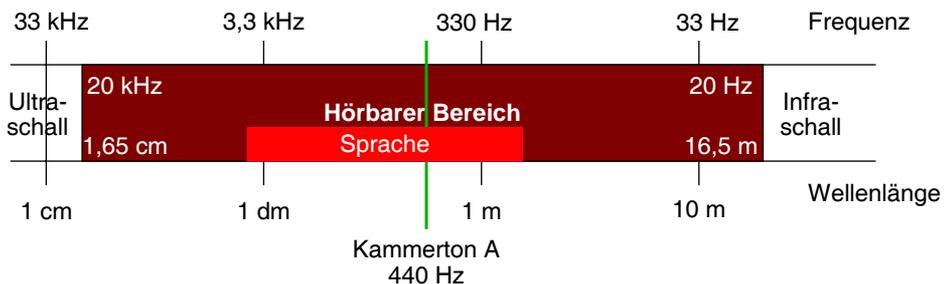


## 5. Ton und Klang

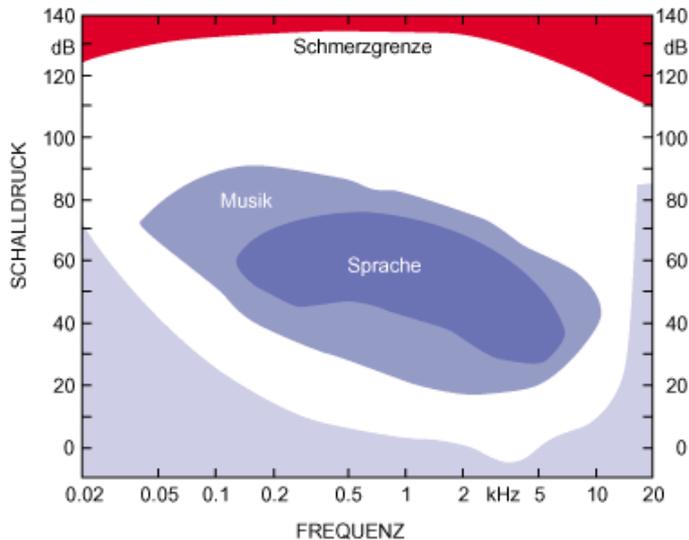
- 5.1 Ton: Physikalische und physiologische Aspekte 
- 5.2 Kompression von Audio-Signalen: MPEG-Audio
- 5.3 Audio-Datenformate: Übersicht
- 5.4 Klangerzeugung und MIDI

## Ton (*sound*)

- Schallwellen, d.h. schnelle Änderungen des Luftdrucks
  - Längswellen, keine Schwingungsebenen
  - Ausbreitungsgeschwindigkeit 331,3 m/s
- Vom Menschen hörbares Spektrum ca. 20 Hz bis 20 kHz



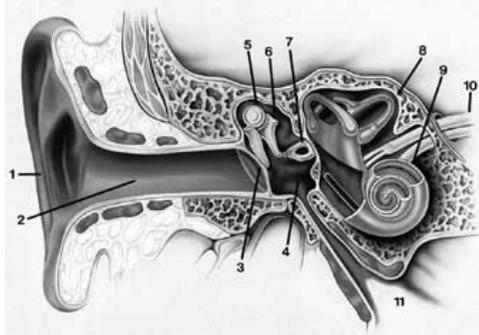
# Hörfläche



## Das Dezibel

- Logarithmisches Gesetz: Eine Einheit eines interessierenden Masses entspricht einer Verdoppelung eines Basismasses
  - Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs für Schalldruck
  - Verlust in Telefonkabeln (als Funktion der Länge)
- Bel (B, benannt nach Graham Bell):
  - Logarithmisches Mass zu einem Referenzwert (0 Bel)
  - Referenzwert traditionell 1 mW bei 600  $\Omega$
- DeziBel (dB): 1 dB = 1/10 B
- Dezibel-Messung relativ zu verschiedenen Referenzen:
  - Verlustleistung (m, W)
  - Schalldruck (SPL) relativ zu  $2 \times 10^{-5}$  Pa (Hörschwelle)
  - Bewerteter Schalldruck (A)
- Schalldruck-Wahrnehmung des Menschen:
  - Bereich (Dynamik) von 90 – 135 dB
  - Als Leistung: Faktor  $32 \times 10^{12}$  (32 Trillionen)

