditiver Kortex





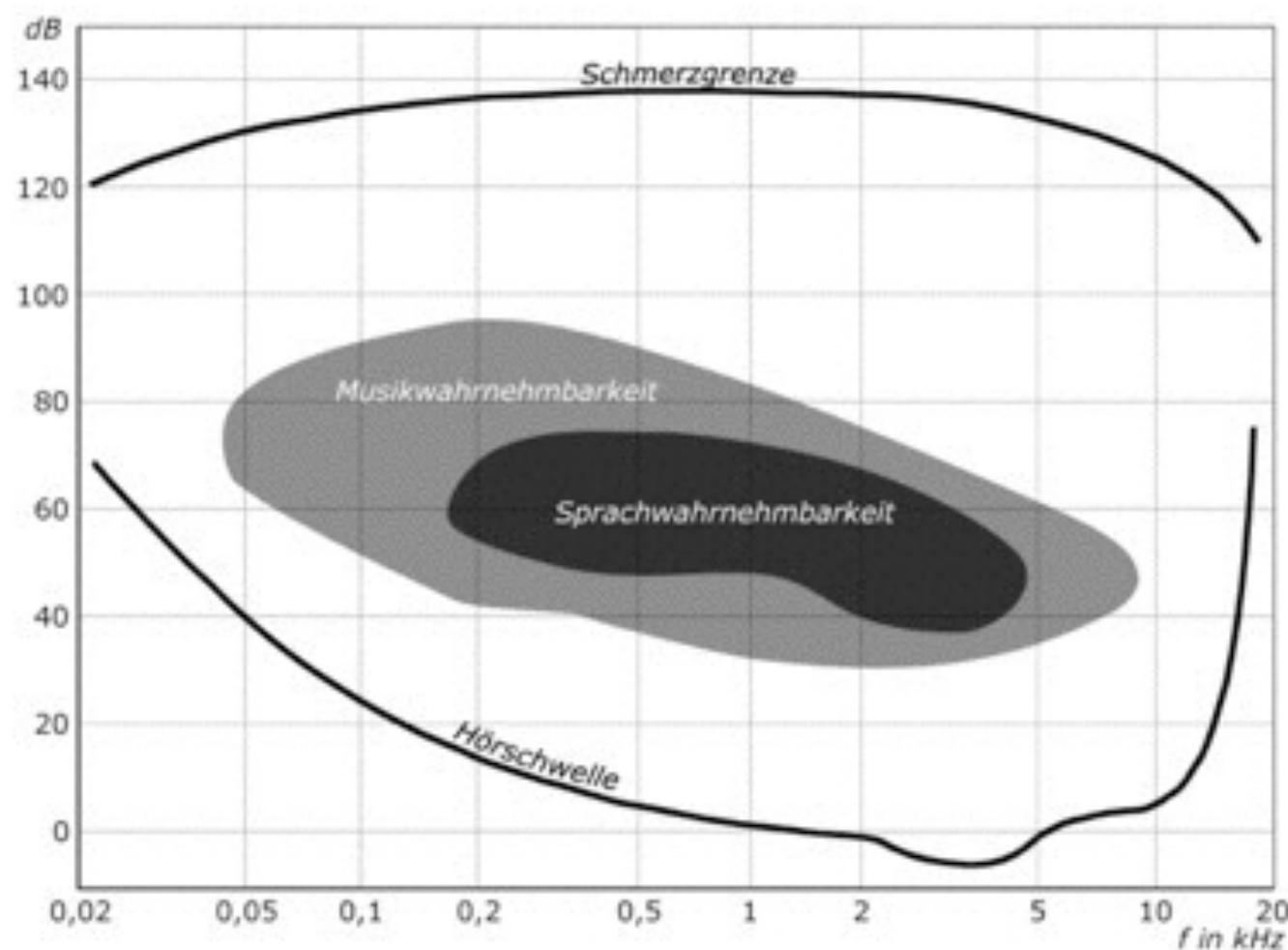


Interaktive Medien

Kapitel Audio

Audiokompression

Lautstärke Wahrnehmung



Digitalisierung

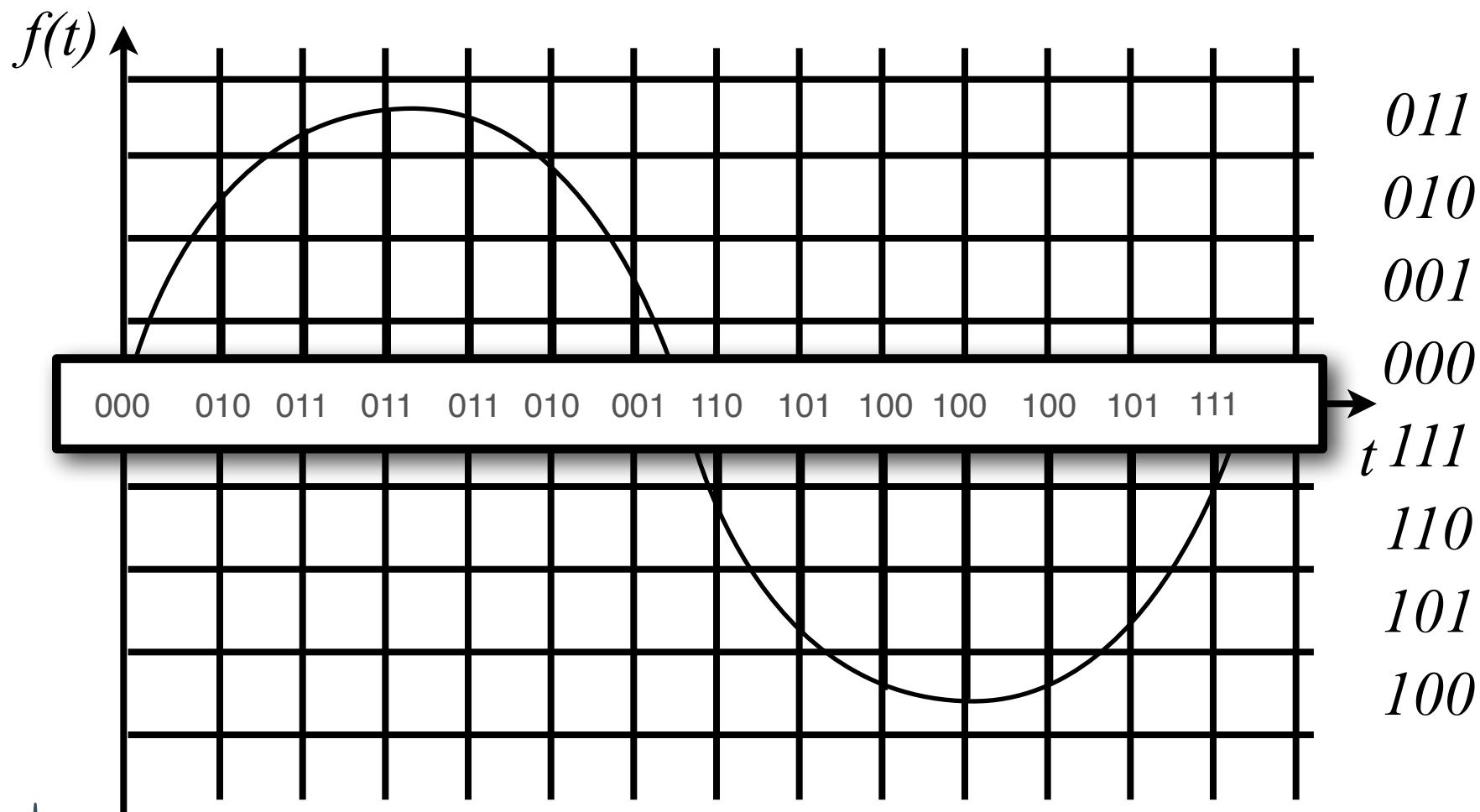
- Beschränkung bei Digitalisierung auf hörbaren Bereich des Menschen
 - ca. 20Hz bis 20kHz
 - ca. 0dB (Hörschwelle) bis 120dB (Schmerzgrenze)
- wegen Abtast-Theorems wird Audio-CD mit 44.100Hz abgetastet werden
 - 8 - 24 Bit Auflösung (bspw. 16 Bit)

Codierung

- **Pulse Code Modulation (PCM)** ist klassische Vorgehensweise
- **Messwerte** (engl. **Samples**) werden als Bitfolgen hintereinander geschrieben
- Bsp: Standard G.711 für digitale Telefonie (z.B. ISDN oder VoIP)
 - 8 kHz und 8 Bit => Bandbreite eines ISDN-Trägerkanals: 64 kBit/s

Codierung

Beispiel: 3-Bit





Diskussion



Wieviel Minuten Audio (in Stereo) können Sie in etwa auf eine ca. 650MB große Audio-CD (PCM) aufnehmen?

Diskussion



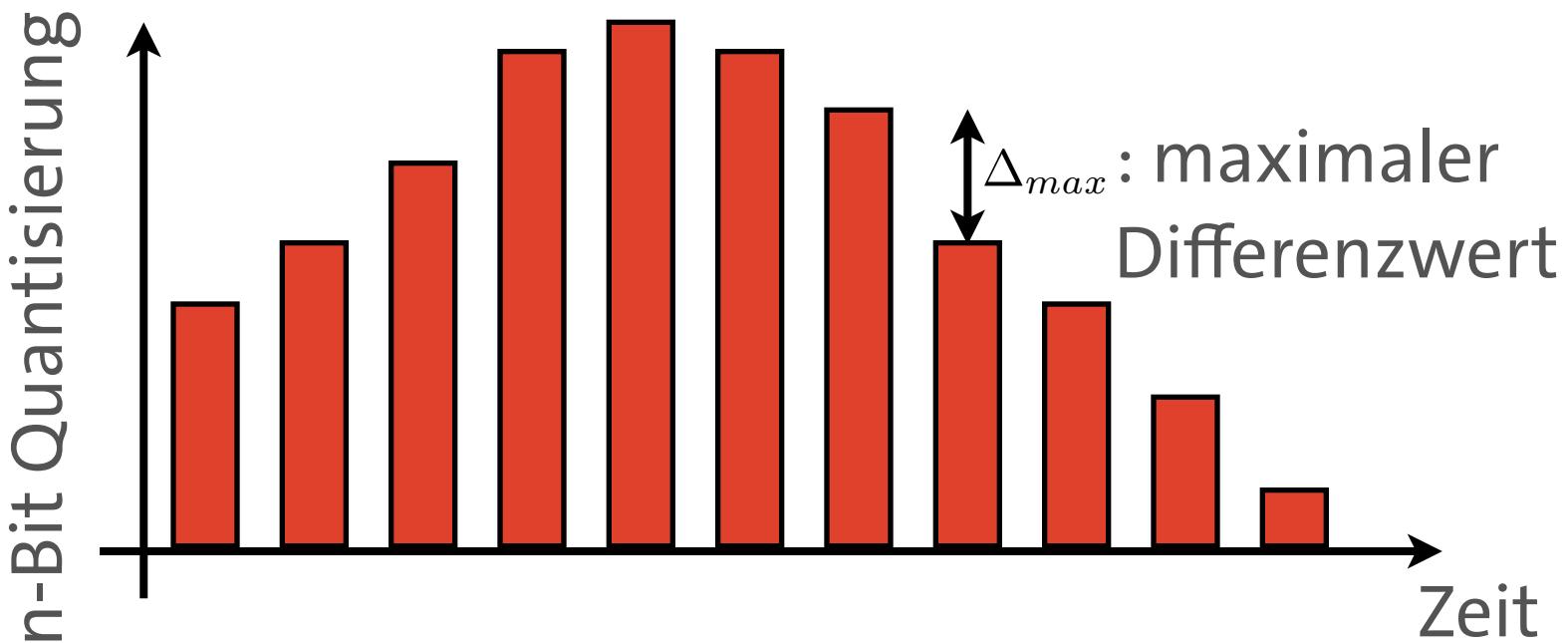
Welche Ideen haben Sie, um die Anzahl der Bits bei PCM zu reduzieren?

Codierung

- **Differential Pulse Code Modulation (DPCM)**
 - Übertragung der Differenz zwischen zwei Messsignalen statt absoluter Werte
 - **Adaptive Differential Pulse Code Modulation (ADPCM)**
 - Anzahl der für Differenz verwendeten Bits ist variabel
- verlustfreie Codierungen

Codierung

DPCM



- Speicherbedarf bei DPCM: notwendige Bits für Startwert + Zeit * Abtastrate * notwendige Bits für Δ_{max}

Codierung

- **Differential Pulse Code Modulation (DPCM)**
 - Übertragung der Differenz zwischen zwei Messsignalen statt absoluter Werte
 - **Adaptive Differential Pulse Code Modulation (ADPCM)**
 - Anzahl der für Differenz verwendeten Bits ist variabel
- verlustfreie Codierungen

Audioformate

(verlustfreie) Beispiele

- WAV: Waveform Audio File
 - entwickelt von Microsoft und IBM
- AIFF: Audio Interchange File Format
 - entwickelt von Apple und Electronic Arts
- CD-DA: Compact Disc Digital Audio
 - entwickelt von Philips und Sony
- FLAC: Free Lossless Audio Codec
 - entwickelt von Xiph.Org Foundation

Audio-Kompression

- verlustfreie Kompressionsverfahren: begrenzte Reduktion des Speicherbedarfs
- Anwendung **spezieller verlustbehafteter Kompressionsverfahren**
- Beispiele:
 - MP3-Kompression (MPEG-1 Audio Layer III)
 - Advanced Audio Coding (AAC)
 - MPEG-H for spatial audio

MPEG

- Standardisierungsgremium **Moving Picture Expert Group (MPEG)** arbeitet seit 1988 an Video- und Audiokompression
- MPEG-1 und MPEG-2 beschreiben Formate für digitales Video mit integriertem Audio
- Formate besitzen verschiedene Varianten (**Layer**), die Aufwand und Qualität der Codierung angeben

MP3-Kompression

- **MPEG-1 Audio Layer III (kurz MP3)** ist Verfahren zur verlustbehafteten Kompression digitaler Audiodaten
- Dateiendung .mp3
- MPEG-Audio-Standards werden auch verwendet bei
 - DAB (Digital Audio Broadcast)
 - DVB (Digital Video Broadcast)

MPEG-1 Audio Layer

Beispiele

Verfahren	Kompressionsrate	Anwendungsbereiche
Originaldaten	-	Audio-CD
Layer I (384 kBits/s)	1:4	Digital Compact Cassette (DCC)
Layer II (256...192 kBits/s)	1:6-1:8	Digital Audio Broadcast (DAB), DVD
Layer III (128...112 kBits/s)	1:12	Internet Radio, Satellitenradio



MPEG-1 Audio Layer III

Beispiele: Klangqualität

Klangqualität	Modus	Bitrate	Komprimierung
Telefon	Mono	8 kBit/s	1:96
Besser als Kurzwelle	Mono	16 kBit/s	1:48
Besser als Mittelwelle	Mono	32 kBit/s	1:24
UKW	Stereo	56-64kBit/s	1:24
Ähnlich wie CD	Stereo	96 kBit/s	1:16
CD-Qualität	Stereo	128 kBit/s	1:12

MP3-Kompression

- MP3 basiert auf psychoakustischem (d.h. empirisch ermittelten) Modell der Tonwahrnehmung
- MP3 nutzt **Maskierungseffekte** bezüglich **27 kritischer Bänder**, welche Frequenzbereiche beschreiben, in denen Töne stärker als bestimmter Schwellwert miteinander integrieren

