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

Weiterführende Literatur:

Arne Heyda, Marc Briede, Ulrich Schmidt: Datenformate im Medienbereich, Fachbuchverlag Leipzig 2003, Kapitel 5

John Watkinson: MPEG Handbook, 2nd ed., Butterworth-Heinemann 2004

Wiederholung und Abrundung: Akustische Illusionen

- Fehlender Grundton
  - Melodie mit künstlich entferntem Grundton bei den einzelnen Noten
  - Melodie dennoch gut wiedererkennbar: Grundton wird ergänzt

  http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Suppress_fundamental.ogg

- Beliebig lange aufsteigende bzw. abfallende Tonleiter (Sheperd-Effekt)

  http://www.cs.ubc.ca/nest/imager/contributions/flinn/Illusions/ST/st.html

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

Verlustbehaftete Audio-Kompressionsverfahren

- Verlustbehaftete Audiokompression
  - Basiert auf psychoakustischem Modell der Tonwahrnehmung
  - Wichtigster Effekt:
    Maskierte Bestandteile des Audio-Signals werden nicht codiert
  - Bekanntester Standard: MPEG Audio Layer III (MP3)
- MPEG = Moving Picture Expert Group
  - Standardisierungsgremium von ISO (International Standards Organization) und IEC (International Electrotechnical Commission)
  - Arbeitet seit 1988 an Video- und Audio-Kompression
    - » Untergruppe MPEG/Audio
  - MPEG-Audio-Standards werden z.B. verwendet bei
    - » DAB (Digital Audio Broadcast)
    - » DVB (Digital Video Broadcast) incl. terrestrischer Variante DVB-T
    - » DVD-Video

MPEG Audio: Geschichte

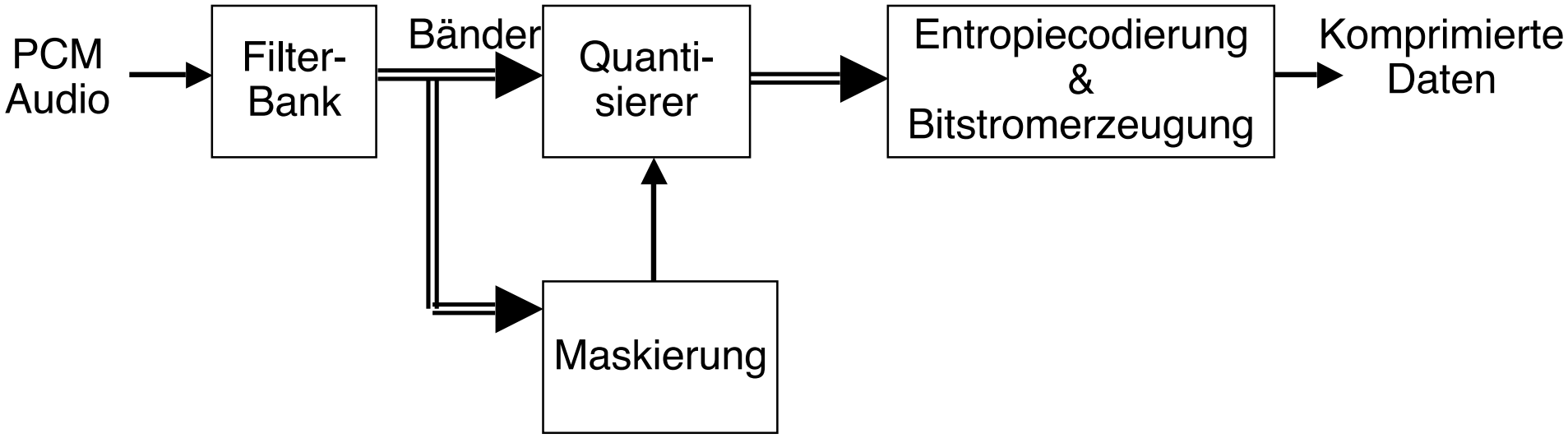
- EU-gefördertes "Eureka"-Projekt Nr. 147 (CCETT(F), IRT(D), Philips(NL))
  - MUSICAM (Masking pattern adapted universal sub-band integrated coding and multiplexing)
  - Ziel: DAB-Standard
- Parallelentwicklung (AT&T, Thomson, Fraunhofer, CNET):
  - ASPEC (Adaptive Spectral Perceptual Entropy Coding)
  - Ziel hochwertiges Audio über ISDN
- Juli 1990: Ausführliche Tests beim Schwedischen Rundfunk, anschließend Kombination der beiden Verfahren in die 3 MPEG-Layer.
  - Layer I: vereinfachtes MUSICAM, schwache Kompression, preisgünstig
  - Layer II: = MUSICAM, für DAB und Audio in DVB
  - Layer III: Kombination der Stärken von ASPEC und MUSICAM, hohe Kompression über Telekommunikationsverbindungen

Audio-Codierung in MPEG

- 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 der Audio-Kompressionsverfahren in drei „Layer“ (I, II, III) verschiedener Kompressionsstärke
  - Unabhängig von Wahl des Standards MPEG-1 bzw. MPEG-2 !
  - „MP3“ = MPEG Layer III (Kompression ca. 11:1)
    - » MP3 patentrechtlich geschützt, Fraunhofer IIS Erlangen
- Inzwischen wesentliche Weiterentwicklungen:
  - z.B. AAC, MPEG-4 Audio (siehe später)
  - Ogg-Vorbis

Referenzmusik: Tom’s Diner (Suzanne Vega)