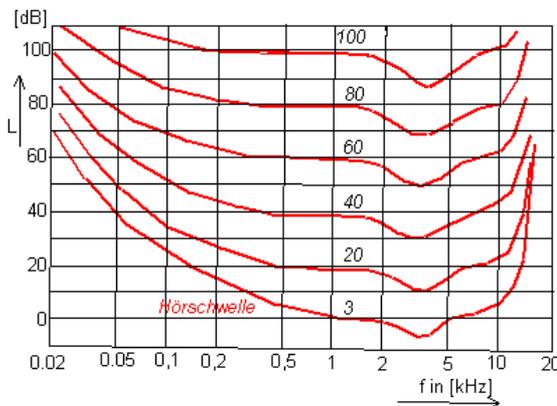
# Das menschliche Ohr



- 1 Ohrmuschel
- 2 Gehörgang
- 3 Trommelfell
- 4 Mittelohr
- 5 Hammer
- 6 Amboss
- 7 Steigbügel
- 8 Gleichgewichtsorgan
- 9 Schnecke
- 10 Hörnerven

- Aussenohr:
  - räumliche Orientierung (Signale zweier Ohren + Frequenzdifferenzen)
  - HRTF = Head Related Transfer Function
- Mittelohr:
  - Trommelfell, Hammer, Amboss, Steigbügel: Verstärkung der Kraftwirkung
- Innenohr:
  - Schnecke (*cochlea*), zwei flüssigkeitsgefüllte Gänge, am Ende gedämpft
  - Haarzellen entlang der Tektalmembran: Wahrnehmung von Frequenzen

# Lautstärke, Frequenz, Hörschwelle

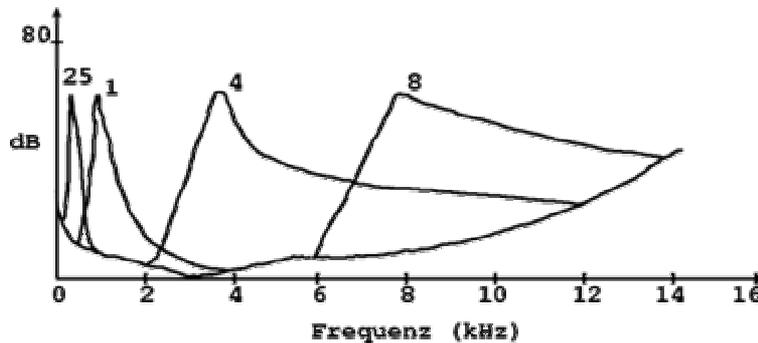


- Die Hörschwelle ist abhängig von der Frequenz:
  - Größte Empfindlichkeit bei ca. 2 – 5 kHz
- Der Verlauf der frequenzabhängigen Hörschwelle ist abhängig von der Lautstärke.
  - Subjektive Lautstärke gemessen in *Phon*
  - $x$  Phon: Lautstärke vergleichbar zu 1 kHz Ton bei Schalldruck  $x$  dB (SPL)

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

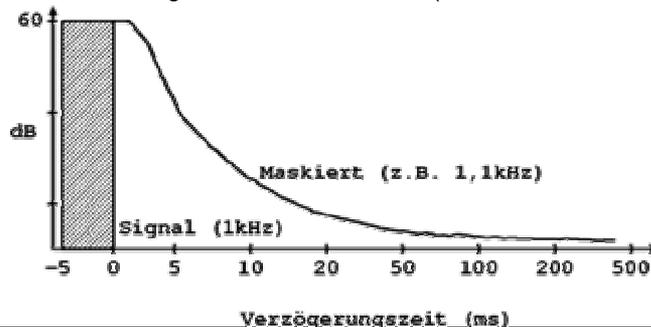
## Frequenz-Maskierung

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



## Zeitliche Maskierung

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



## Kritische Bänder

- *Psychoakustik* befasst sich mit wahrnehmungsbezogenen Aspekten von Schall
- Heinrich Barkhausen (1881–1956, Physiker, Dresden):
  - Einteilung des Hörbereichs in *kritische Bänder*
  - Breite der Bänder vergrößert sich mit der mittleren Bandfrequenz
  - Einheit für Bandbreite: *bark*
- Definition der bark-Breite:
  - Wenn  $f < 500$ :  $1 \text{ bark} = f / 100$
  - Wenn  $f \geq 500$ :  $1 \text{ bark} = 9 + 4 \log(f / 1000)$