MPEG-1 Audio Layer III

Beispiel: 128 kBit/s



MPEG-1 Audio Layer III

Beispiel: 64 kBit/s



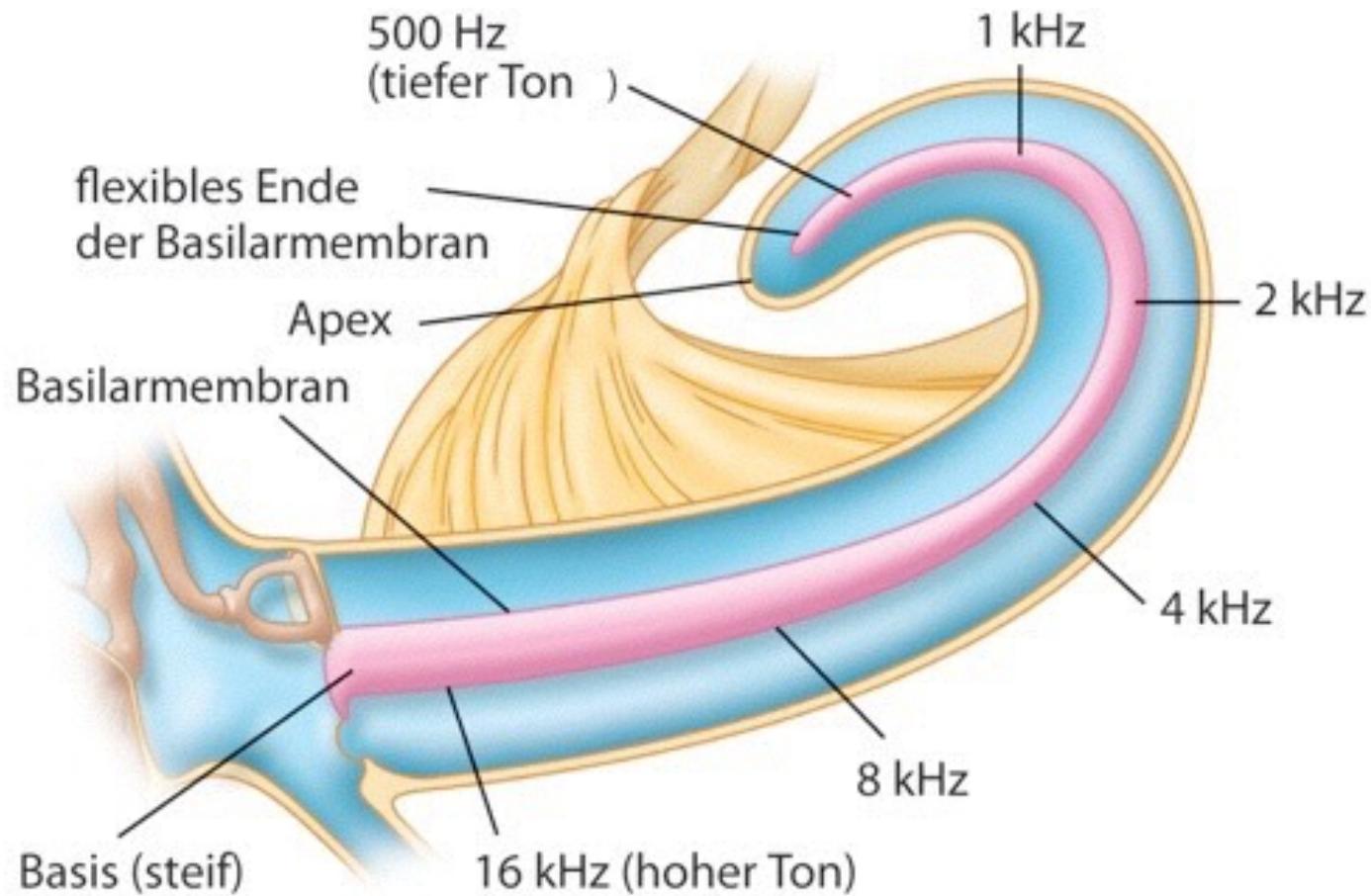
MPEG-1 Audio Layer III

Beispiel: 8 kBit/s



Gehörschnecke

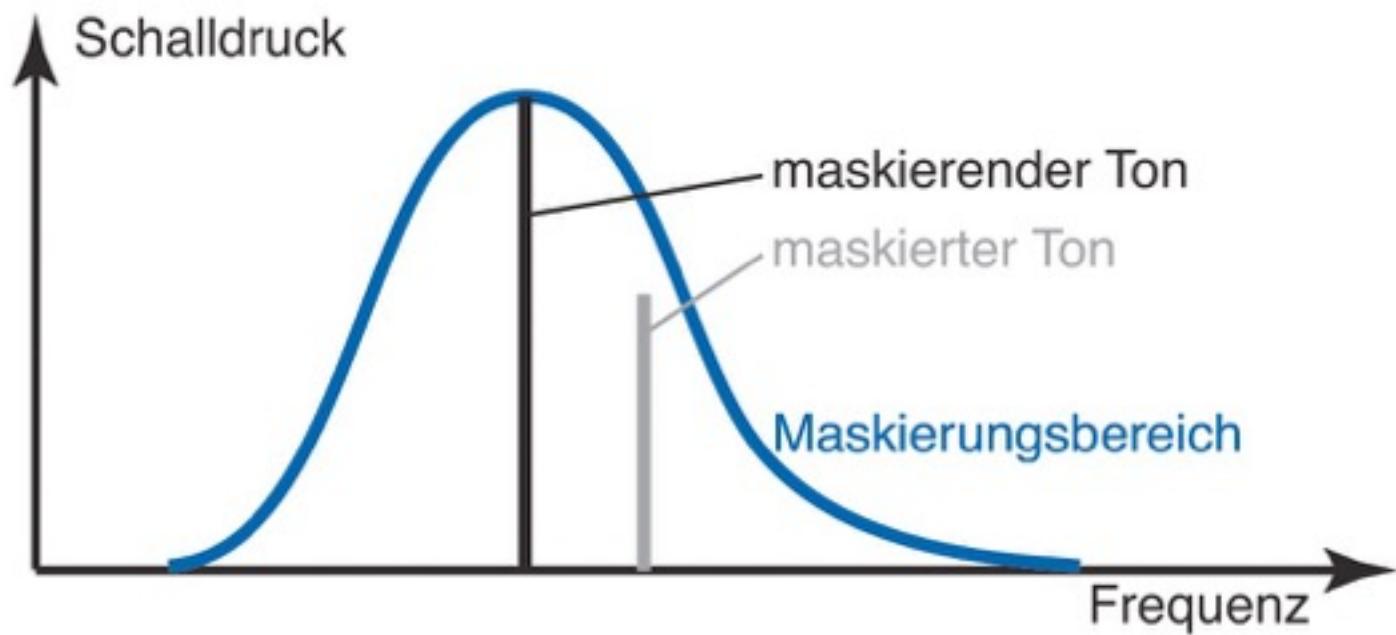
Sensitivität



Maskierung

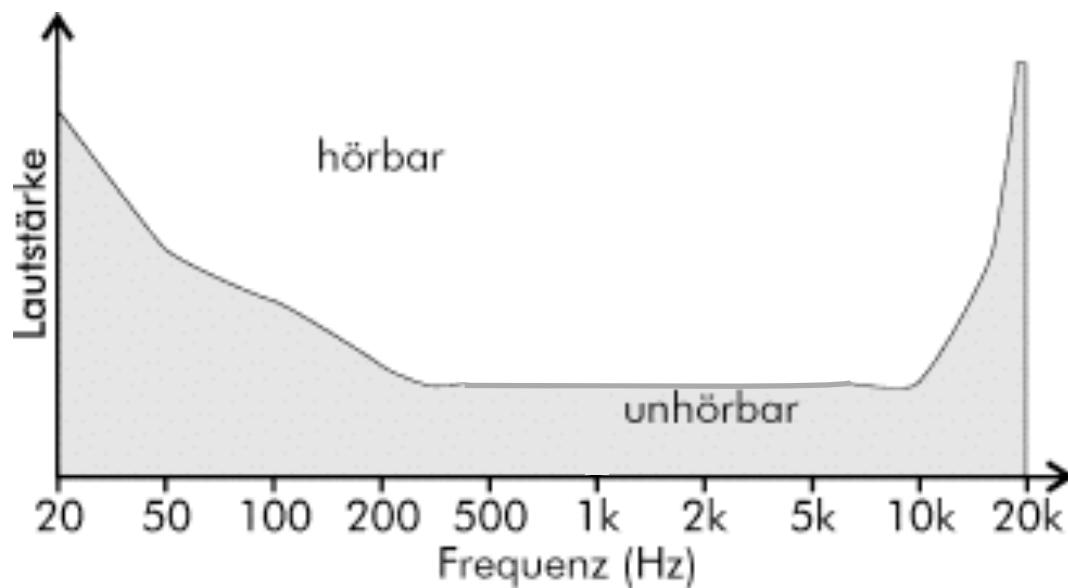
Simultane Frequenzmaskierung

- **Maskierung** eines Tons durch weiteren Ton tritt auf, falls zweiter Ton ähnlicher Frequenz deutlich lauter ist

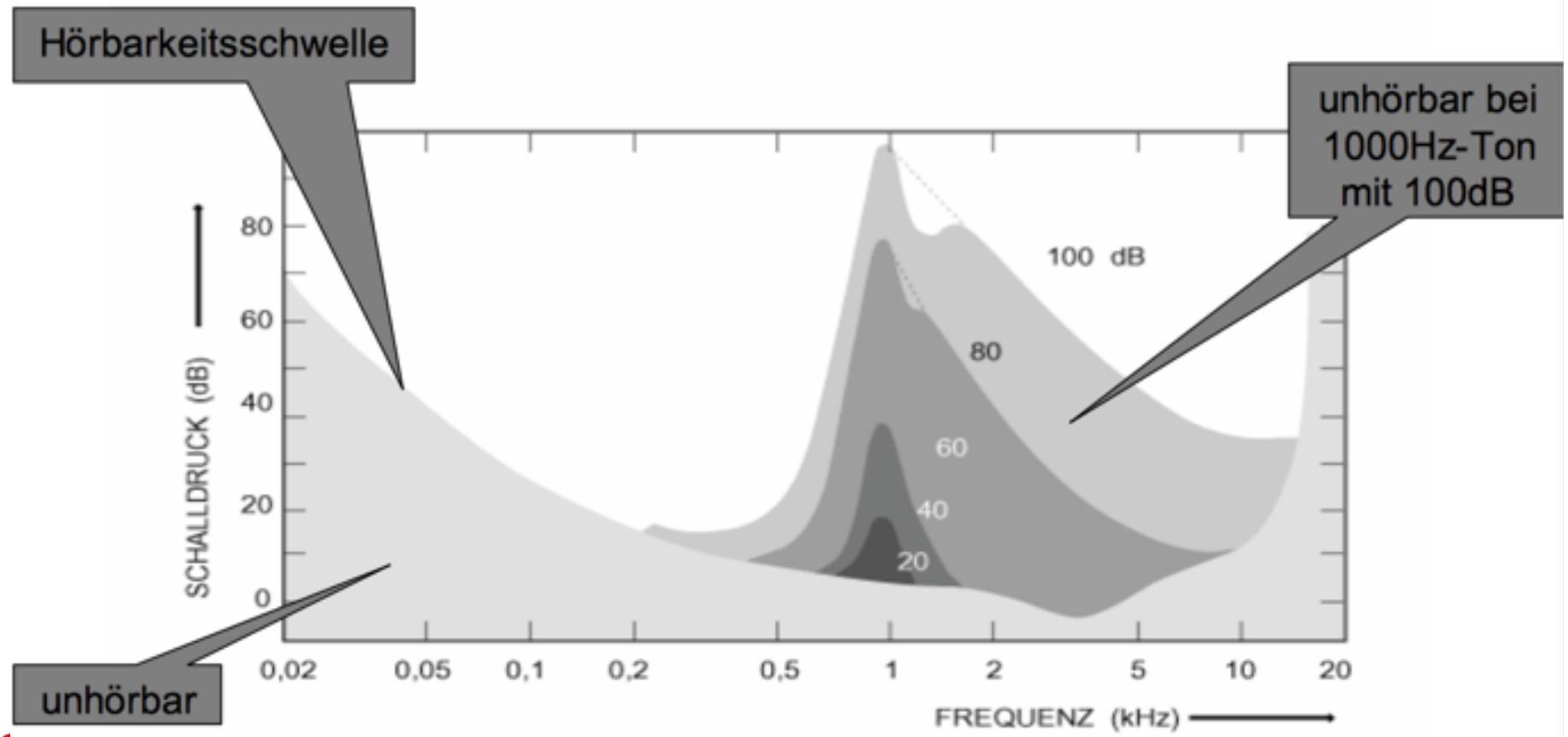


Modifizierte Hörschwelle

- Präsenz eines Signals modifiziert Hörschwelle, da Gehör in Umgebung dieser Frequenz weniger empfindlich wird



Modifizierte Hörschwelle



Maskierungseffekte

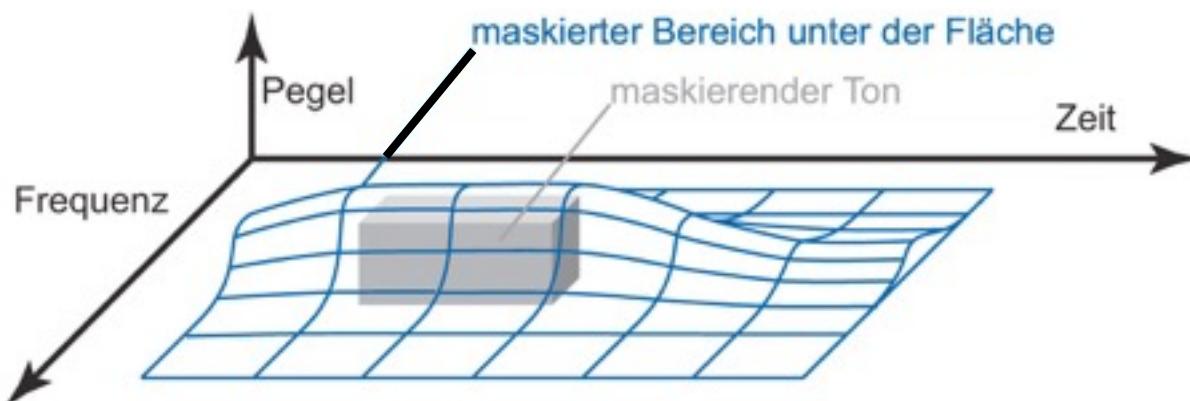
Vor- & Rückwärtsmaskierung

- Erweiterung von Maskierungseffekten auf Dimension Zeit führt zu weiteren Maskierungseffekten
 - **Vorwärtsmaskierung**
 - **Rückwärtsmaskierung**

Maskierungseffekte

Vorwärtsmaskierung

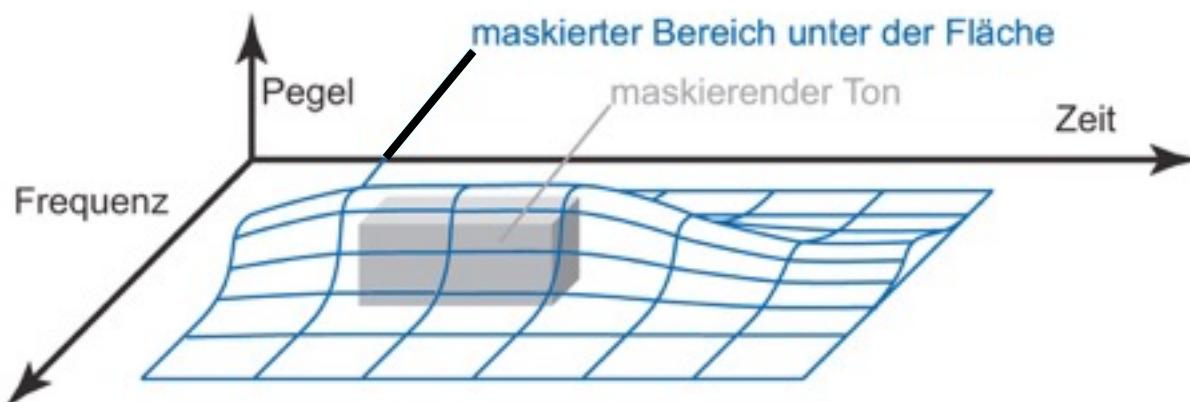
- Tonsignal schwächt Wahrnehmung späterer (bis max. 200 ms) Tonsignale in Umgebung
- Haarzellen benötigen **Erholungszeit** (engl. **Recovery Time**) nach lauterem Signal



Maskierungseffekte

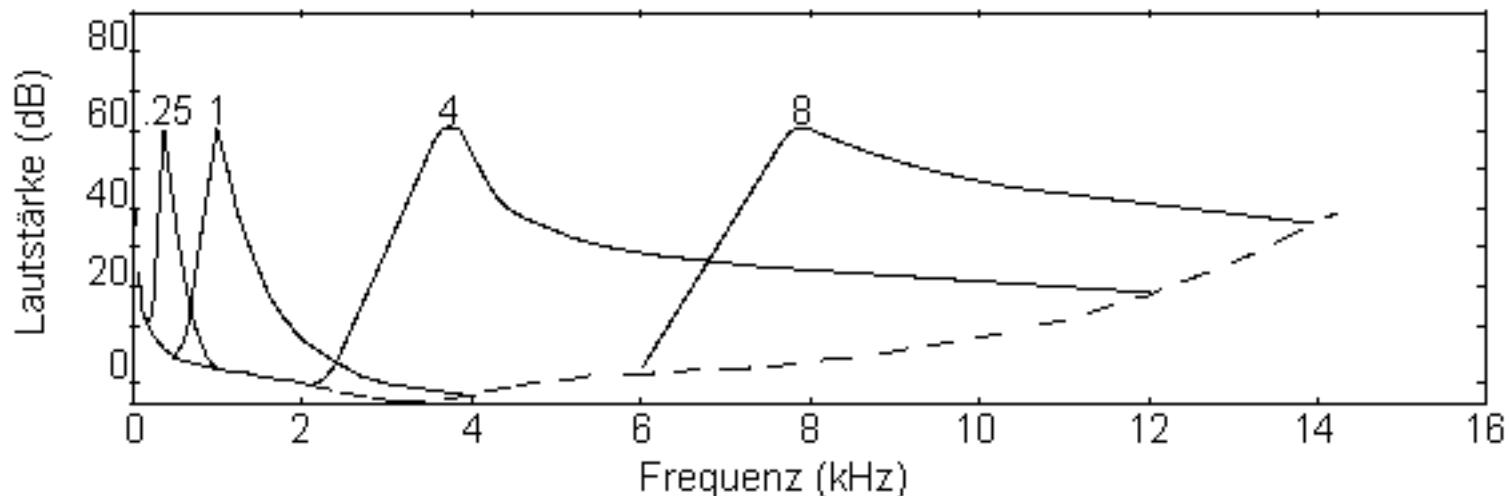
Rückwärtsmaskierung

- Bei **Rückwärts-Maskierung** maskiert verschleiernder Ton den zuvor (10...20 ms) aufgetretenen Ton
- während dieser Zeit wird ähnlicher, leiserer Ton nicht wahrgenommen



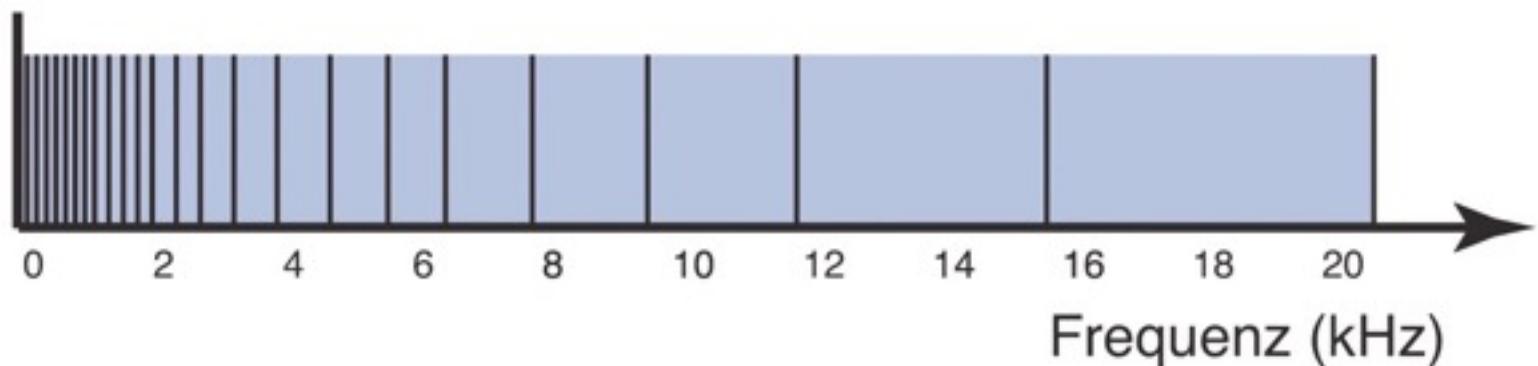
Kritische Bänder

- **Kritische Bänder** sind Frequenzbereiche, in denen Töne andere Töne stärker als bestimmter Schwellwert beeinflussen (z.B. **Maskierung**)