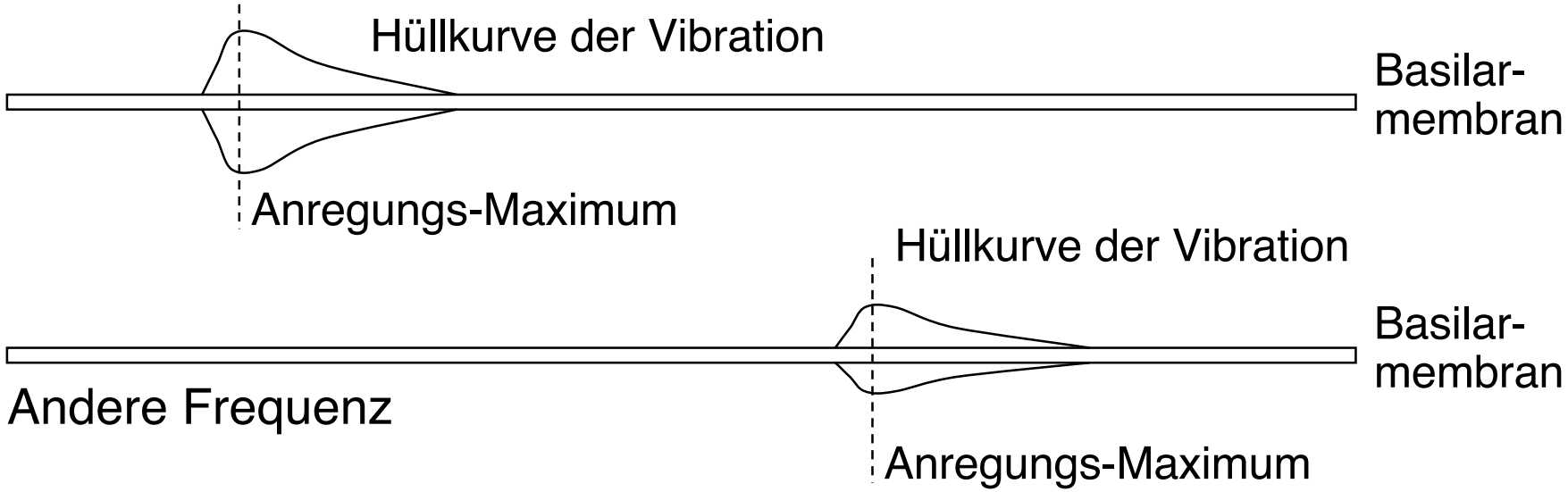
MPEG-Audio Encoder: Grundlegender Aufbau



- Hinweis: Der MPEG-Standard definiert nicht den Aufbau eines Encoders, sondern nur die Decodierung!
- Signal wird in Frequenzbänder aufgeteilt
- Maskierung auf der Basis der Bänder mit einem psychoakustischen Modell

Maskierung und Basilarmembran

- Der Maskierungseffekt erklärt sich physikalisch durch die Anregung der Basilarmembran
  - Frequenz entspricht Ort der Anregung auf der Basilarmembran
  - Genaue Wahrnehmung des Maximums der Anregung (Auflösung ca. 1/12 Halbton, bestimmt durch Abstand der Haarzellen)
  - Anregungen in direkter Frequenz-Nähe sind bis zu einer bestimmten Amplitude nicht wahrnehmbar

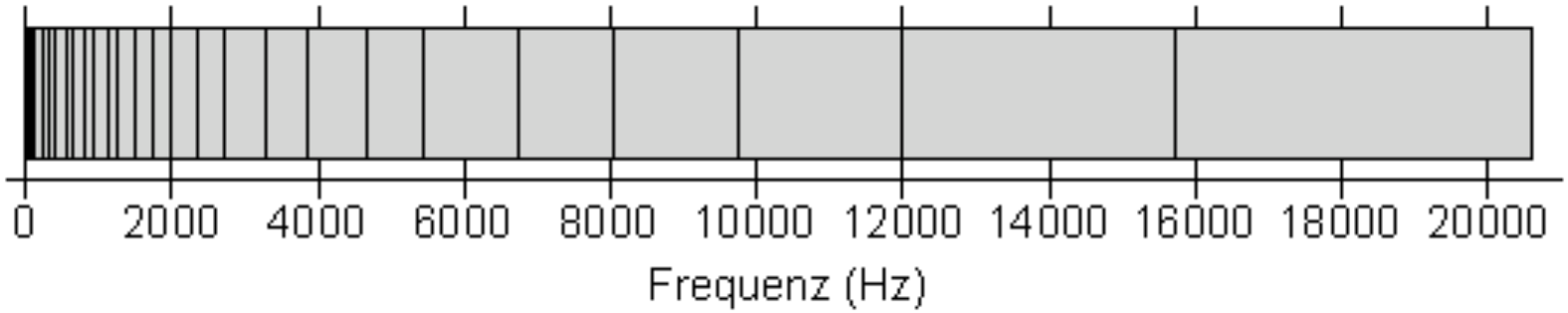


Kritische Bänder

- Einteilung des Hörbereichs in *kritische Bänder*
  - Breite (d.h. Bandbreite im Frequenzspektrum) der Vibrations-Hüllkurve auf der Basilarmembran
  - Breite der Bänder vergrößert sich mit der mittleren Bandfrequenz
- Der Grad der Maskierung einer bestimmten Frequenz ist lediglich abhängig von der Signalintensität im kritischen Band dieser Frequenz.
- "Bark-Skala":
  - Einteilung des Frequenzspektrums entsprechend der Breite kritischer Bänder
  - Benannt nach dem Bremer/Dresdner Physiker Heinrich Barkhausen.