## 5. Ton und Klang

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

## Pulse Code Modulation (PCM)

- Klassische Digitalisierung:
  - Aufzeichnung des analogen Signalwertes zu festgelegten Zeitpunkten mit festgelegter Auflösung
- G.711 (für Telefonie):
  - 8 kHz Abtastfrequenz für 4 kHz breites Teilband (Sprache)
  - Auflösung 8 bit
  - 64 kbit/s Bandbreite = Breite eines ISDN „B-Kanals“
- Viele weitere Anwendungen
  - z.B. digitale Tonaufzeichnung auf Videoband (PCM-1630)
  
- Kompression von Audiodaten
  - Verlustfreie Kompression nur wenig wirksam
  - Generell relativ niedrige Kompressionsraten erreichbar

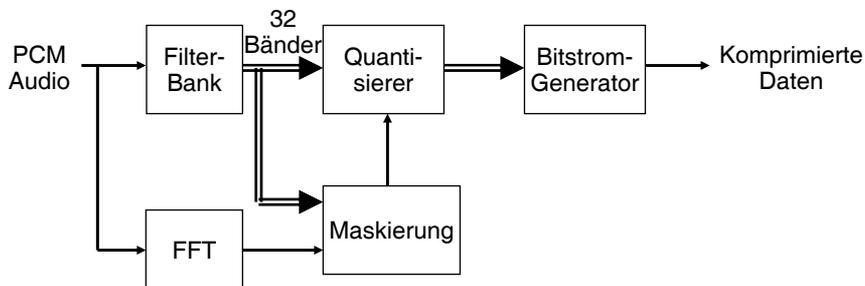
## Einfache verlustbehaftete Verfahren

- Stummunterdrückung (*silence compression*)
  - Ausblenden von Zeitbereichen mit Nullsignal
- $\mu$ -Gesetz-Codierung bzw.  $\alpha$ -Gesetz-Codierung (u.a. in G.711):
  - Nichtlineare Quantisierung: leise Töne angehoben
  - Ähnlich zu Dynamischer Rauschunterdrückung in Audiosystemen
- Adaptive Differential Pulse Code Modulation (ADPCM)
  - Prädiktives Verfahren
  - Vorhersage des Signalverlaufs durch Mittelung über bisherige Werte
  - Laufende Anpassung der Quantisierungstiefe an Signal
  - Kodierung der Differenzwerte zur Prädiktion
- Linear Predictive Coding (LPC)
  - Vergleicht Sprachsignal mit analytischem Modell der menschlichen Spracherzeugung, codiert Modellparameter und Abweichungen von der Vorhersage (militärische Entwicklung)
  - Nur für Sprache, klingt „blechern“ hohe Kompression
  - Weiterentwicklungen, z.B. Code Excited Linear Predictor (CELP)

## MPEG-Audio

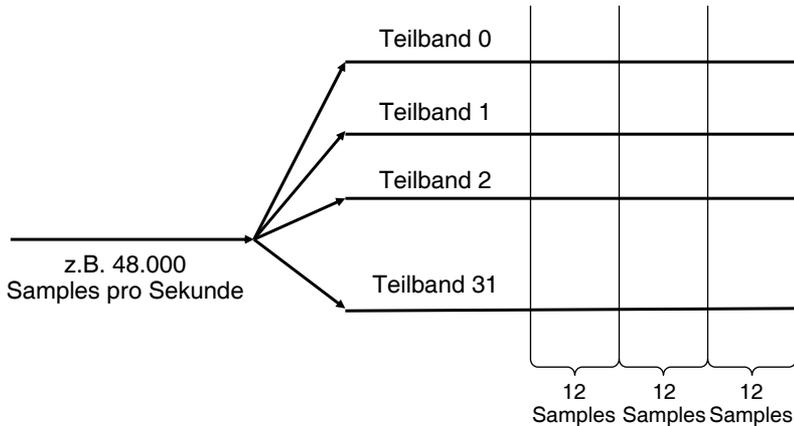
- Verlustbehaftete Audiokompression
  - basiert auf psychoakustischem Modell der Tonwahrnehmung
- MPEG-1 Audio:
  - PCM mit 32, 44.1 oder 48 kHz
  - max. Datenrate 448 kbit/s
- MPEG-2 Audio:
  - PCM mit 16, 22.05, 24, 32, 44.1 oder 48 kHz
  - max. 5 Kanäle
  - max. Datenrate 384 kbit/s
- Einteilung in drei „Layer“ (I, II, III) verschiedener Kompressionsstärke
  - Unabhängig von Wahl MPEG-1 bzw. MPEG-2 !
  - „MP3“ = MPEG Layer III (Kompression ca. 11:1)
    - » MP3 patentrechtlich geschützt, Fraunhofer IIS Erlangen