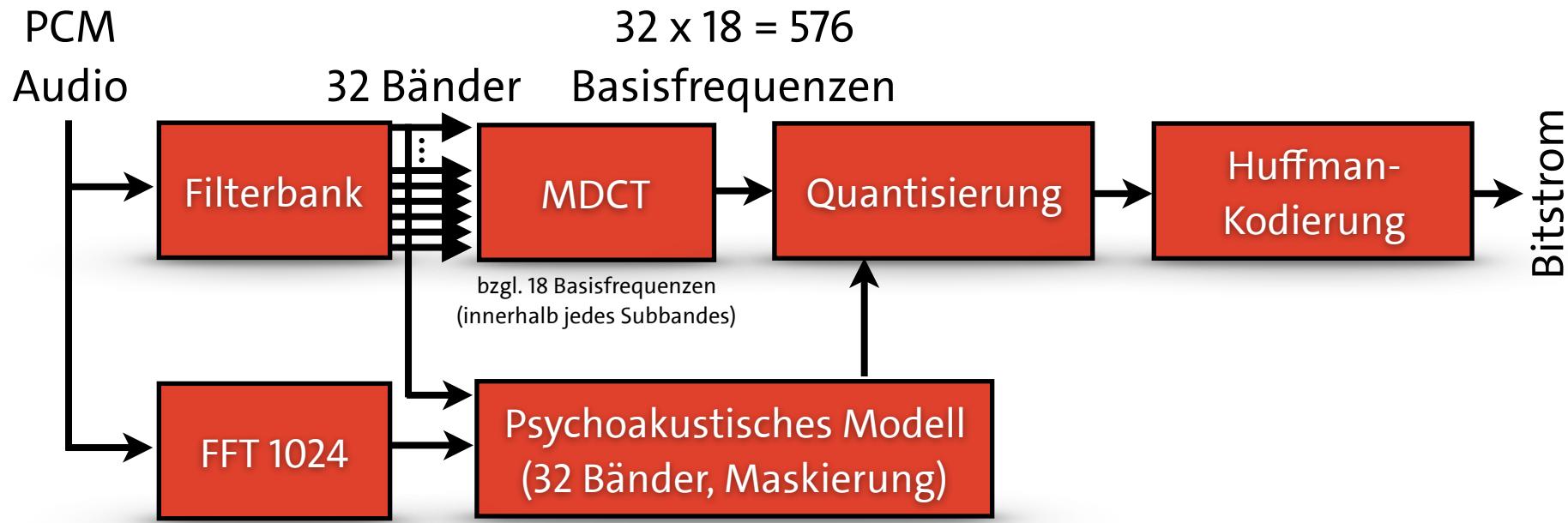
Kritische Bänder

- **Kritische Bänder** sind Frequenzbereiche, in denen Töne andere Töne stärker als bestimmter Schwellwert beeinflussen (z.B. **Maskierung**)



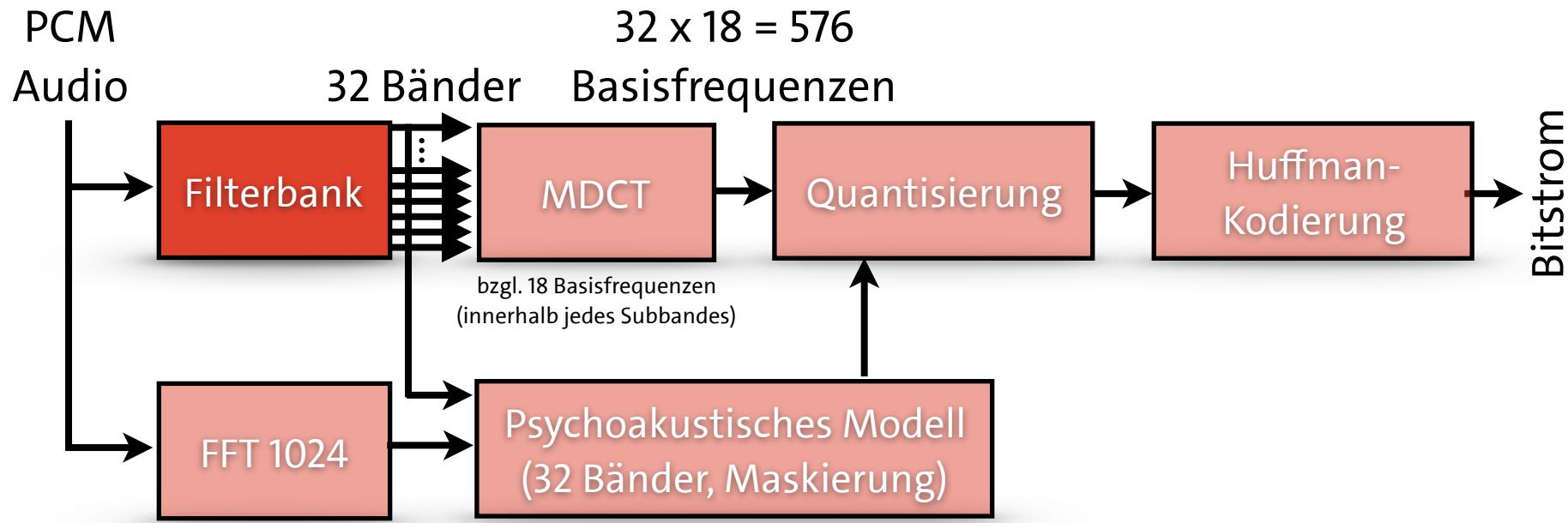
MP3-Kompression

Algorithmus



MP3-Kompression

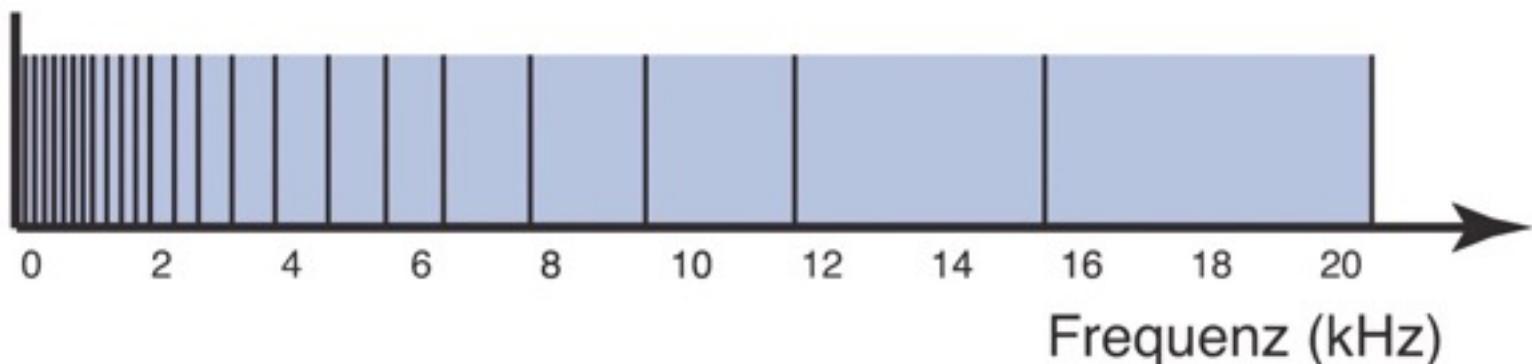
Algorithmus



MP3-Kompression

Filterbank

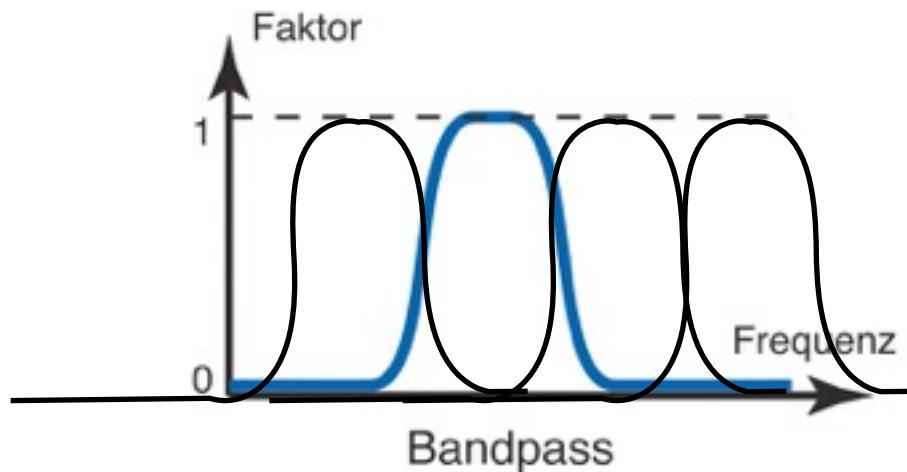
- **Filterbank** unterteilt zu kodierendes Audiosignal in 32 Subbänder, die 27 kritischen Bänder approximieren



MP3-Kompression

Bandpass-Filter

- Einordnung in 32 Subbänder durch **Bandpass-Filter**
- bei **Bandpass-Filter** werden Frequenzen zwischen beiden Grenzfrequenzen durchgelassen, andere abgeschwächt



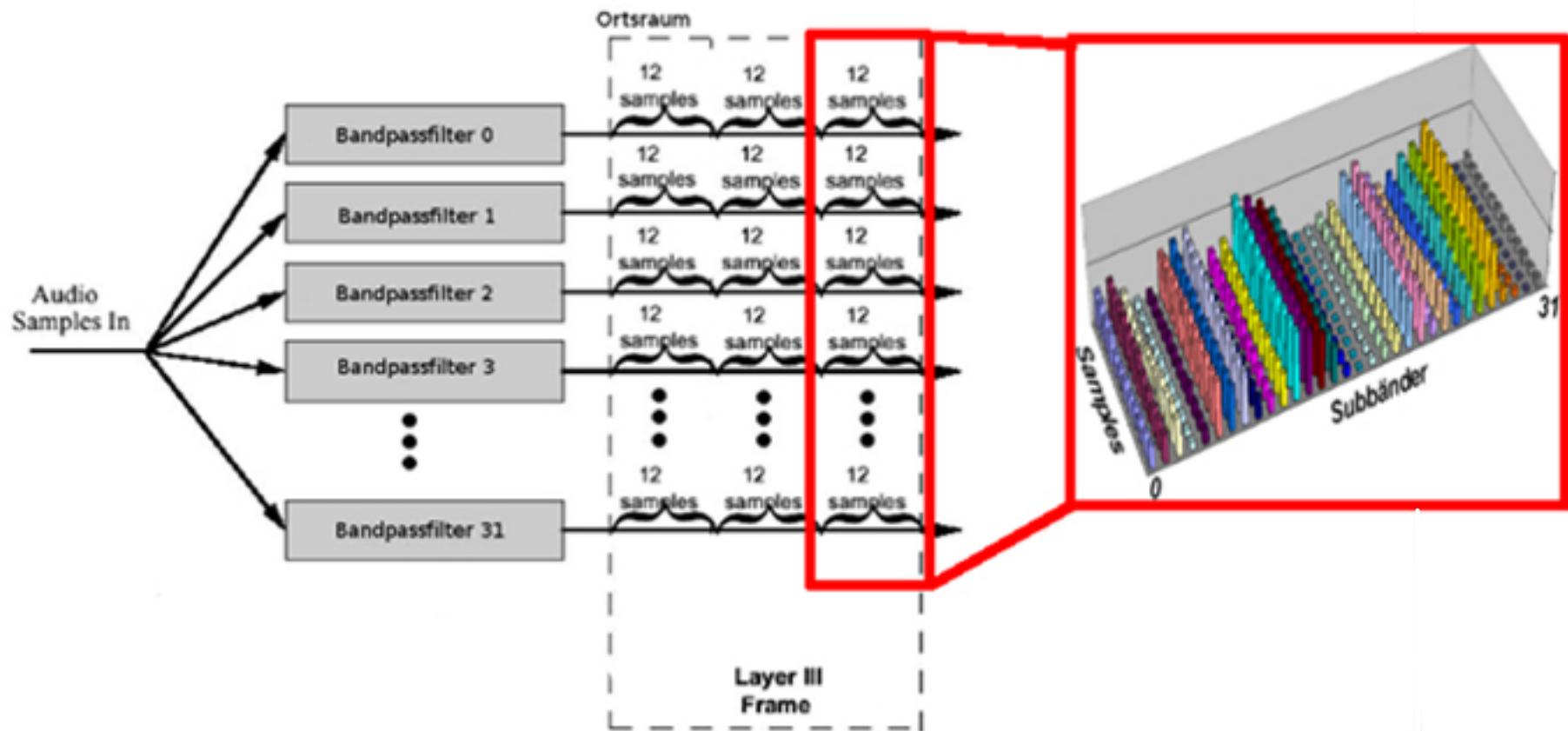
MP3-Kompression

Filterbank

- Audiosignal mit Abtastrate 44.100Hz unterteilt in Blöcke von 36 Abtastpunkten (Samples), d.h. insgesamt 1225 Blöcke pro Sekunde
- jeder Block umfasst 36 Samples in allen 32 Subbändern, d.h. insgesamt 1152 Samples pro Block

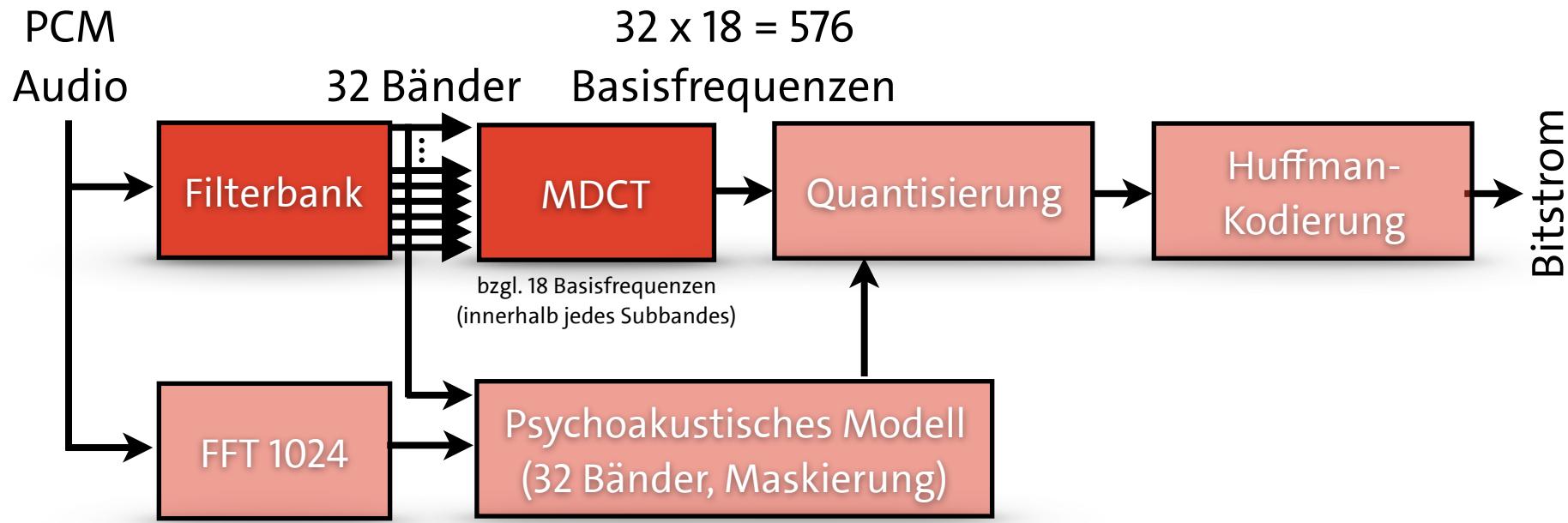
MP3-Kompression

Filterbank



MP3-Kompression

Algorithmus

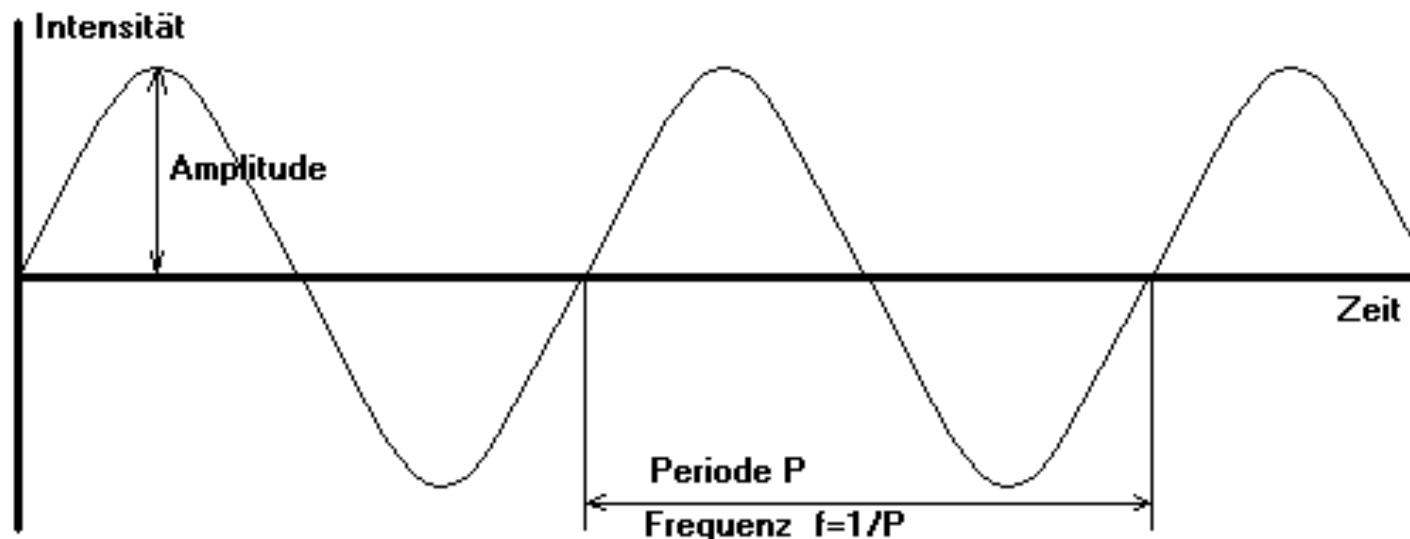


Frequenzbereich

- Betrachtung der im Audiosignal vorkommenden Frequenzen
- Umcodierung der Signalwerte vom **Zeitbereich in Frequenzbereich**
- Betrachtung für alle Subbänder getrennt