27 Kritische Bänder

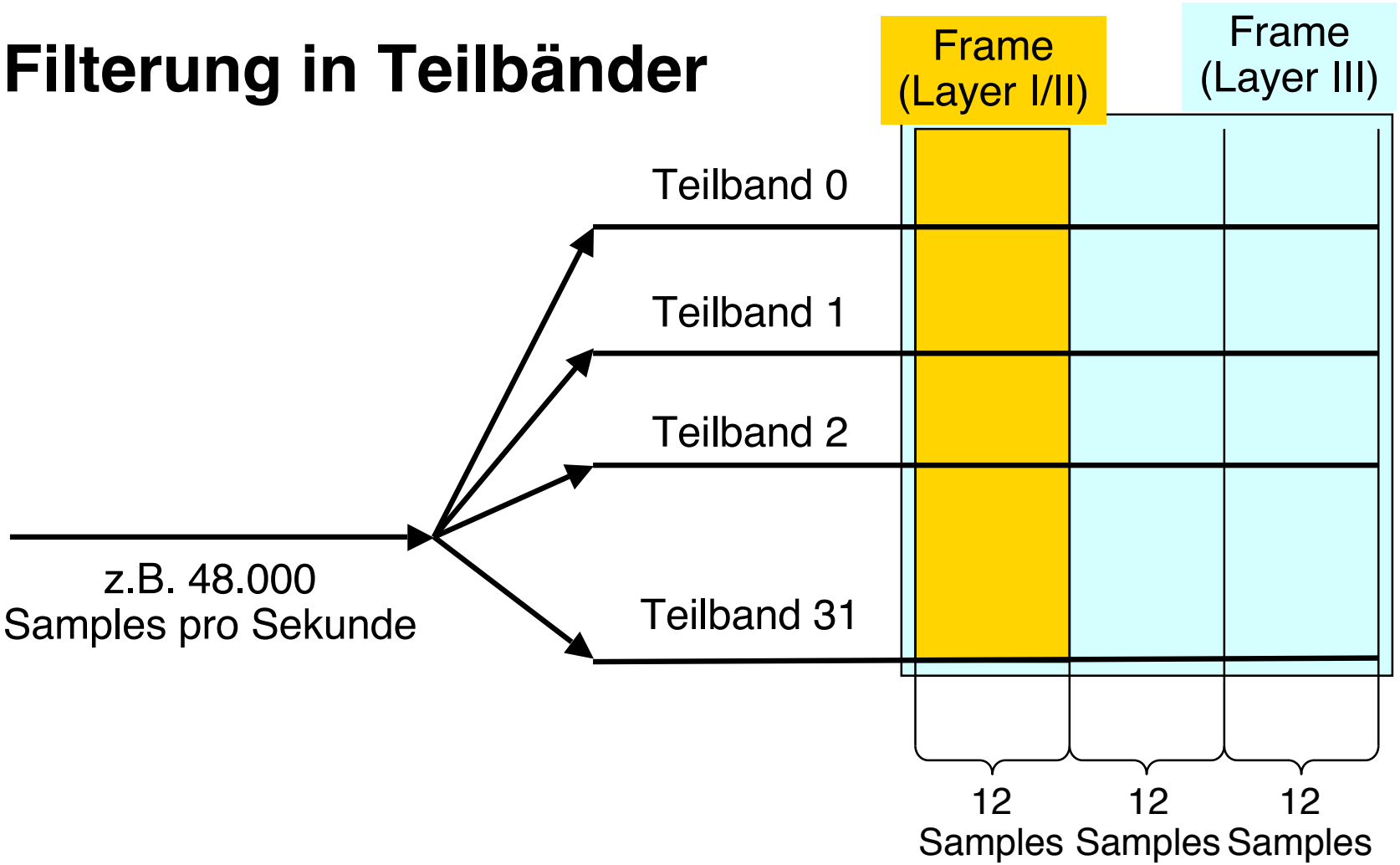
0 – 50
50 – 95
95 – 140
140 – 235
235 – 330
330 – 420
420 – 560
560 – 660
660 – 800
800 – 940
940 – 1125
1125 – 1265
1265 – 1500
1500 – 1735
1735 – 1970
1970 – 2340
2340 – 2720
2720 – 3280
3280 – 3840
3840 – 4690
4690 – 5440
5440 – 6375
6375 – 7690
7690 – 9375
9375 – 11625
11625 – 15375
15375 - 20250