## Aufbau eines MPEG-Layer I Encoders



- Signal wird in 32 Frequenzbänder aufgeteilt
- Für die Maskierung mit einem psychoakustischen Modell:
  - Audiosignal durch Fast-Fourier-Transformation (FFT) genauer aufgelöst (512 Frequenzen bei Layer I, 1024 bei Layer II/III)

## Filterung in Teilbänder



- 12 Samples entsprechen bei 48 kHz ca. 8 ms
- Ein Block von Samples in einem Teilband wird manchmal *bin* genannt
- *Frame*: Gesamtheit der Samples in allen Teilbändern  
12 x 32 = 384 Samples

## Maskierung

- Aus dem Originalsignal und dem psychoakustischen Modell ergibt sich eine Hörbarkeitsschwelle für jedes Band
- Signale in den einzelnen Bändern werden nur codiert, wenn sie oberhalb der Maskierungsschwelle liegen, und dann nur mit einer möglichst geringen Bitanzahl (1 Bit Ungenauigkeit entspricht 6 dB Rauschen)
- Beispiel:  
Ergebnis nach der Analyse der ersten 16 Bänder:

Band	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Pegel (dB)	0	8	12	10	6	2	10	60	35	20	15	2	3	5	3	1

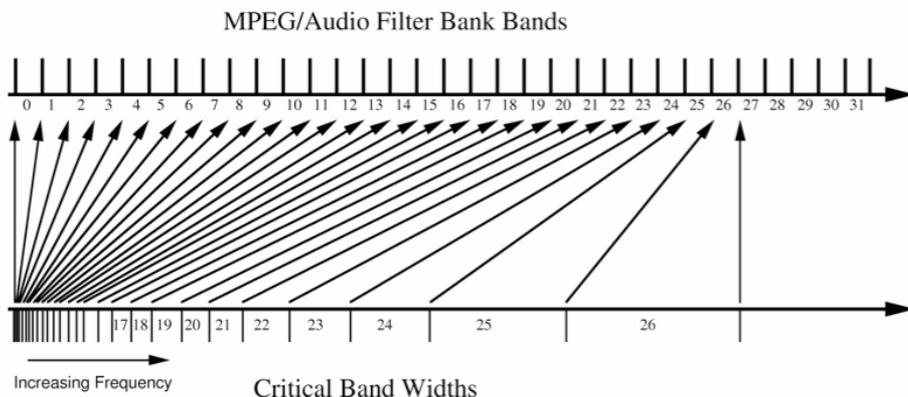
- Pegel in Band 8 ist 60 dB  
-> Maskierung von 12 dB in Band 9 und 15 dB in Band 7
- Pegel in Band 7 ist 10 dB --> Weglassen!
- Pegel in Band 9 ist 35 dB --> Codieren!  
wegen Maskierung 12 dB Ungenauigkeit zulässig, d.h. mit zwei Bit weniger codierbar