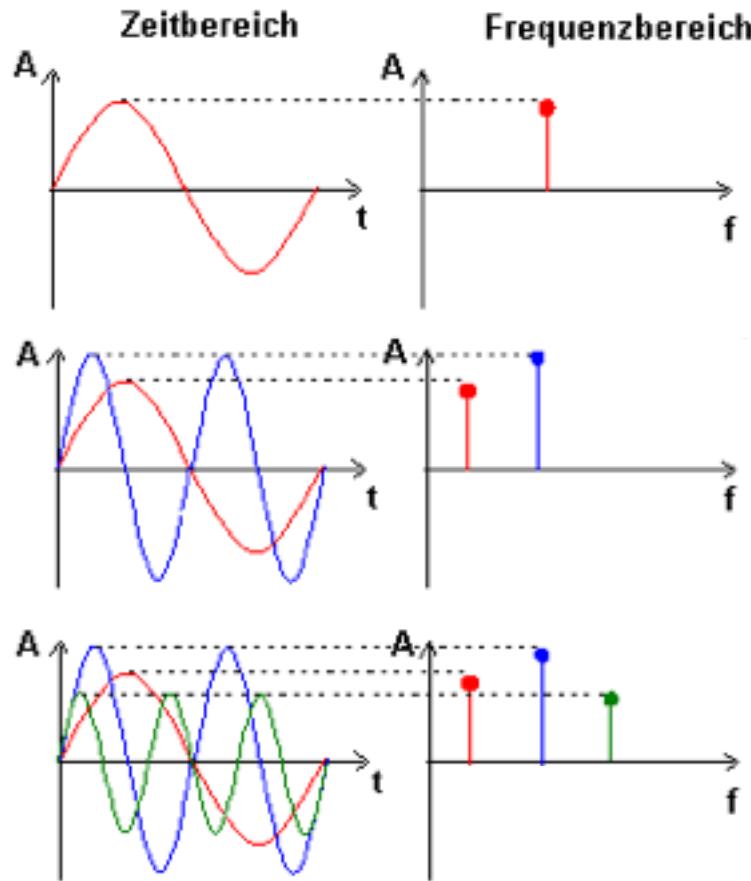
Frequenzbereich

Audiosignal



Frequenzbereich

Frequenz



Fouriertransformation

Fourier-Reihe

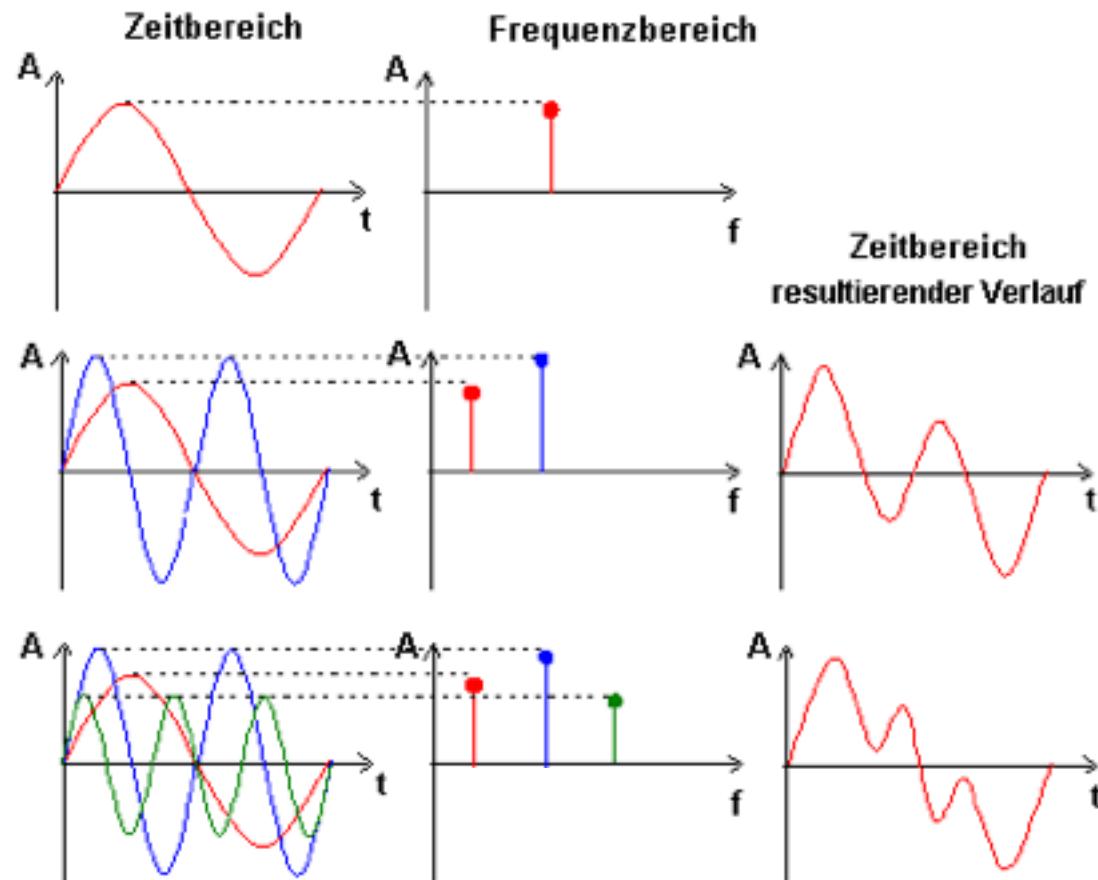
- Jede periodische Schwingung lässt sich durch unendliche Summe von sich überlagerten Kosinus-Schwingungen annähern

$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cdot \cos(k \cdot \omega_0 \cdot t + \theta_k)$$

- Grundfrequenz ω_0
- Anteil k-ten harmonische Schwingung a_k
- Phasenverschiebung der k-ten harmonischen Schwingung θ_k

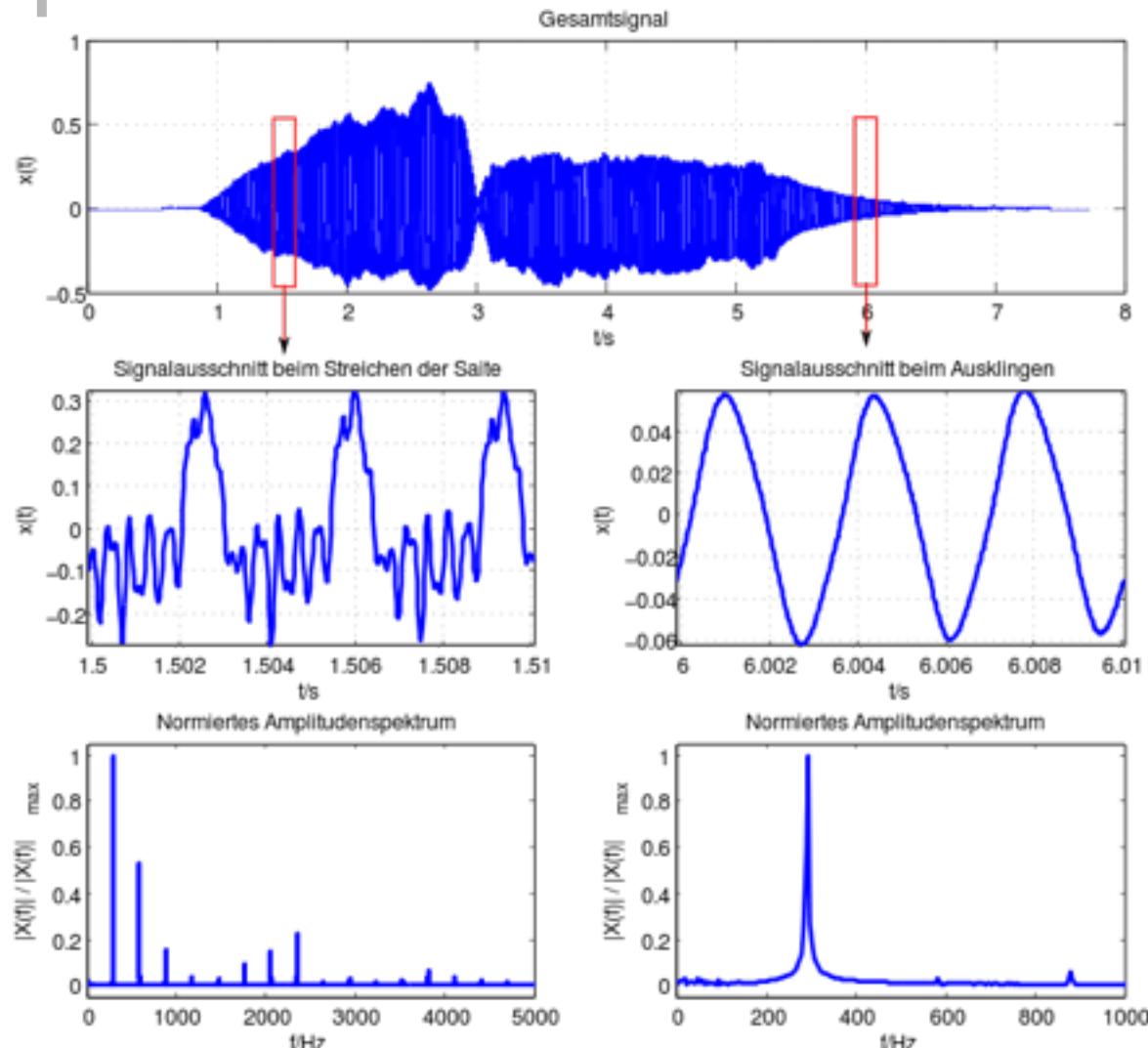
Frequenzbereich

Frequenz



Frequenzspektrum

Beispiel



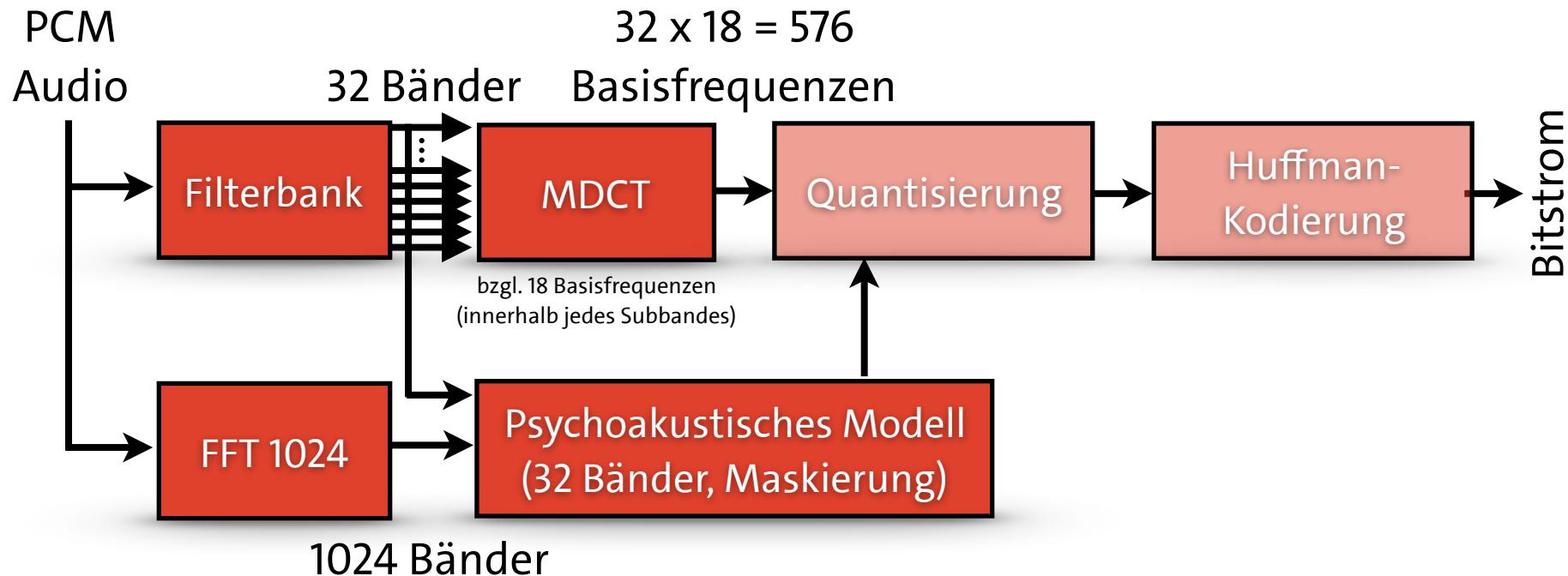
MP3-Kompression

MDCT

- 32 Subbänder werden jeweils durch **modifizierte diskrete Kosinus-Transformation (MDCT)** durch 18 **Basisfrequenzen** im jeweiligen Subband dargestellt (vgl. Basismuster bei JPEG)
- $32 \cdot 18 = 576$ **Koeffizienten** der **Basisfrequenzen**

MP3-Kompression

Algorithmus



MP3-Kompression

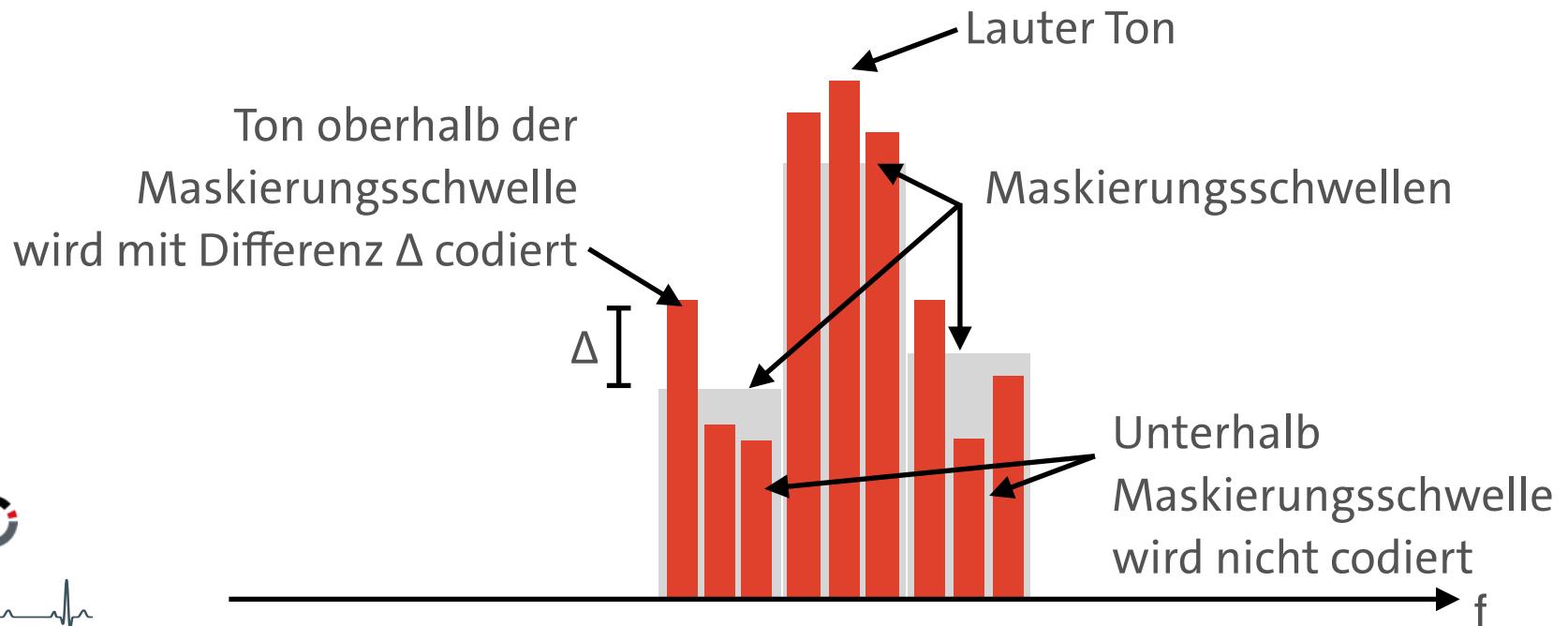
Maskierung

- **Fast Fourier Transformation (FFT)** zerlegt Frame (12 Samples) in Frequenzraum-darstellung bzgl. 1024 Bänder
- **Psychoakustisches Modell** wird ausgenutzt, um Maskierungsschwellen für Subbänder zu bestimmen
- irrelevante Signalanteile unter Maskierungsschwellen werden mit weniger Bits (oder gar nicht) zu speichern

MP3-Kompression

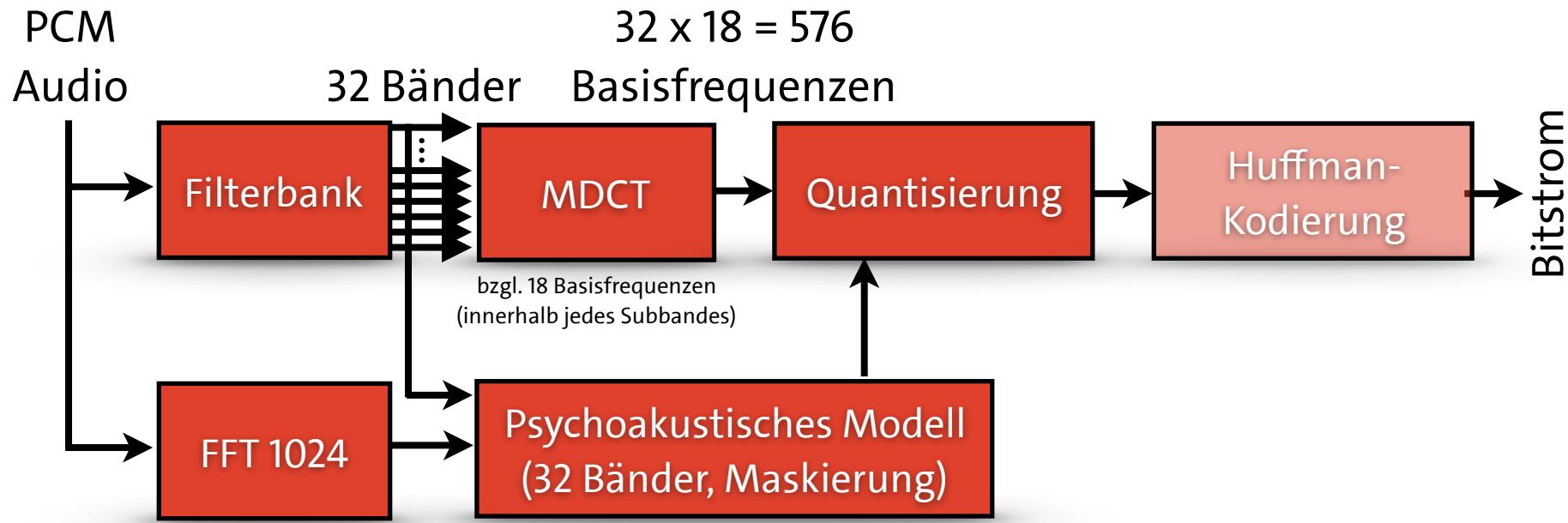
Quantisierung

- **Maskierungsschwellen** aus psycho-akustischem Modell werden mit tatsächlichen Signalpegel (pro Teilband) verglichen



MP3-Kompression

Algorithmus



Huffman-Kodierung

- nach Quantisierung sind viele Koeffizienten irrelevanter Frequenzanteile durch Nullen repräsentiert
- Koeffizienten werden mit Huffman-Codierung kodiert
- Differenzbildung bei Stereosignal (ähnlich wie bei DPCM bzw. ADPCM)

MPEG-1 Audio Layer III

Beispiele: Bitrate

Klangqualität	Modus	Bitrate	Komprimierung
Telefon	Mono	8 kBit/s	1:96
Besser als Kurzwelle	Mono	16 kBit/s	1:48
Besser als Mittelwelle	Mono	32kBit/s	1:24
UKW	Stereo	56-64kBit/	1:24
Ähnlich wie CD	Stereo	96kBit/s	1:16
CD-Qualität	Stereo	128kBit/s	1:12



"I was ready to fine-tune my compression algorithm... somewhere down the corridor, a radio was playing 'Tom's Diner.' I was electrified. I knew it would be nearly impossible to compress this warm a cappella voice."