Subband-Kodierung

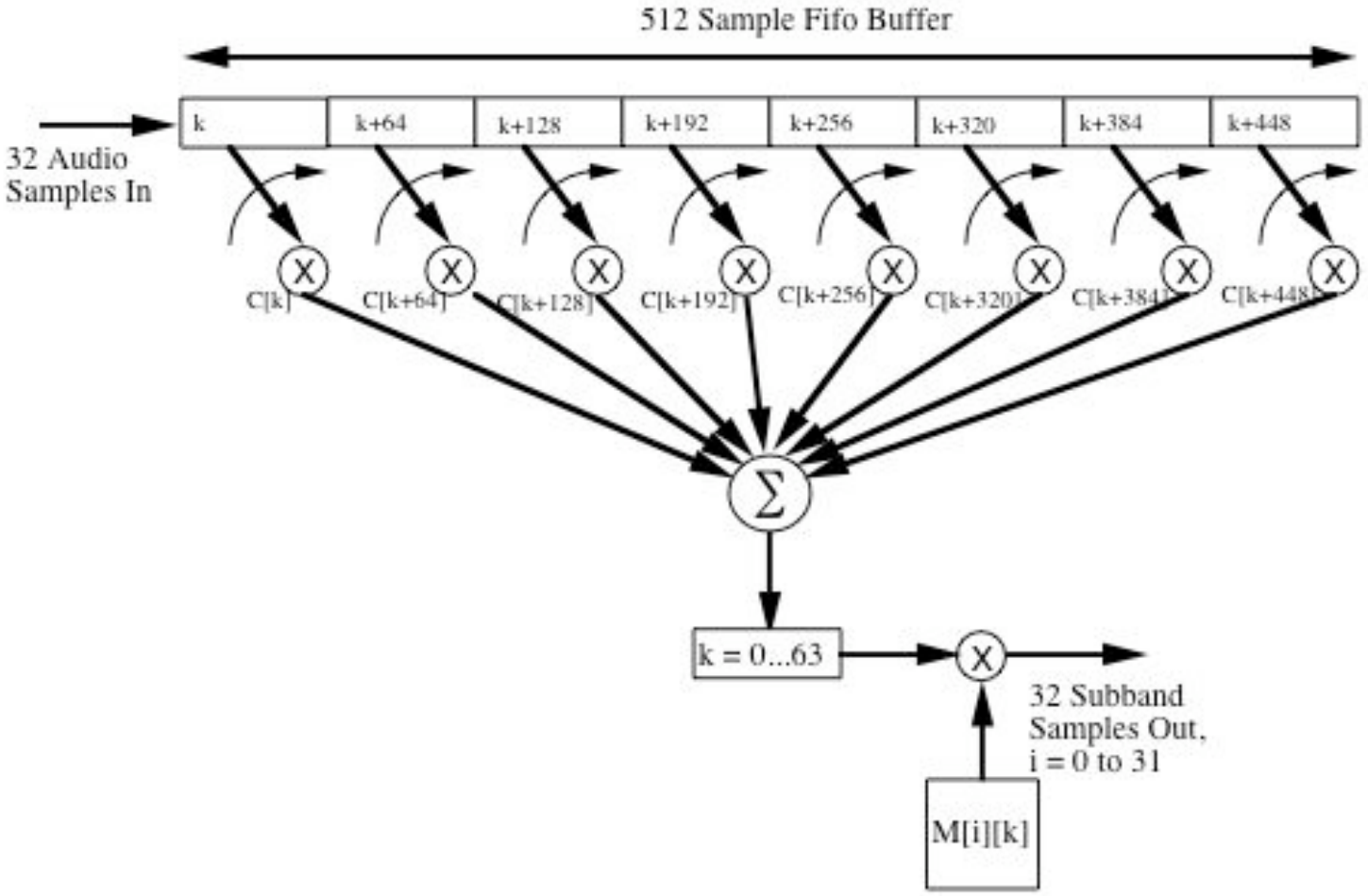
- Energie eines Tonsignals ist meist nicht gleichmäßig auf das Frequenzspektrum verteilt
- Idee:
  - Aufteilen des Signals in Teil-Frequenzbänder
  - Ermittlung des Signalpegels für jedes Teilband
  - Einzel-Codierung der Teilbänder mit jeweils angemessener Bitanzahl
    - » z.B. nicht belegtes Teilband: 0 Bit
  - Funktioniert optimal, wenn Teilbänder an kritische Bänder des Gehörs angepasst

Filterung in Teilbänder



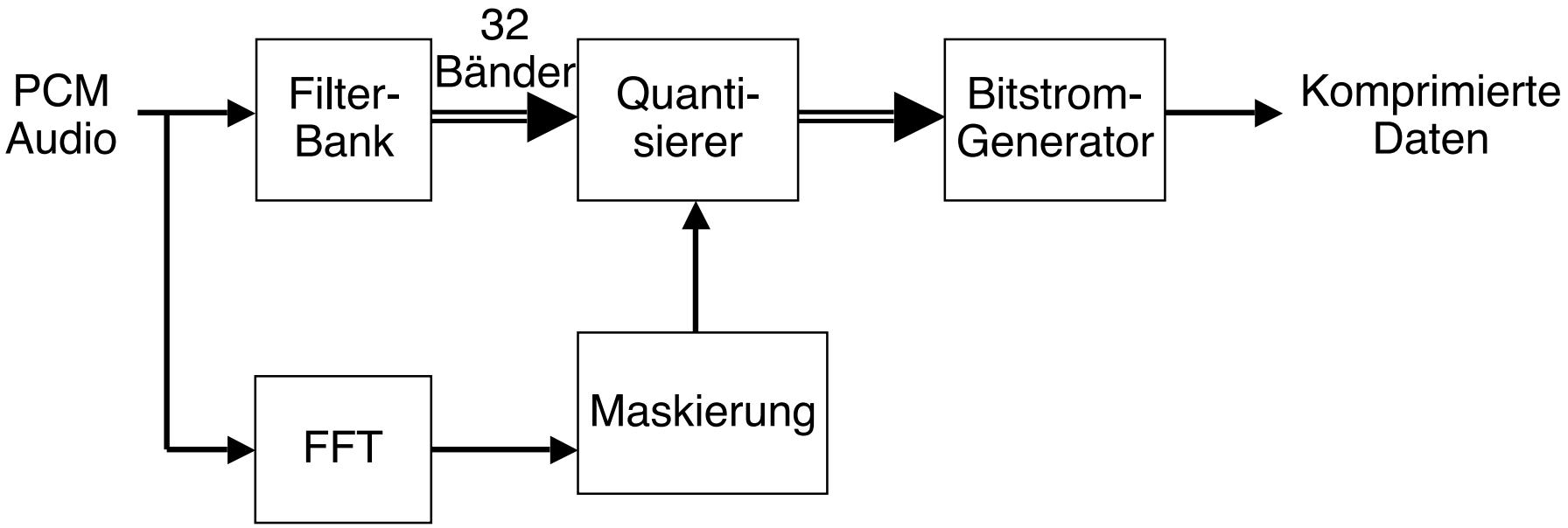
- 12 Samples entsprechen bei 48 kHz ca. 8 ms
- Ein Block von Samples in einem Teilband wird manchmal *bin* genannt
- *Frame*: Gesamtheit der Samples in allen Teilbändern
  12 x 32 = 384 Samples in Layer I/II, 3 x 12 x 32 = 1152 Samples in Layer III