## Unterschiede der MPEG Layer

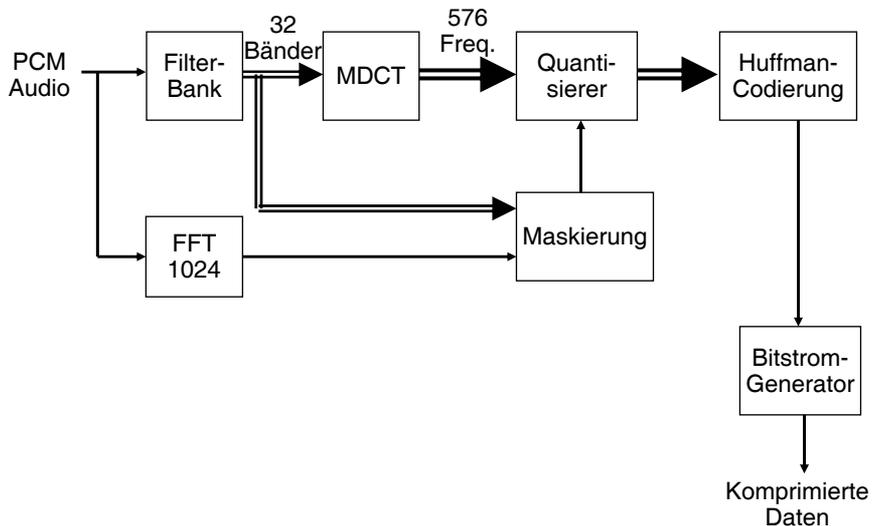
- Layer I:
  - 32 gleichbreite Teilbänder
  - Betrachtung nur eines Frames
  - Psychoakustisches Modell benutzt nur Frequenzmaskierung
- Layer II:
  - 32 gleichbreite Teilbänder
  - FFT mit 1024 Punkten
  - Betrachtung von drei Frames (jetzt, vorher, nachher)
  - Einfache Zeitmaskierung, verfeinerte Bittiefenzuweisung
- Layer III:
  - Teilbänder verschiedener Breite, ähnlich zu den kritischen Bändern
  - (Modified) DCT der Teilbänder (in überlappenden „Fenstern“ variierender Breite)
  - Zusätzliche Entropiecodierung (Huffman)
  - Behandlung von Stereo-Redundanzen

## Kritische Bänder und Filterbänder

- Situation in MPEG Layer I/II:



## Aufbau eines MPEG-Layer III Encoders



## Stereophonie in MPEG-Audio

- Single Channel
  - Monosignale
- Dual Channel
  - Verschiedene Monosignale (z.B. Sprachsynchronisation)
- Stereo Coding
  - Separat codierte Stereosignale
- Joint Stereo Coding
  - Redundanzen im Stereosignal ausgenutzt
  - Linker Kanal und Differenz Links/Rechts
  - Frequenzabhängigkeit der Raumwahrnehmung
    - » Monosignal für tiefe Frequenzen
- Hinweis:
  - Es gibt Experimente, nach denen räumliches Hören z.T. die MPEG-Kompressionsverluste wahrnehmbar machen kann

# MPEG AAC

- AAC = Advanced Audio Coding
  - Nachträglich zu MPEG-2 standardisiert
  - Verbesserte Fassung in MPEG-4
  - Nicht rückwärtskompatibel
- MPEG-2 AAC:
  - 48 volle Audio-Kanäle
  - Reines MDCT-Filter, keine Filterbank mehr
  - Stark adaptierende Fenstergrößen
  - Prädiktive Kodierung im Frequenzraum (Temporal Noise Shaping TNS)
    - » gute Kodierung für „Transiente“ (zeitweilige Pegelspitzen)
- MPEG-4 AAC:
  - Perceptual Noise Substitution: Rauschen-ähnliche Teile des Signals werden beim Dekodieren synthetisiert
  - Long Term Prediction: Verbesserte Prädiktionskodierung

# Bedeutung von MPEG

- Audio-Standard MP3
  - Extrem hohe Verbreitung
  - Tragbare MP3-Player
- Rundfunk
  - Digital Audio Broadcast (DAB) und Digital Video Broadcast (DVB) basieren auf MPEG(-2)
- DVD-Video
  - Filmcodierung nach MPEG-2

## Weitere Audiokompressionsverfahren

- Dolby AC-3 (Audio Code No. 3)
  - Prinzipiell sehr ähnlich zu den MPEG-Verfahren
  - Time-Domain Aliasing Cancellation (TDAC)
    - » Überlappende Fenster in einer MDCT
    - » Transformation so ausgelegt, dass sich Redundanzen im Folgefenster auslöschen
- ATRAC (Adaptive Transform Acoustic Encoding)
  - Sony-Verfahren, entwickelt für MiniDisc
  - Ebenfalls Aufteilung auf Teilbänder, MDCT, Skalierung
  - Hörbare Verzerrungen bei mehrfachem Kopieren
- Microsoft Windows Media Audio (WMA)
  - Nicht offengelegtes Verfahren mit recht hoher Kompression (CD-Qualität bei 64 kbit/s)