—Karlheinz Brandenburg

MPEG-1 Audio Layer III

Beispiel: 128 kBit/s



MPEG-1 Audio Layer III

Beispiel: 56 kBit/s



MPEG-1 Audio Layer III

Beispiel: 32 kBit/s



MPEG-1 Audio Layer III

Beispiel: 16 kBit/s



MPEG-1 Audio Layer III

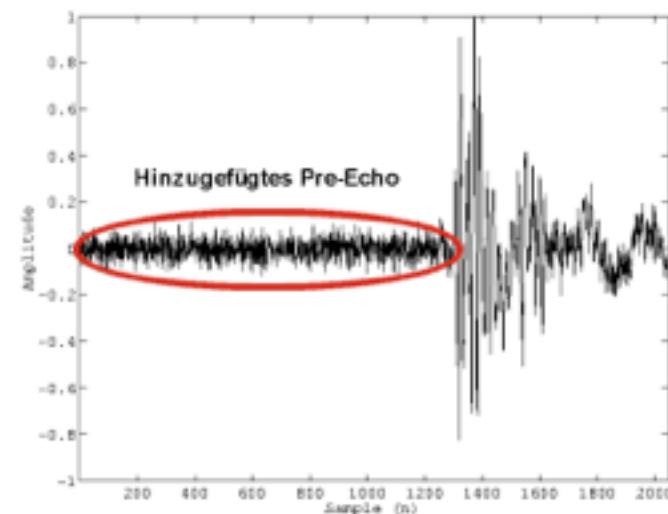
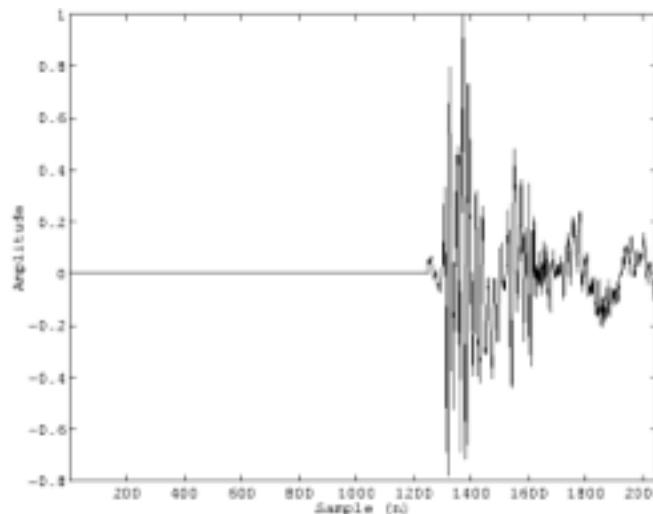
Beispiel: 8 kBit/s



MPEG-1 Audio Layer III

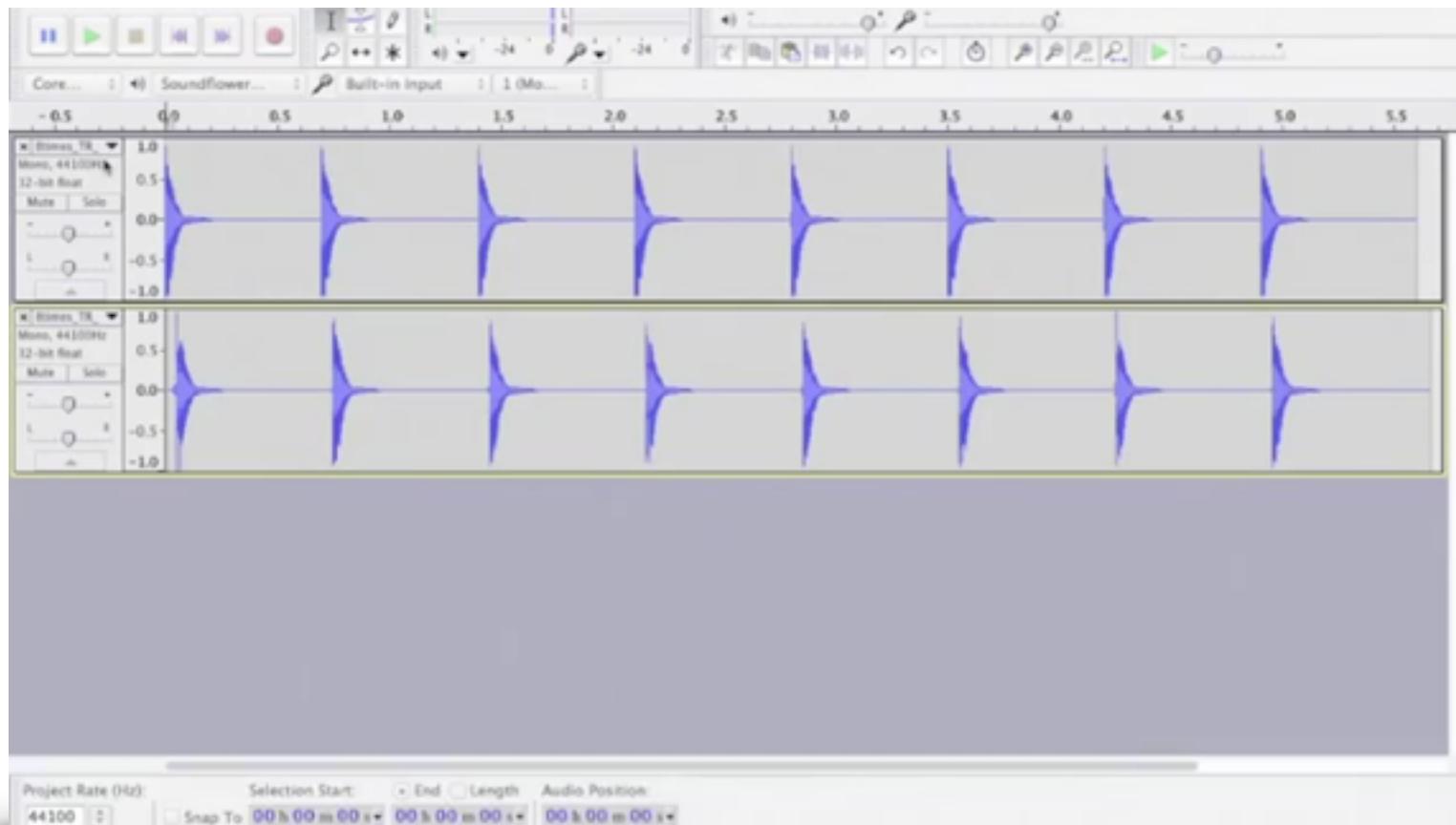
Problem

- **Frequenzauflösung** ist durch MDCT sehr gut, **Zeitauflosung** allerdings entsprechend schlechter
- **Pre-Echo-Effekte** können auftreten



MPEG-1 Audio Layer III

Beispiel: Pre-Echo-Effekte



Advanced Audio Coding

- **Advanced Audio Coding (AAC)** ist von MPEG-Arbeitsgruppe entwickeltes, verlustbehaftetes Kompressionsverfahren
- Weiterentwicklung von MPEG-2
- AAC wird im **Containerformat** (z.B. Video und Audio) MP4 verwendet

Advanced Audio Coding

Eigenschaften

- AAC hat vergleichbare Kompressionsrate wie MP3
- AAC erreicht bereits ab 64 kBit/s akzeptable Stereo-Qualität
 - Bitraten ab 160 kBit/s sind vergleichbar mit verlustfreier CD-Qualität
- AAC findet überall Verwendung, wo auch MP3 verwendet wird

Advanced Audio Coding Profile

- **Low Complexity (LC)** – für mittlere bis hohe Bitraten
 - Online Musikgeschäfte
- **Low Delay (LD)** – für geringe Verzögerungszeiten (20 ms) bei mittleren bis hohen Bitraten
 - Anwendung im Kommunikationsbereich z.B. Videokonferenzsysteme

Advanced Audio Coding Profile

- **High Efficiency (HE)** – für niedrige bis sehr niedrige Bitraten
 - **Spektralbandreplikation (SBR)** um hohe Frequenzen synthetisch zu erzeugen
- **Scalable Sample Rate (SSR)** – für Streaming
 - ermöglicht ungestörte Wiedergabe von Streams durch Verringerung der Bitrate, wenn verfügbare Bandbreite plötzlich abfällt

Spektralbandreplikation

- **Spektralbandreplikation** (SBR, engl. **Spectral Band Replication**) ist patentiertes verlustbehaftetes Verfahren parametrischer Audiokodierung der Firma Coding Technologies
- Anwendung sinnvoll typischerweise bei niedrigen Bitraten (24 kbps bis 64 kbps)

Spektralbandreplikation

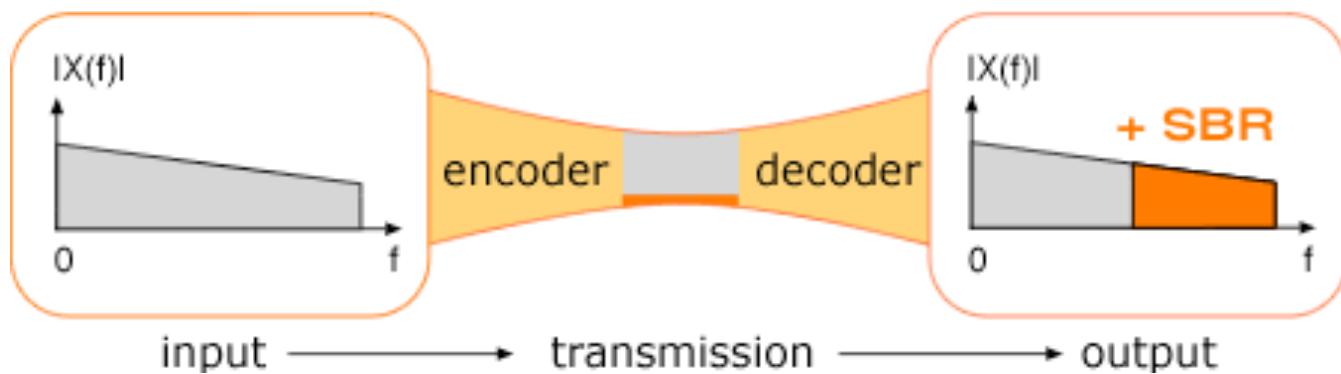
Generelle Idee

- enge Korrelation zwischen Signalverlauf in hohen und niedrigen Frequenzbändern
 - akustische Wahrnehmung bei hohen Frequenzen weniger genau
- hohe Frequenzanteile aus niedrigeren synthetisiert

Spektralbandreplikation

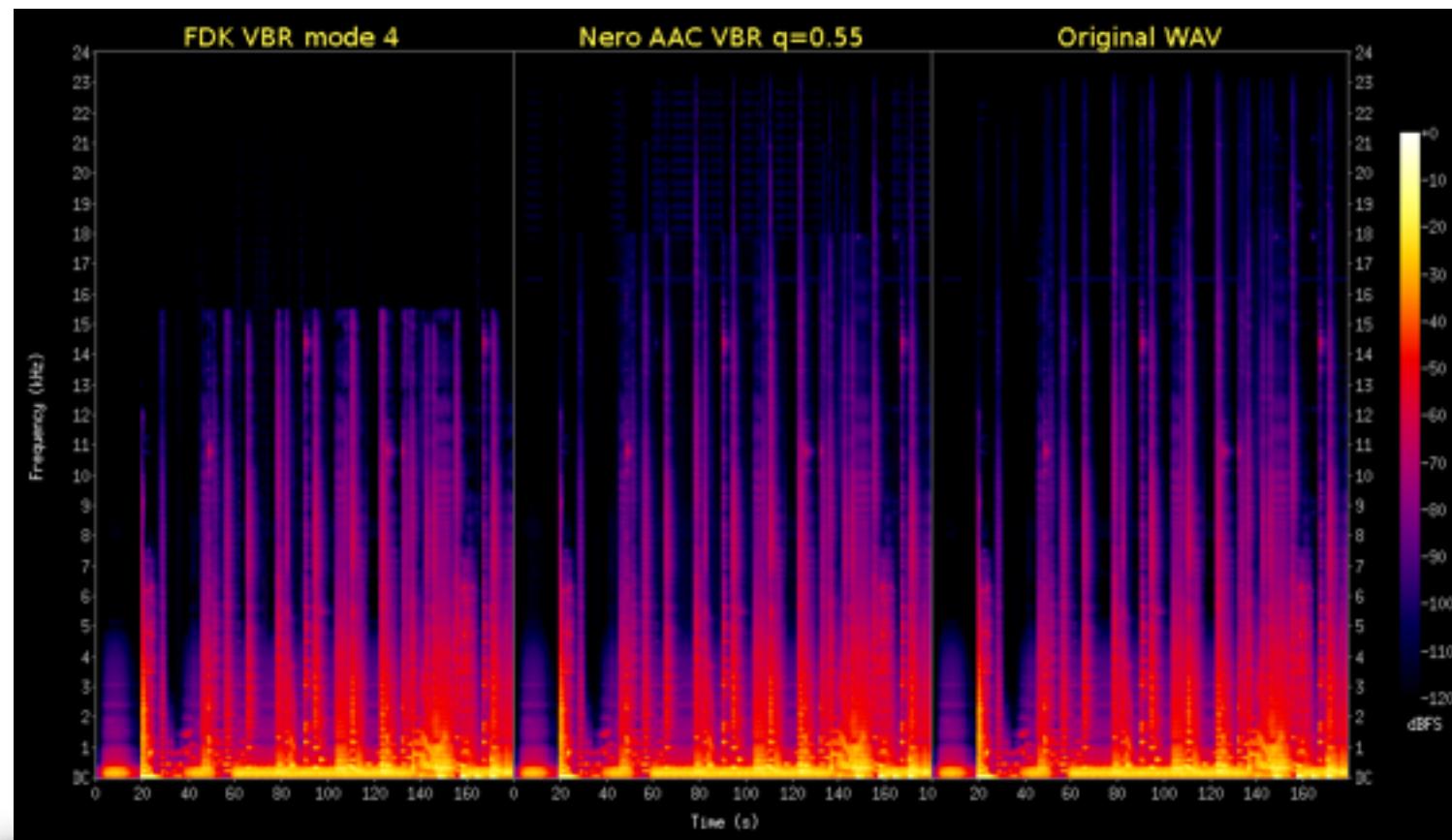
Generelle Idee

- Frequenzanteile oberhalb Grenzfrequenz (z.B. 8 kHz) werden nicht direkt kodiert, sondern aus kodierten tieferen Signalbereichen durch ähnlich klingende Signale rekonstruiert



Spektralbandreplikation

Beispiele



Advanced Audio Coding

Bsp: AAC-Profile (HE) (5.1 MB)



Advanced Audio Coding

Bsp: AAC-Profile (HE) (995 KB)



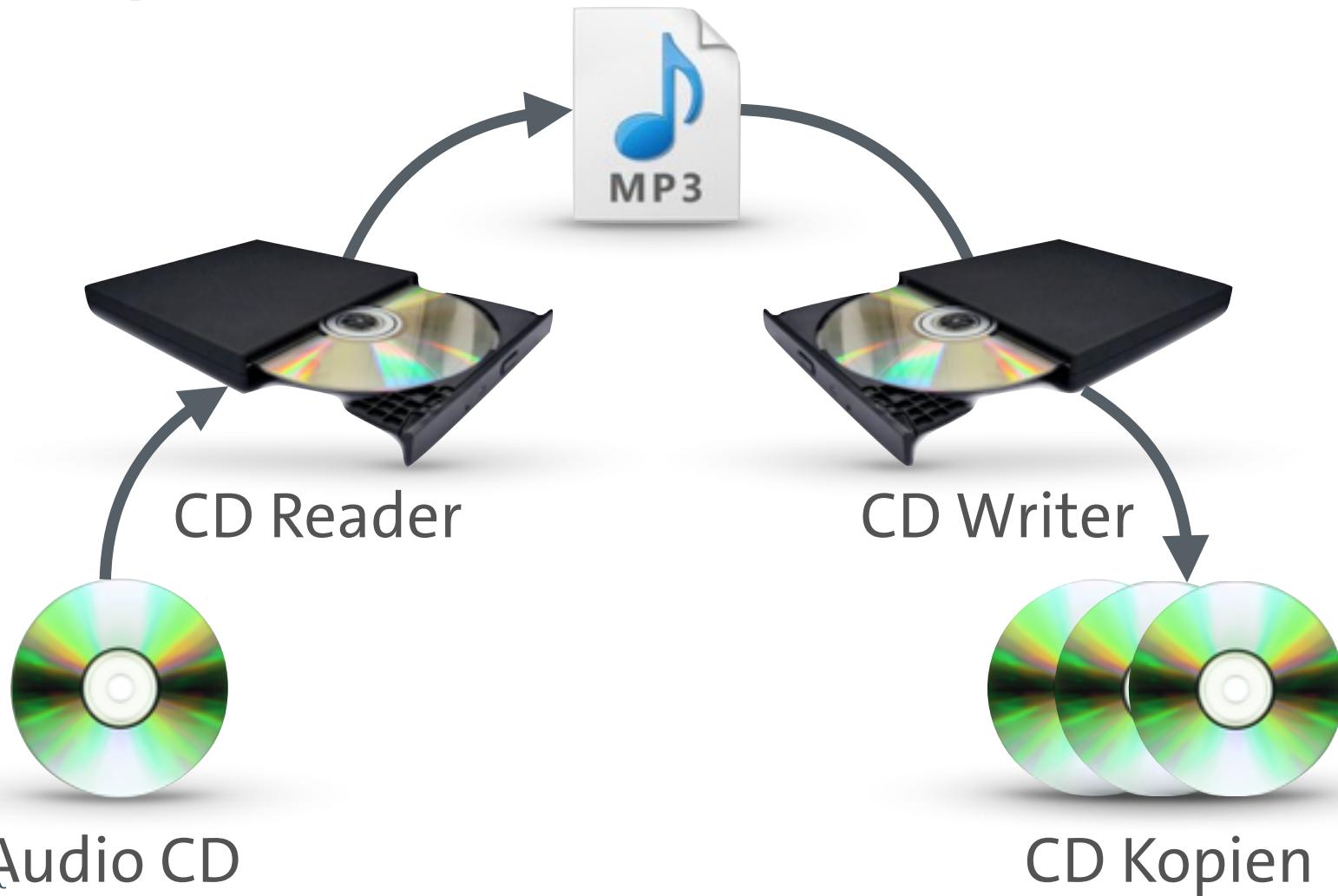
Ogg/Vorbis

- Ogg/Vorbis (OGG)
- verlustbehaftetes komprimiertes Audiodatenformat entwickelt von Xiph.Org Foundation
- (patent-)freies Audioformat (im Gegensatz zu MP3 oder AAC)