Realisierung einer Filterbank



- Ca. 80 Multiplikationen und 80 Additionen pro Ausgabewert

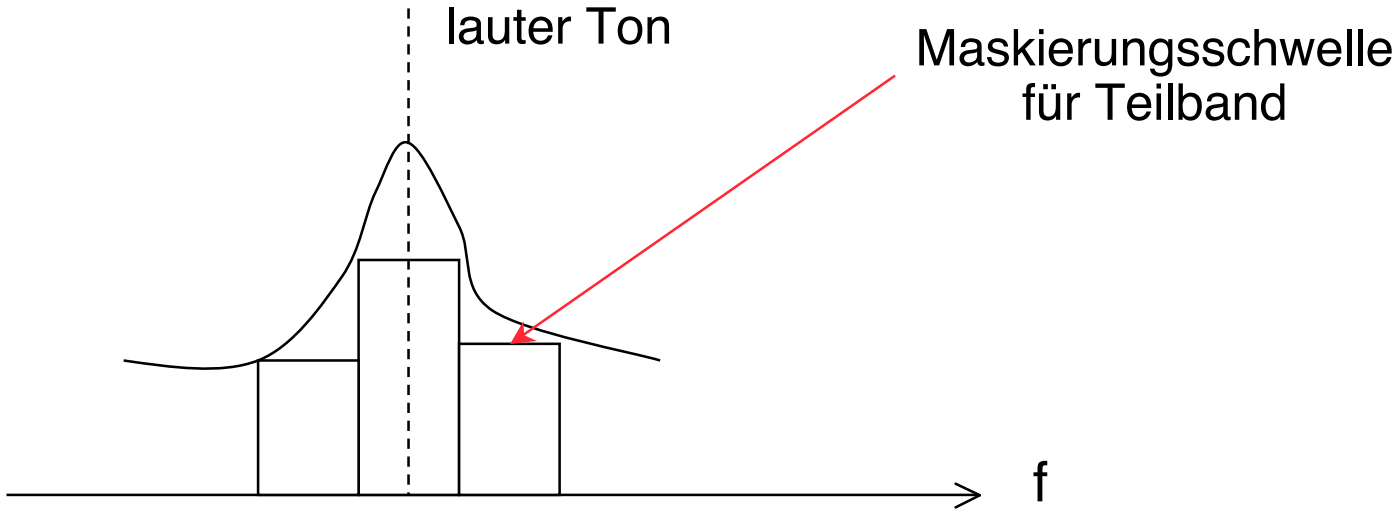
Aufbau eines MPEG-Layer I/II Encoders



- Signal wird in 32 *gleich breite* Frequenzbänder aufgeteilt
  - Effektive Bandfilter funktionieren nur für gleich breite Teilbänder
  - Breite der Teilbänder bei Layer I/II: 750 Hz
  - „Unterabtastung“ der Subbänder: Keine zusätzliche Bandbreite benötigt
- Wegen der Eigenschaften des menschlichen Gehörs sind die Teilbänder ungeeignet für Maskierung
  - Zu breit bei niedrigen und zu schmal bei hohen Frequenzen
  - Einsatz einer zusätzlichen Frequenzanalyse (Fast Fourier Transform, FFT)

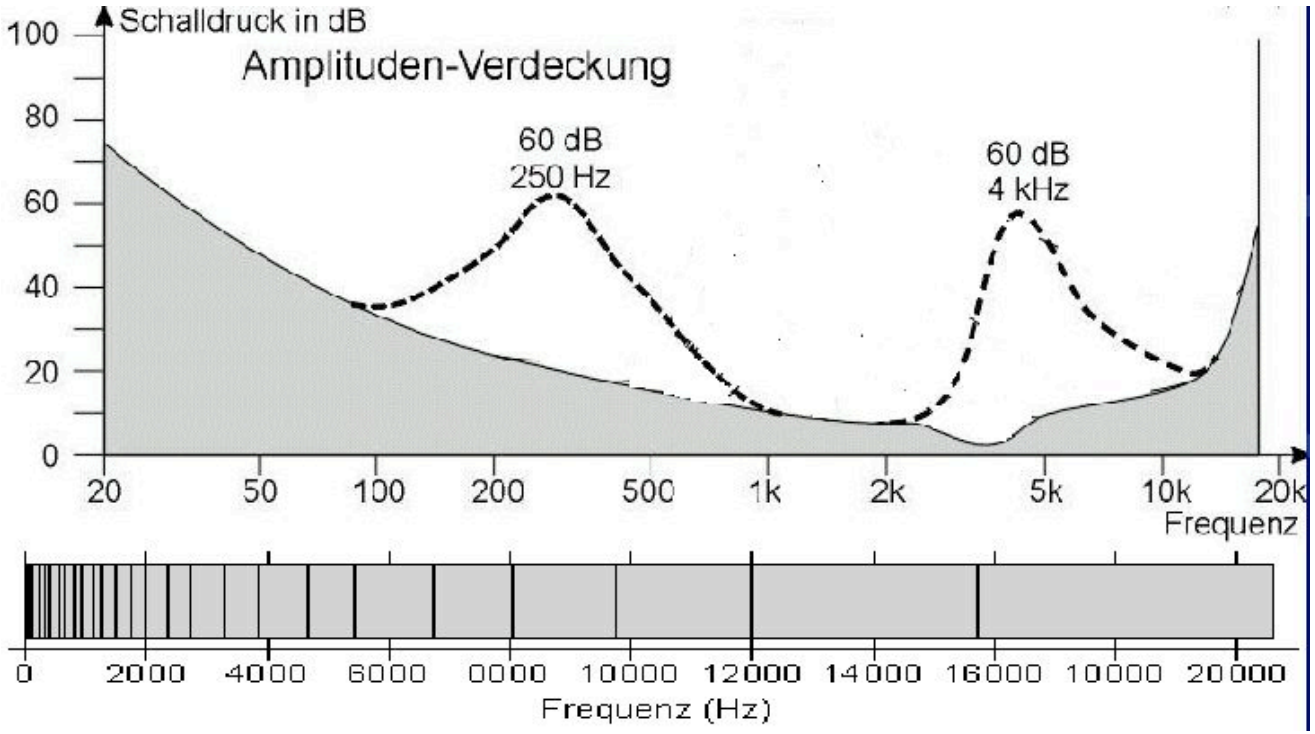
FFT zur Berechnung der Maskierungsschwelle

- FFT = Fast Fourier Transform
- Umsetzung des Amplitudensignals in Frequenzspektrum
  - Angewandt auf die Länge eines Frames (12 Samples)
- Ergebnis:
  - Aufteilung des aktuellen Signals auf viele (Layer I 512, Layer II 1024) Frequenzanteile
- Weiterverarbeitung:
  - Berechnung der aktuellen Kurve für die (frequenzabhängige) Maskierungsschwelle



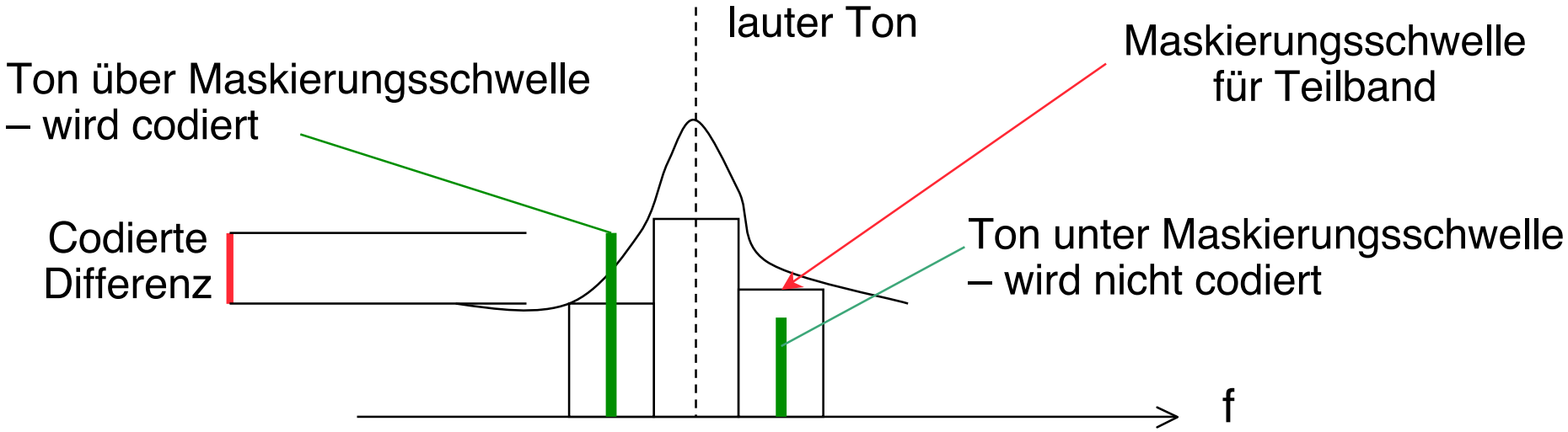
Psychoakustisches Modell

- Aus dem aktuellen Signalspektrum ergibt sich eine aktuelle Hörbarkeitskurve (wird berechnet)
  - Insbesondere: Für jedes Frequenzband eine Maskierungsschwelle, unter der der Ton nicht mehr hörbar ist
  - Details: z.B. tonale vs. geräuschartige Anteile verschieden behandelt



Maskierung

- Die Maskierungsschwellen aus dem psychoakustischen Modell werden mit dem tatsächlichen Signalpegel (pro Teilband) verglichen
  - Verdeckte Signalanteile werden nicht codiert
- Es genügt bei teilweiser Maskierung eine geringere Bitauflösung
  - Wir nehmen nur den „Differenzanteil“ oberhalb der Maskierungsschwelle wahr!



Maskierung: 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

- Annahme: Psychoakustisches Modell liefert, dass der Pegel in Band 8 (60 dB) zu folgender Maskierung der Nachbarbänder führt:
  –> Maskierung um 12 dB in Band 9
  –> Maskierung um 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 (Rauschen) zulässig,
  d.h. mit zwei Bit weniger codierbar