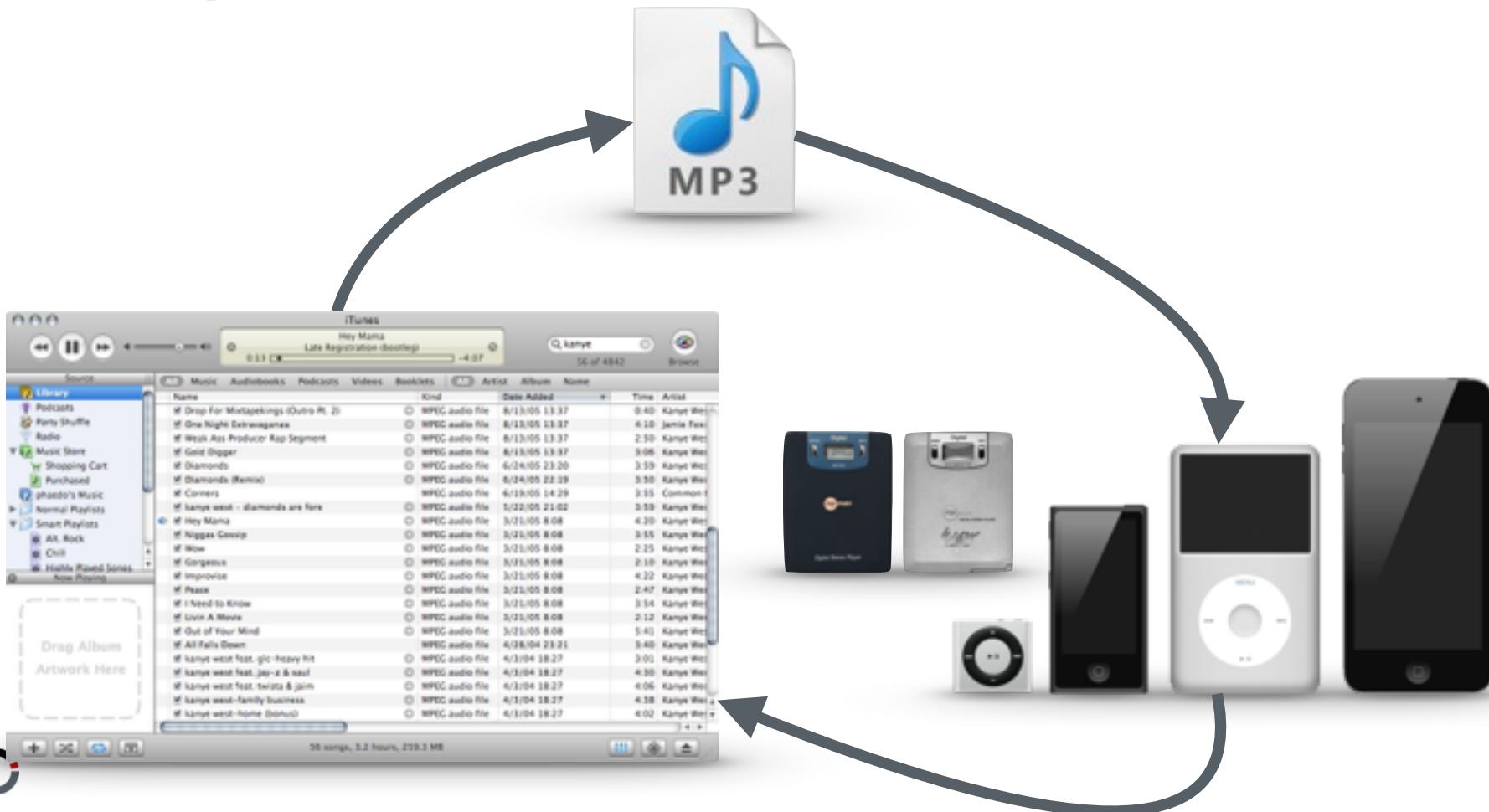
MP3

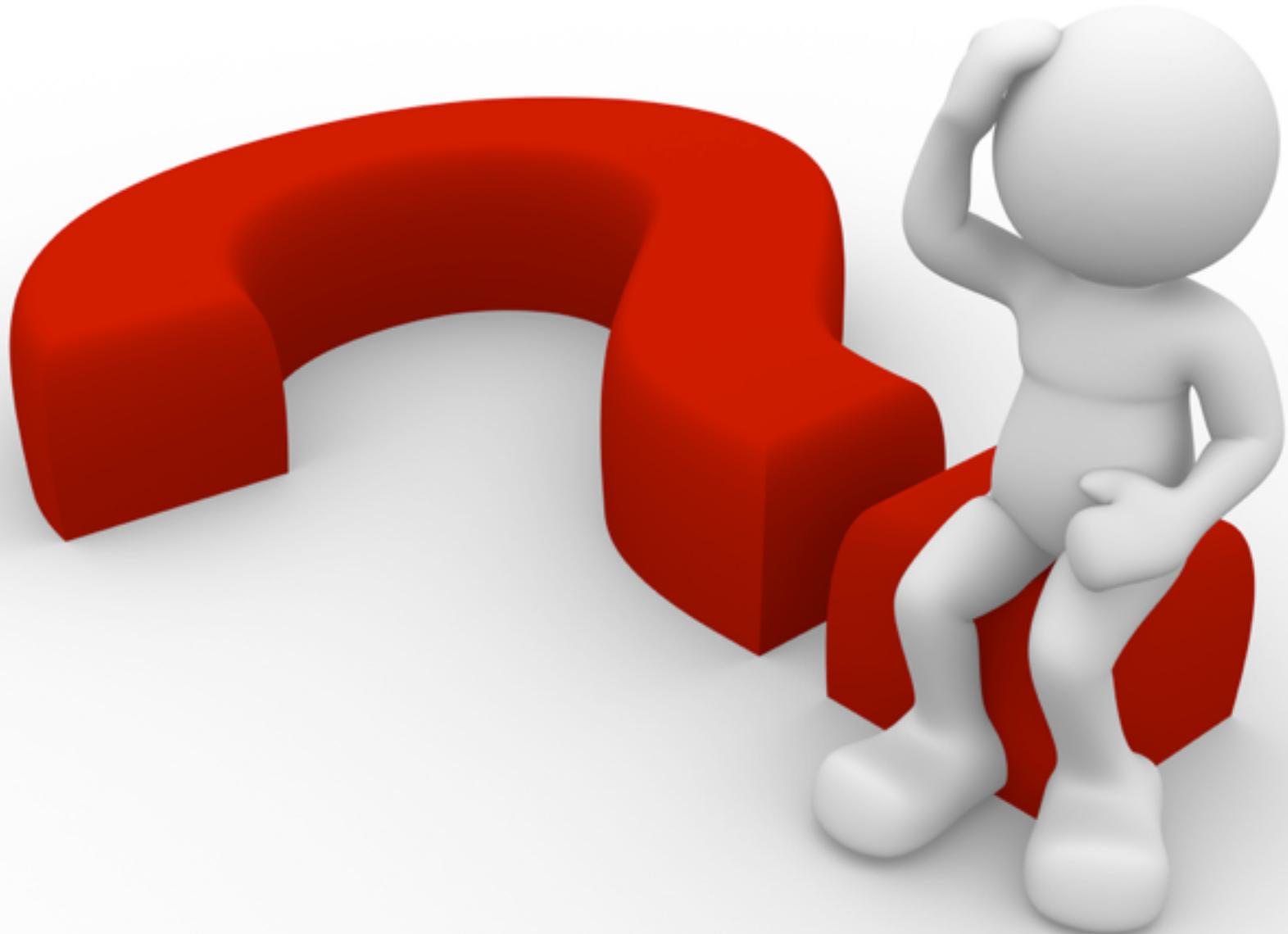
Implikationen



MP3

Implikationen







Interaktive Medien

Kapitel Audio

Audioverarbeitung

Verarbeitung

- Nach Digitalisierung und Kompression beginnt eigentliche Arbeit mit Audiodateien
- Prinzipielle Vorgehensweisen der Audioverarbeitung
 - Audioverarbeitung ohne Kontext
 - Audioverarbeitung mit Berücksichtigung benachbarter Signalwerte

Verarbeitung

- **zeit-invariante Audioverarbeitung** ändert nicht Länge des Signals
- Beispiele:
 - Veränderung der Amplitude
 - Veränderung der Hüllkurve
 - Filter
 - ...

Verarbeitung

- **nicht-zeitinvariante Audioverarbeitung**
 - ändert Länge des Signals
- Beispiele:
 - Veränderung der Frequenz und/oder Phase
 - Echo und Hall
 - Schneiden von Audiomaterial
 - ...

A/D-Wandlung

- Digitalisierung erfordert, dass analoger Signalwert quantisiert wird

Signalwert
z.B. 120 dB



8-Bit-Quantisierung
z.B. 255

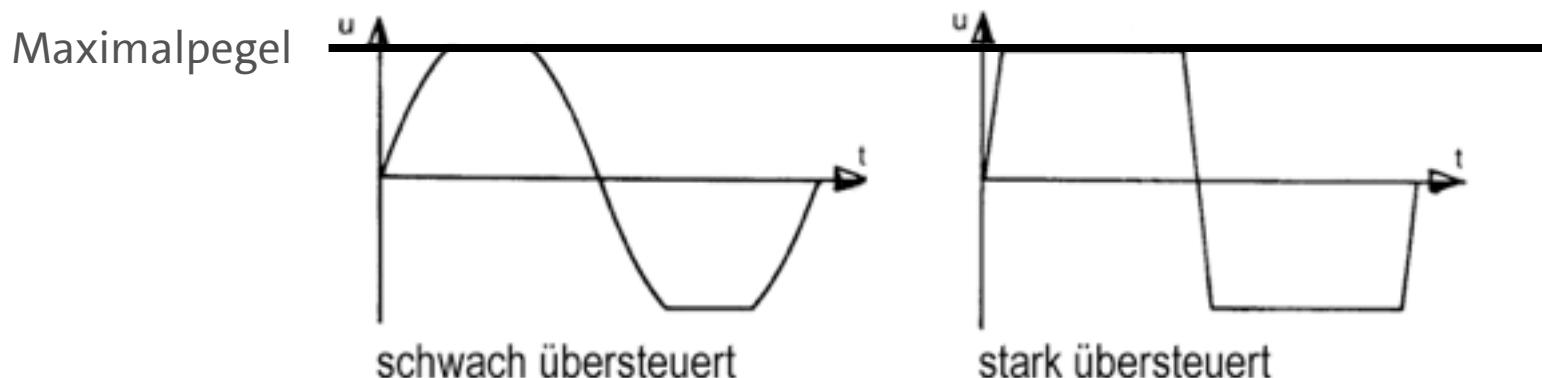


?

- Frage: Wie sieht Zuweisung aus?

Pegel

- **Maximalpegel** ist höchster darstellbarer Signalwert (=größte darstellbare Zahl im Quantisierungsbereich)
- **Arbeitspegel** wird i.d.R. deutlich unter Maximalpegel (als 0dB) festgelegt

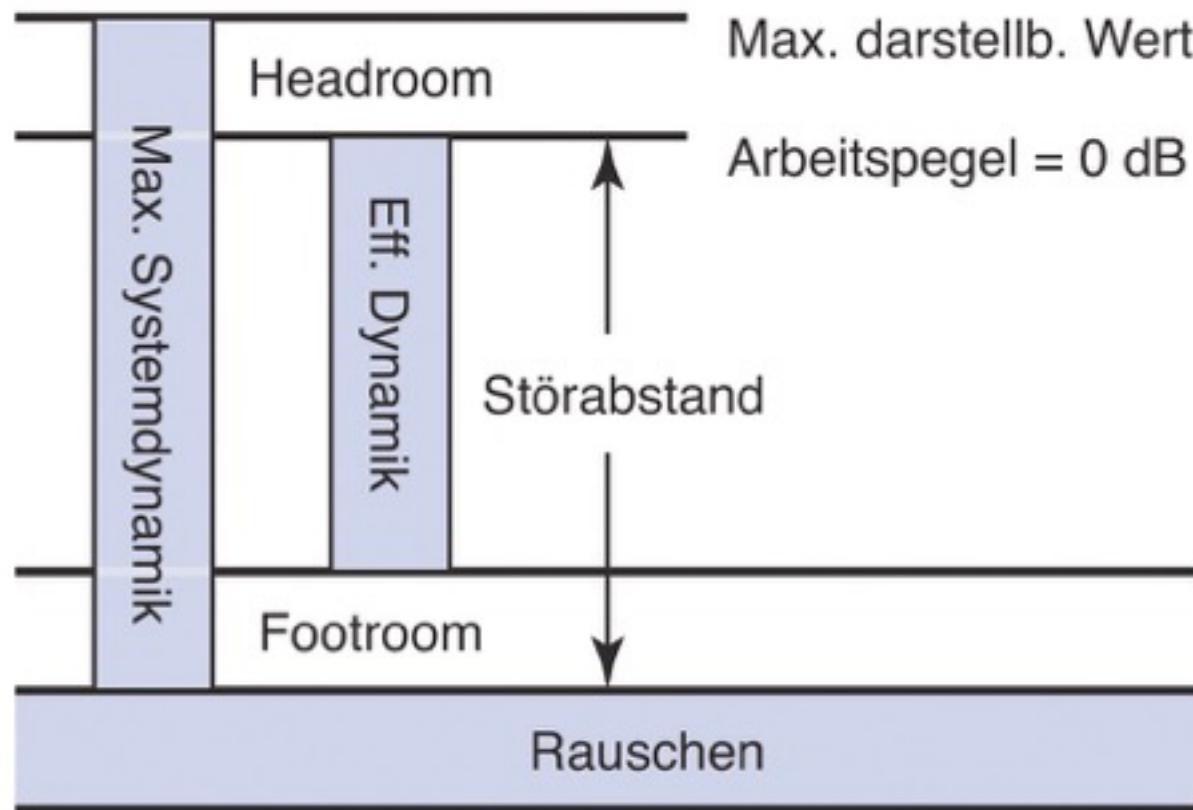


Pegel

Begriffe

- **Headroom** bezeichnet Abstand zwischen Arbeitspegel und Maximalpegel
- **Footroom** bezeichnet Abstand zwischen leisesten auftretendem Signal und Rauschen des Systems
- **Störabstand** oder **Signal-Rausch-Abstand** bezeichnet Abstand zwischen Arbeitspegel und Rauschen

Pegel



Pegelanpassung

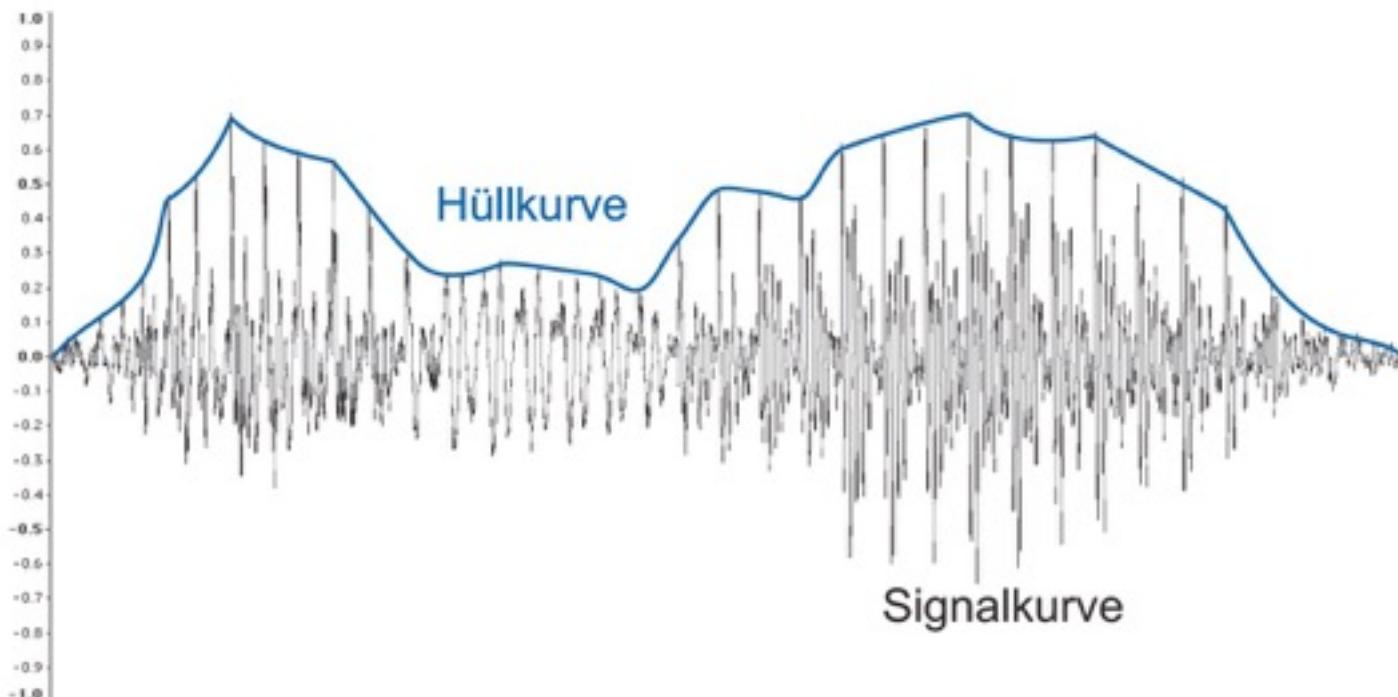
- Pegelanpassung bezeichnet Veränderung aller Signalwerte um konstanten Faktor
 - Übersteuerung
 - ▶ höchsten Signalwerte liegen außerhalb des darstellbaren Bereichs
 - Untersteuerung
 - ▶ nutzt nicht gesamten Bereich der Quantisierung aus

Normalisierung

- Um Über- bzw. Untersteuerung entgegen zu wirken, wird Pegel eines Audiosignals vor Verarbeitung auf **0dB (Arbeitspegel)** angehoben bzw. gesenkt
- Kompensation eines eventuell vorhandenen **DC-Offset**, so dass nach Kompensation Signal symmetrisch um Null-Linie verteilt ist

Hüllkurve

- **Hüllkurve** verbindet Spitzen eines (periodischen) Signals



Audioverarbeitung

Hüllkurve

- **Hüllkurve** wird oft verwendet, um zeitlich beschränkte Pegelveränderungen zu beschreiben
 - **Fading**
 - ▶ Multiplikation mit (logarithmisch, linear, oder exponentiell) Faktor zwischen 0 und 1 zum Ein- und Ausblenden
 - ▶ Hüllkurve wird vertikal auseinander- bzw. zusammengezogen

Dynamik

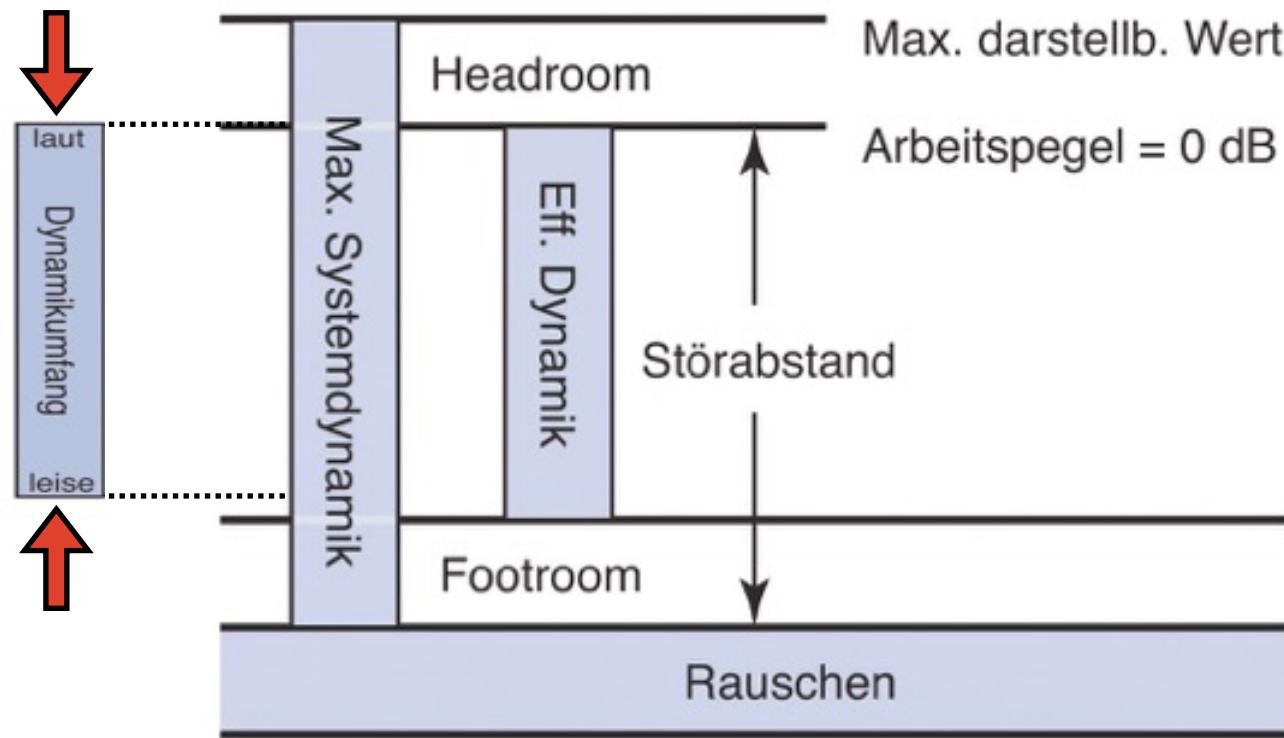
- **Dynamik** einer Musikpassage ist Verhältnis vom größten zum kleinsten Amplitudenwert
 - **Mikrodynamik** (Sekundenbruchteile)
 - ▶ Charakter eines Instruments
 - **Makrodynamik** (Sekunden und Minuten)
 - ▶ Lautstärkenaufbau gesamter Musikstücke (Pianissimo bis Fortissimo)

Dynamikkompression

- bei **Dynamikkompression** werden leise Stellen im Pegel angehoben und laute Stellen herabgesenkt
- wird Signal danach **normalisiert** sind laute Stellen gleich laut, aber leise Stellen lauter

Dynamikkompression

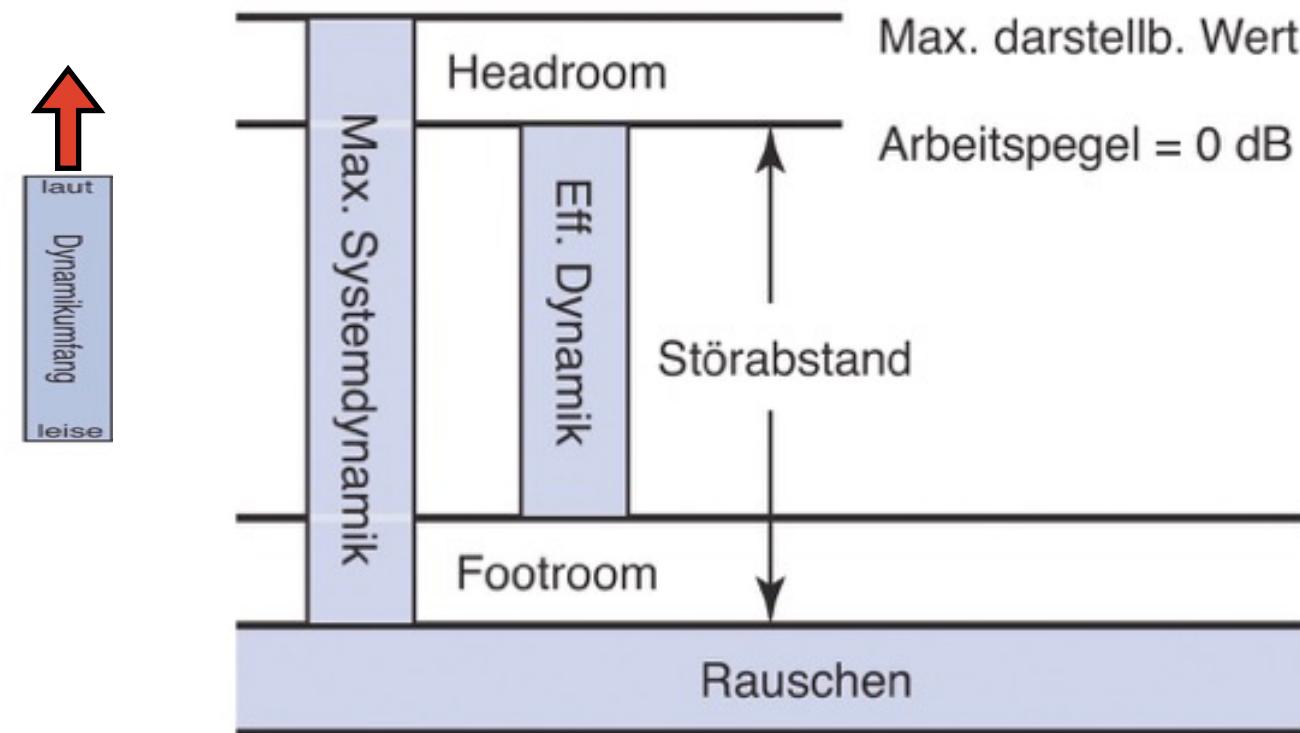
Beispiel



1. Schritt: Kompression

Dynamikkompression

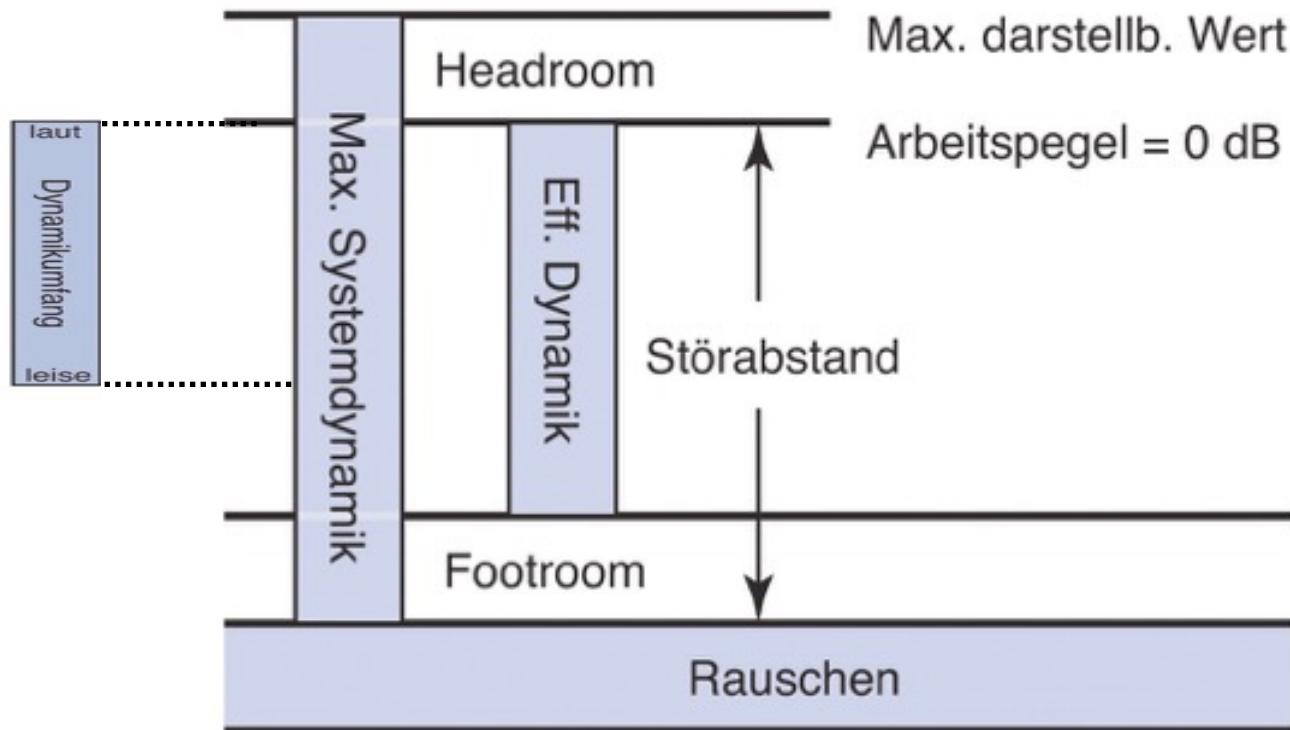
Beispiel



2. Schritt: Normalisierung

Dynamikkompression

Beispiel



Diskussion



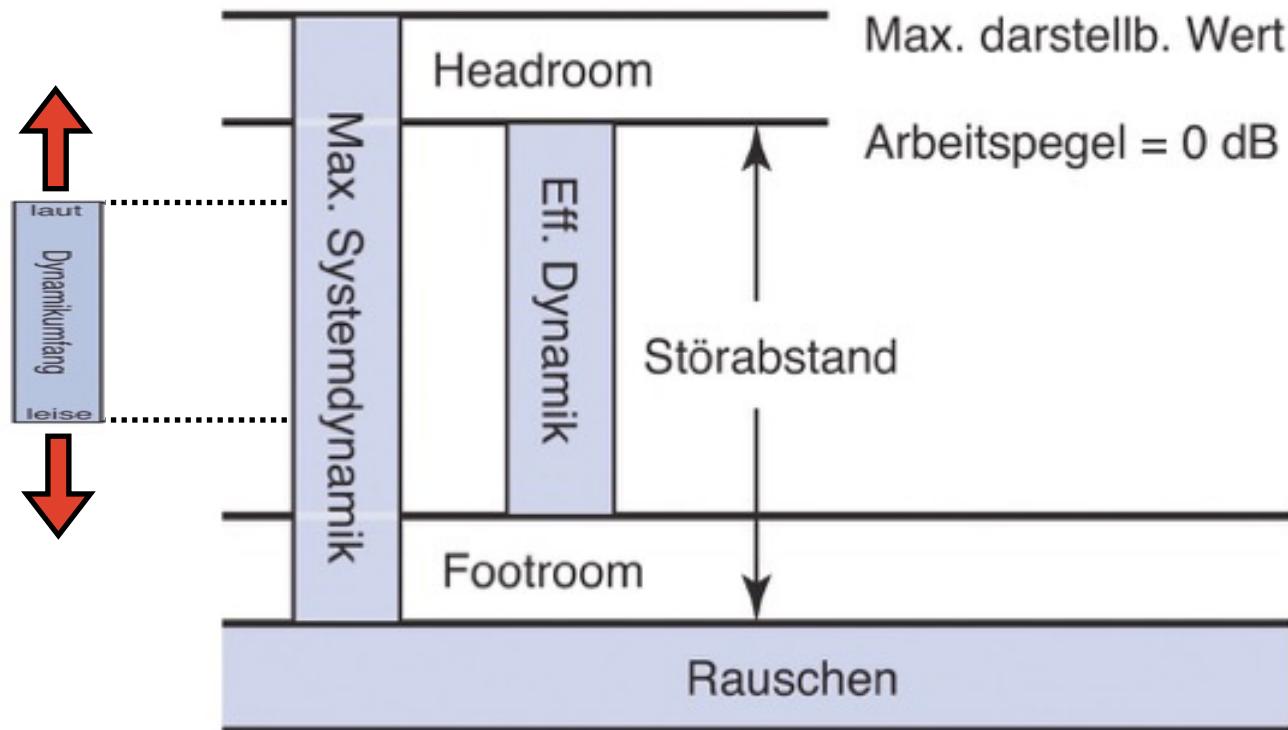
Wann ist eine Dynamikkompression sinnvoll?

Dynamikexpansion

- bei **Dynamikexpansion** werden leise Stellen im Pegel herabgesenkt und laute Stellen angehoben
 - laute Stellen werden lauter
 - leise Steller werden leiser

Dynamikexpansion

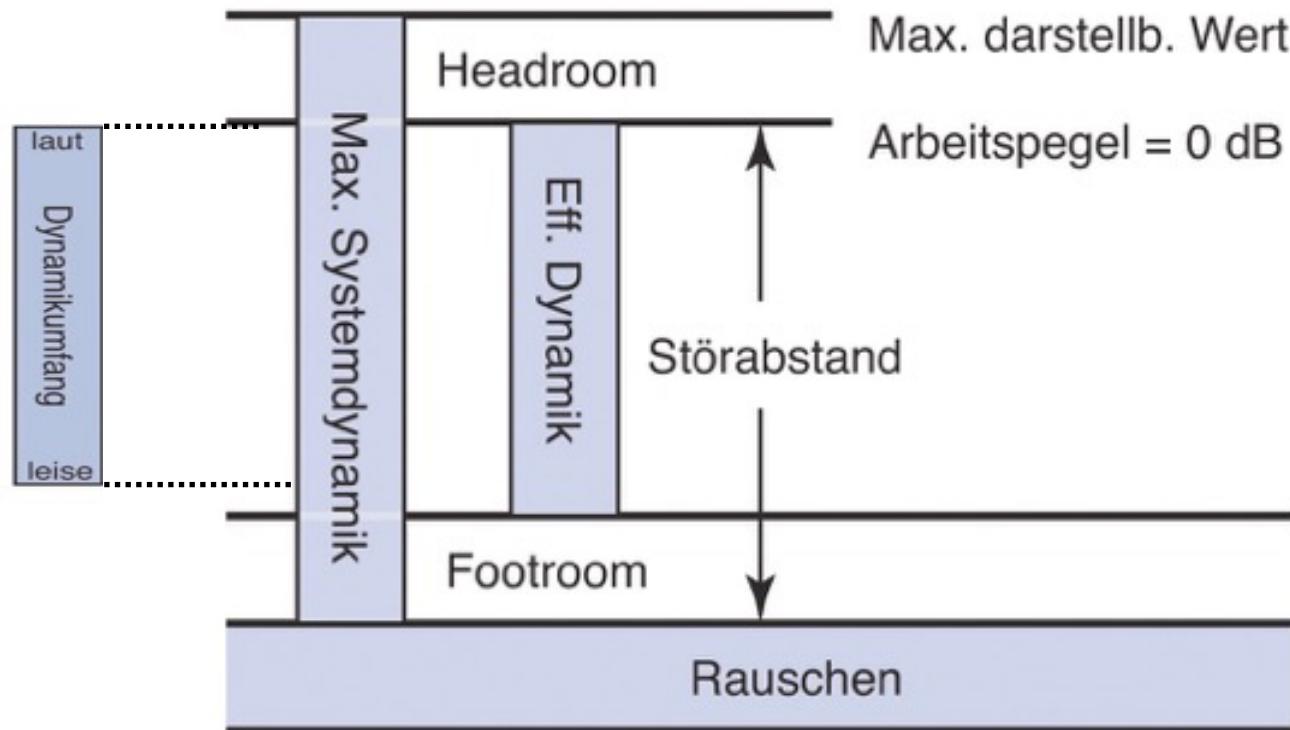
Beispiel



1. Schritt: Expansion

Dynamikexpansion

Beispiel



Diskussion



Wann ist eine Dynamikexpansion sinnvoll?