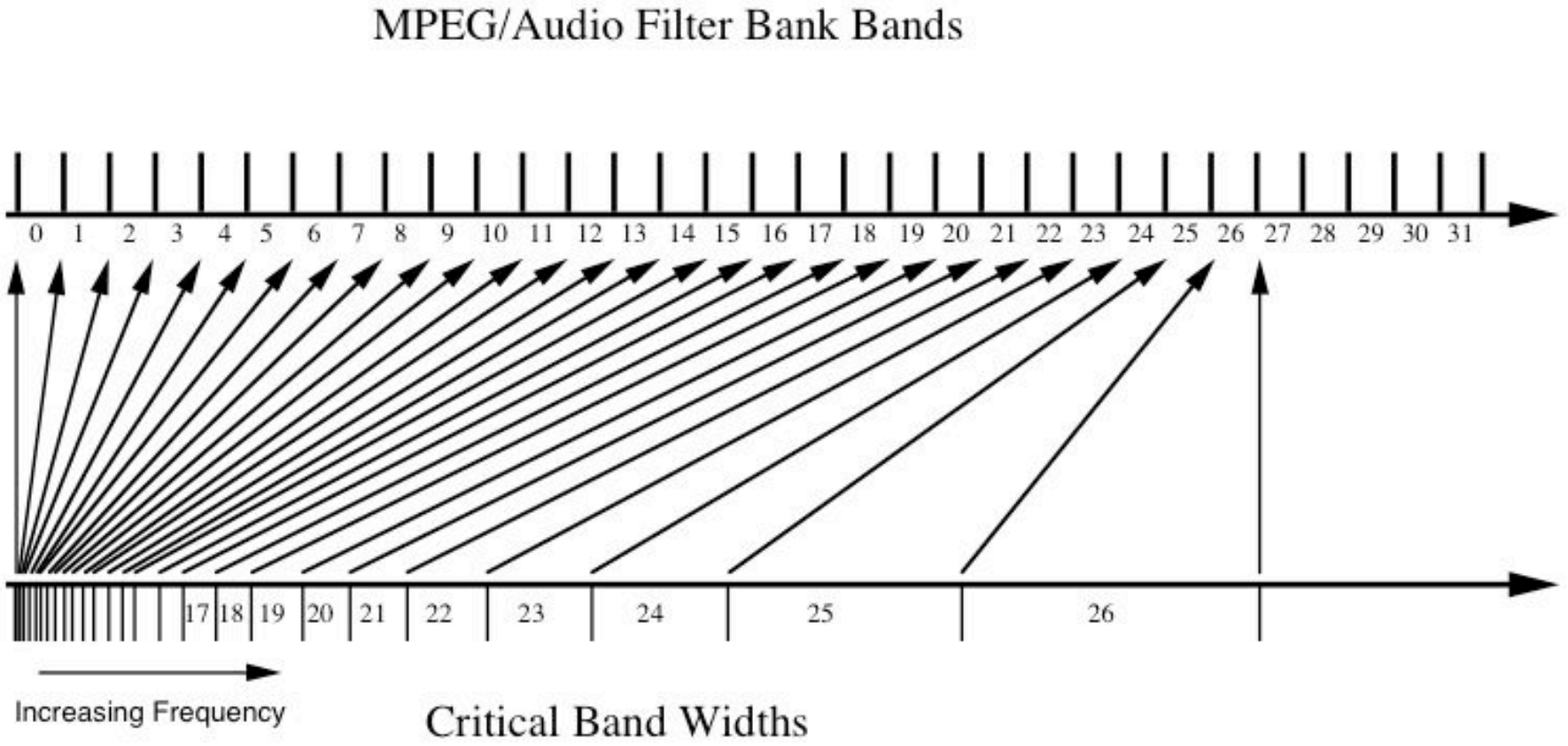
1 Bit der Codierung = doppelter Amplitudenumfang = 6 dB Genauigkeit !

Unterschiede der MPEG Layer

- Layer I:
  - 32 gleichbreite Teilbänder
  - FFT mit 512 Punkten
  - 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
  - Größere Frames (36 Samples)
  - (Modified) DCT der Teilbänder
    (in überlappenden „Fenstern“ variierender Breite)
  - Zusätzliche Entropiecodierung (Huffman)
  - Behandlung von Stereo-Redundanzen

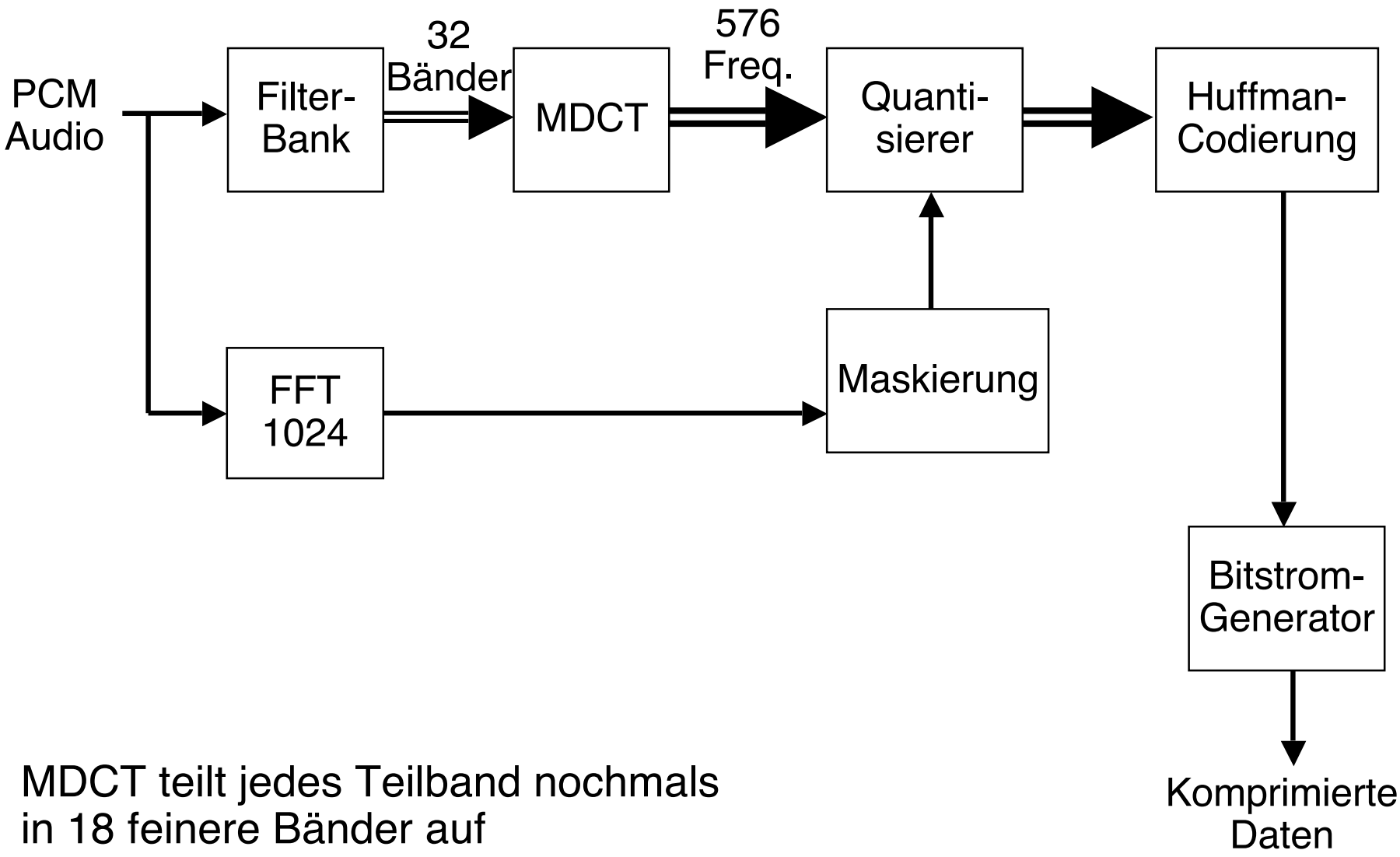
Kritische Bänder und Filterbänder

- Situation in MPEG Layer I/II:



Ziel: bessere Anpassung an die Bandbreite der kritischen Bänder
Aber: Nicht durch Filterbank realisierbar

Aufbau eines MPEG-Layer III Encoders



MDCT teilt jedes Teilband nochmals
in 18 feinere Bänder auf

DCT: Diskrete Cosinus-Transformation

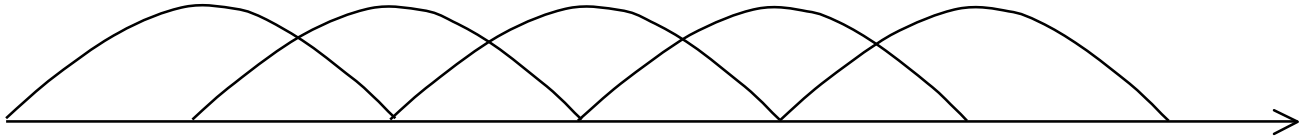
- Ähnlich zur Fourier-Transformation:
  - Gegebenes Signal wird durch Anteile bestimmter Grundfrequenzen beschrieben
- Diskrete Transformation:
  - *n* Messwerte werden in *n* Anteilswerte *(Koeffizienten)* umgerechnet
  - Lineare Transformation (Matrixmultiplikation)
    - » D.h. sehr effizient zu berechnen
- Vorteile der Cosinus-Transformation
  - Besser geeignet für Kompression (Filtern von Frequenzen)
  - Bessere „Kompaktheits“-Eigenschaften (Energie auf wenige Grundfrequenzen konzentriert)

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k \cos\left[\frac{\pi}{n}(j+1/2)(k+1/2)\right]$$

Modified Discrete Cosine Transform MDCT (1)

- DCT
  - entspricht kleineren Teilbändern bei der Maskierungsanalyse
  - bei Audio Probleme mit Artefakten an Blockgrenzen
- Modified DCT
  - Überlappung der Cosinusfunktionen um 50%
  - Damit Vermeidung von Artefakten durch Blockgrenzen
  - Doppelt einbezogene Werte heben sich gegenseitig auf
  - Adaption der „Fenstergröße“ an Signalverlauf möglich

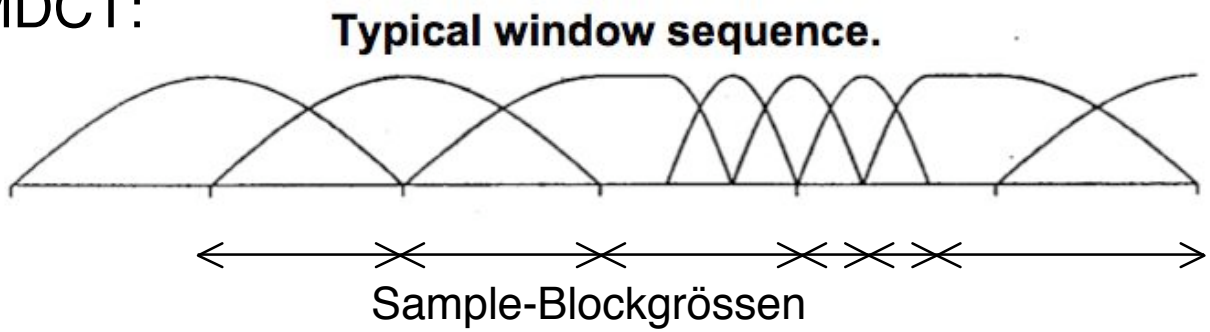
Überlappungen der Fenster bei MDCT:



Modified Discrete Cosine Transform MDCT (2)

- Modified DCT
  - Adaption der „Fenstergröße“ an Signalverlauf möglich

MDCT:



- Bei MP3: 6-Sample-Blöcke (Transienten) und 18-Sample-Blöcke
  6 Samples: Gut für schnelle Änderungen (Transienten)
  18 Samples: Gute Frequenzauflösung (wenn Signal relativ stationär)

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:
  - Räumliches Hören kann z.T. MPEG-Kompressionsverluste wahrnehmbar machen; spezielle Vorkehrungen nötig

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

MP3 Beispiel (68 KB) MP4 Beispiel (28KB)

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 komprimieren/dekomprimieren
- Microsoft Windows Media Audio (WMA)
  - Nicht offengelegtes Verfahren mit recht hoher Kompression (CD-Qualität bei 64 kbit/s)

VORBIS

- Meist in Zusammenhang mit dem "Container"-Format (zur Datenspeicherung) *Ogg* benutzt, deshalb auch *Ogg-Vorbis*
- Offenes und kostenloses Audio-Kompressionsverfahren
  - Xiph.org Stiftung, OpenSource-Projekt
  - Reaktion auf Patentansprüche aus MP3
- Ähnlich AAC:
  - Reine MDCT
  - Signal wird in "Basis-Rauschen" und Rest aufgeteilt
    - » Angenehmeres Verhalten bei zu niedriger Bitrate als MP3
  - "Bitrate Peeling":
    - » Vorhandene Dateien in der Bitrate reduzieren

Einfachere verlustbehaftete Verfahren

- Stummunterdrückung *(silence compression)*
  - Ausblenden von Zeitbereichen mit Nullsignal
- μ-Gesetz-Codierung bzw. a-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)