Filter

- **Filter** berechnen Signalwerte auf Basis aktueller sowie zeitlich benachbarter Signalwerte
 - erlauben i.d.R. keine zeit-invarianten Bearbeitungen
- digitalen Audiotechnik:
 - **Digital Signal Processors (DSP)**

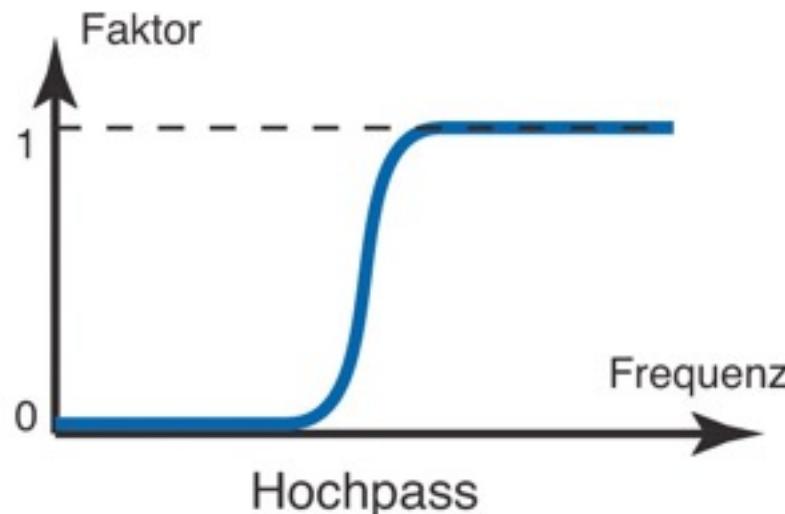
Frequenz-Filter

- **Frequenz-Filter** heben bestimmte Frequenzanteile an oder schwächen sie ab
- Filter werden durch **Filterkurve** beschrieben
- Steilheit der Filterkurve wird **Güte des Filters** genannt

Frequenz-Filter

Hochpass-Filter

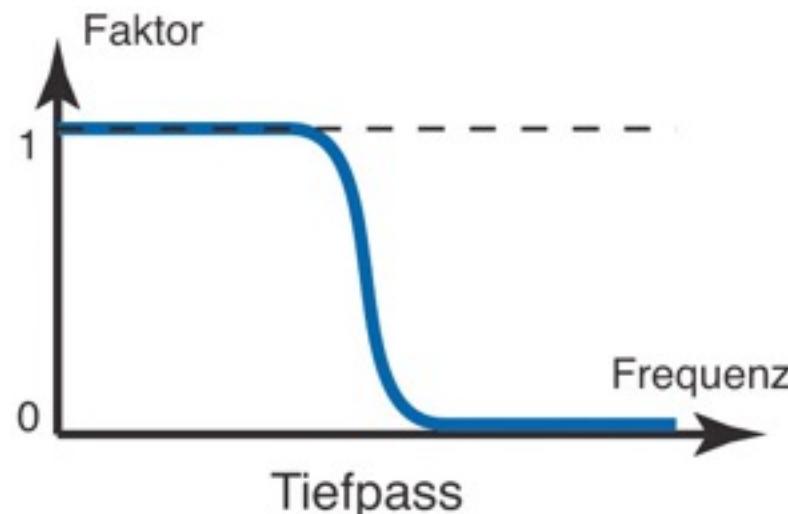
- **Hochpass-Filter** lässt hohe Frequenzen durch, d.h. passieren
- Frequenzen unterhalb bestimmten Grenzfrequenz werden abgeschwächt



Frequenz-Filter

Tiefpass-Filter

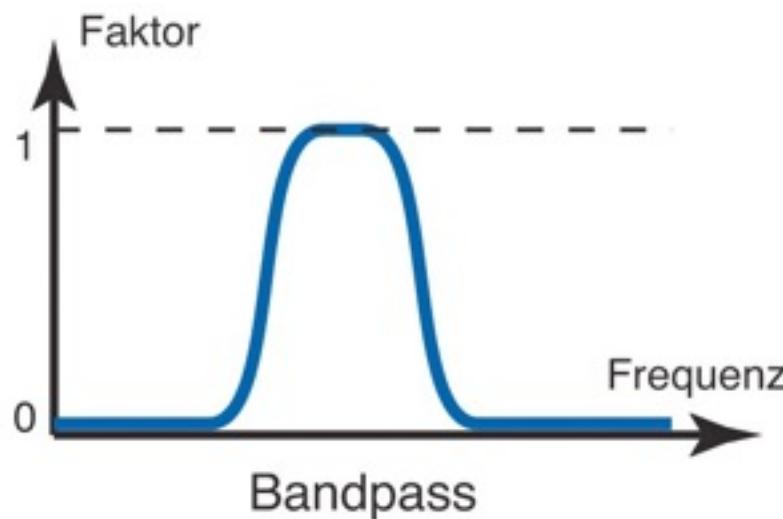
- **Tiefpass-Filter** lässt tiefen Frequenzen durch, d.h. passieren
- Frequenzen oberhalb bestimmter Grenzfrequenz werden abgeschwächt



Frequenz-Filter

Bandpass-Filter

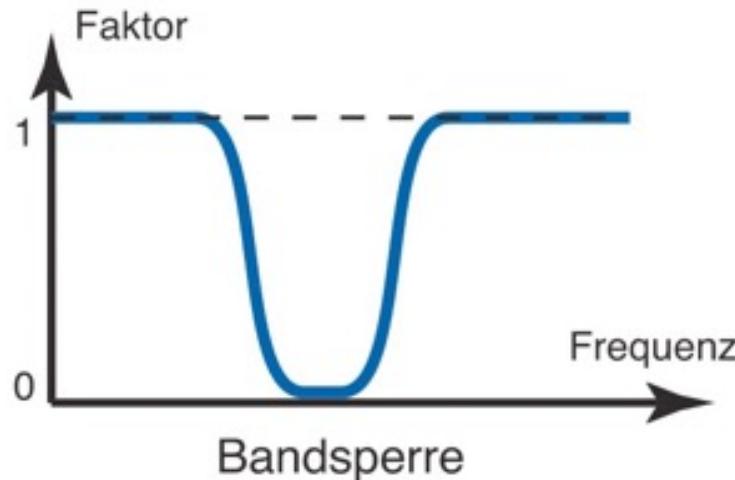
- **Bandpass-Filter** wendet Hoch- und Tiefpass-Filter nacheinander an
- Frequenzen zwischen Grenzfrequenzen werden durchgelassen, andere abgeschwächt



Frequenz-Filter

Bandsperre-Filter

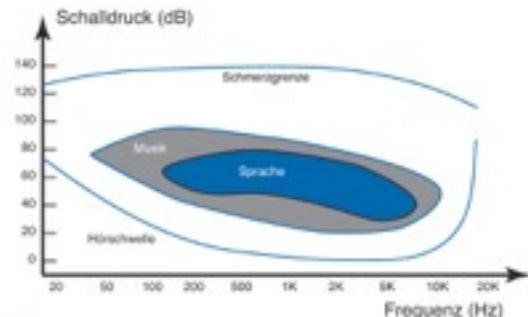
- **Bandsperre-Filter** wendet Hoch- und Tiefpass-Filter parallel an und addiert Signale
- Frequenzen zwischen beiden Grenzfrequenzen werden abgeschwächt, andere durchgelassen



Fokus Mediendesign

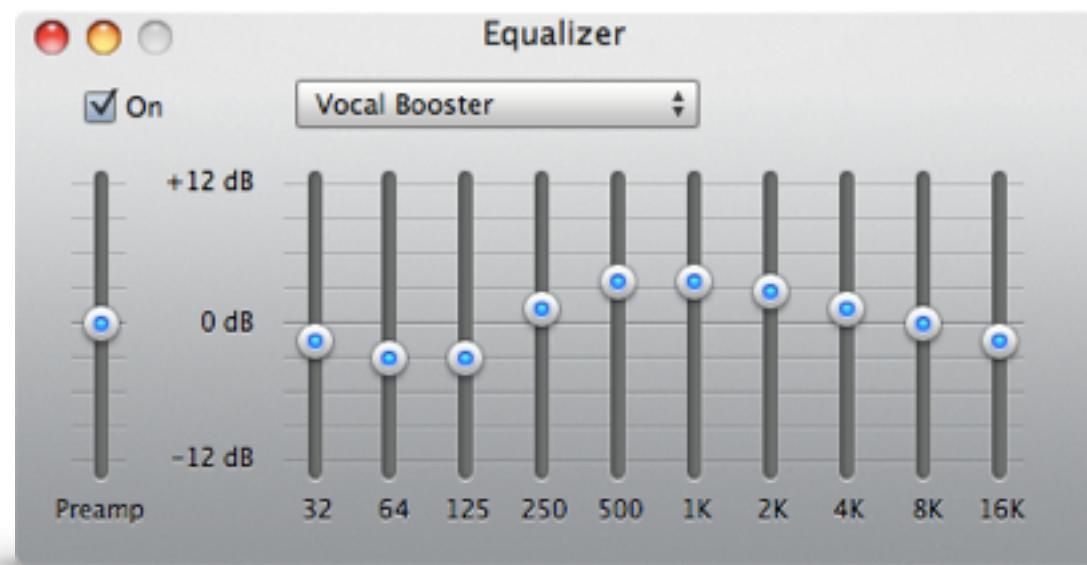
Beispiel: Loudness-Funktion

- bei leisen Signalen hören wir vor allem mittlere Frequenzen
- Loudness-Funktion erhöht entsprechend tiefen und hohen Frequenzen



Equalizer

- Kombination mehrerer Frequenzfilter
- grafischer Equalizer, z.B. iTunes Equalizer mit 10 Bändern



Frequenzmodifikation

- **Frequenzmodifikation** ändert zeitlichen Verlauf
 - **Resampling:** Abspielen mit anderer Samplingrate führt zur Änderung der wahrgenommenen Tonhöhe und Abspiellänge
 - **Time Stretching:** Veränderung der Abspiellänge ohne Veränderung der Tonhöhe

Echo und Hall

- **Echo** spielt Originalsignal zeitverzögert und abgeschwächt ab
 - Beispiele:
 - ▶ kurze Verzögerung klingt wie Keller
 - ▶ lange Verzögerung klingt wie Gebirge
- **Hall** spielt Originalsignal mehrfach mit verschiedenen Verzögerungen ab

Restauration

- Restauration findet bspw. Anwendung bei Aufbereitung (alter) analoger Tonaufnahmen
- Unterscheidung der Störungen vom Signal
- Typische Störungen sind
 - Rauschfehler (Noise, Hiss)
 - Clickfehler/Signallücken (Clicks)
 - Knistern (Crackles)

Restauration

- beim **Denoising** wird Fingerprint (typisches Spektrum) des Rauschens bestimmt und diese Frequenz herausgefiltert
- beim **Deklicking** werden Signallücken durch Interpolation (oder Daten aus zweitem Stereokanal) ersetzt
- beim **Decracking** handelt es sich um ein wiederholt ausgeführtes Deklicking an entsprechenden Stellen

Audioschnitt

- Terminologie Cut-and-Paste-Operationen
- Übergänge sollten natürlich klingen,
daher in Pausen oder im Nulldurchgang
Schneiden

Fokus Mediendesign

Beispiel

„Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker.“

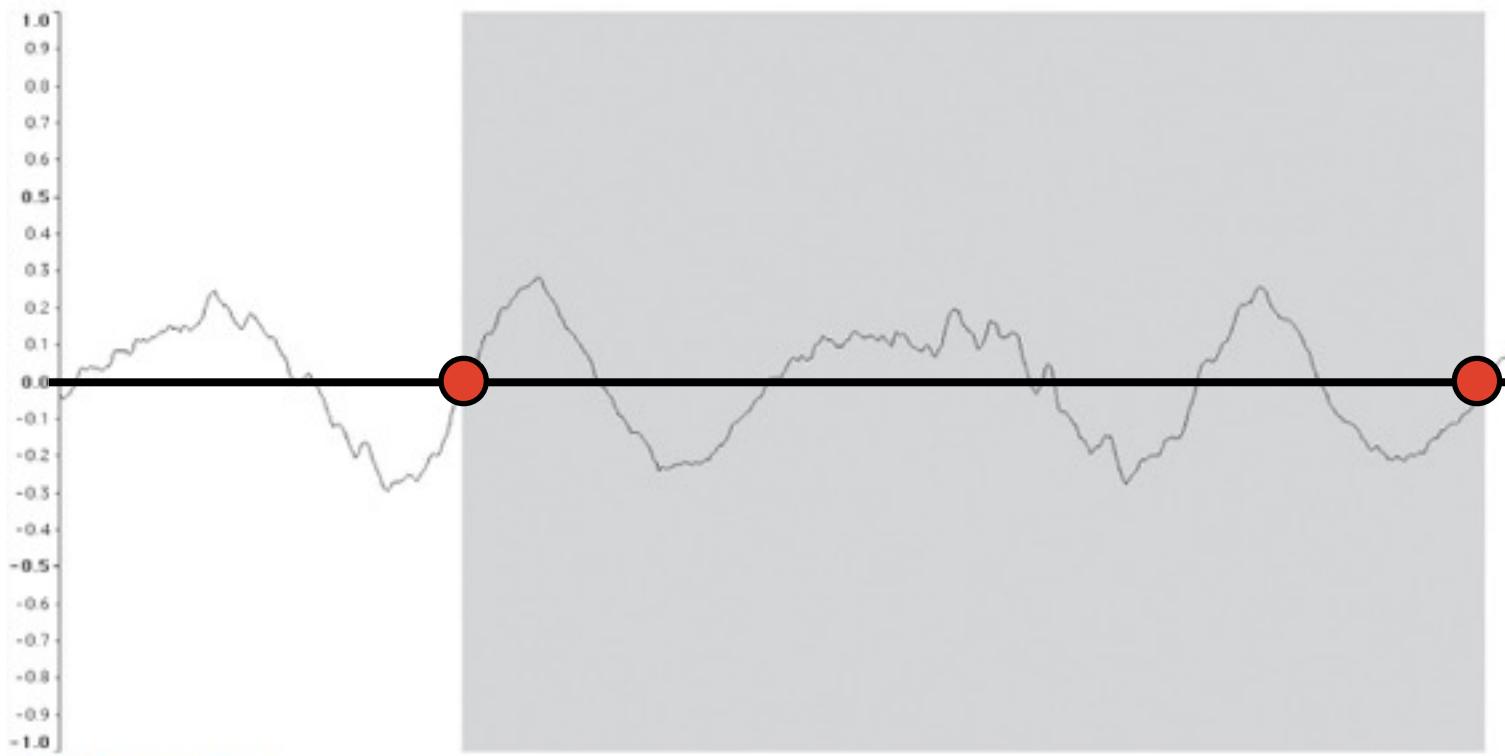
- Kostenersparnis durch Verkürzung
- bei gleicher Tonhöhe Geschwindigkeit soweit erhöht, dass Text noch verständlich bleibt

Schnitte

- **harter Schnitt:** Aneinanderhängen zweier unterschiedlicher Signale
- **Überblenden:** gleichzeitiges Ausblenden des ersten bzw. Einblenden des zweiten Signals
 - **Kreuzblende:** langsamer Übergang
 - **Sturzblende:** schneller Übergang

Audioschnitt

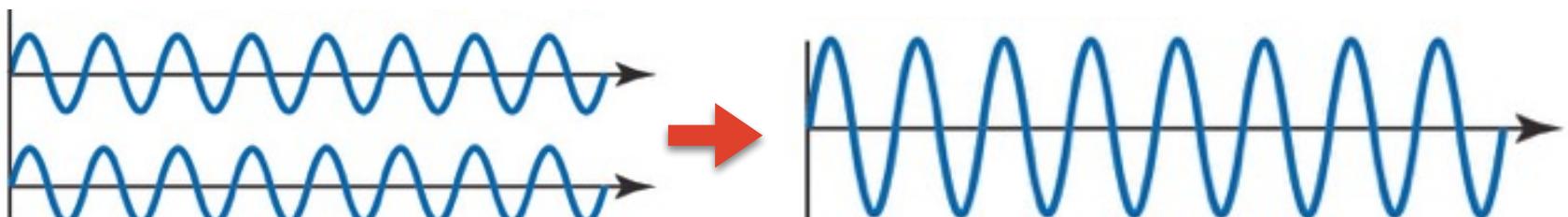
Beispiel: Nulldurchgänge



Interferenzen

Konstruktive Interferenz

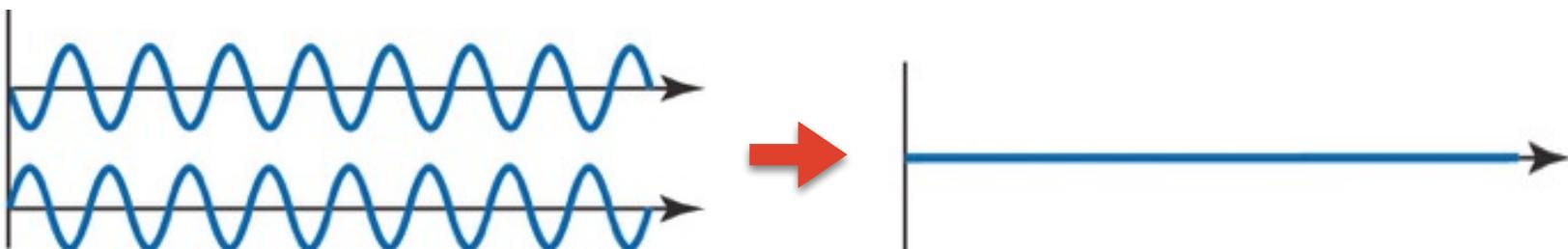
- werden zwei Signale gemischt, addieren sich Signalwerte
- wird Signal mit sich selbst gemischt, verstärkt sich Amplitude
- Effekt heißt **konstruktive Interferenz**



Interferenzen

Destruktive Interferenz

- werden zwei inverse Signale (phasenverschoben um 180 Grad) gemischt, löschen sich Signalwerte gegenseitig aus
- Effekt heißt **destruktive Interferenz**



Fokus Mediendesign

Geräuschmindernder Kopfhörer

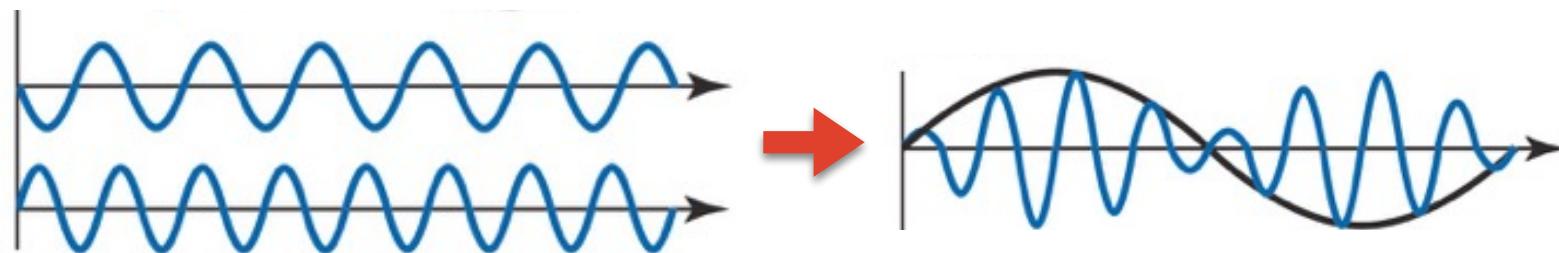
- Kopfhörer mit **aktiver Geräuschunterdrückung**
 - Mikrofon misst Umgebungsgeräusche
 - Verwendung destruktiver Interferenz, um Umgebungsgeräusche zu reduzieren



Interferenzen

Schwebung

- werden zwei periodische Signale gemischt, deren Frequenzen nahe beieinander liegen, kommt es zur **Schwebung**, d.h. konstruktive und destruktive Interferenz wechseln sich ab



Phasenverschiebung

- bei **Phasenverschiebung** (engl. **Phase Shift**) wird Kopie des Signals mit Original vermischt, um verschiedene Audio-Effekte hervorzurufen
 - **Chorus**
 - ▶ Signale voller klingen lassen durch Abspielen von Signalkopien mit zufälligen Verzögerungen (10-25ms)

Phasenverschiebung

- **Flanging**
 - ▶ ähnlich wie Chorus, aber nur eine phasen-verschobene (verzögerte) Signalkopie
- **Phasing**
 - ▶ Kombination aus Originalsignal und variierender Phasenverschiebung einzelner Signale Frequenzen

Phasenverschiebung

Beispiel: Drum - Original



Phasenverschiebung

Beispiel: Drum - Flanging



Phasenverschiebung

Beispiel: Drum - Phasing



Audioverarbeitung

Beispiel: Audacity

