2.2 Kompressionsverfahren für Standbilder

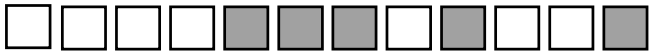
2.2.1 Fax-Kompression

Standards in der Telekommunikation werden von der International Telecommunications Union (ITU-T) entwikkelt (früher: CCITT = Commitée Consultatif International de Téléphonie et Télégraphie).

Der Standard für verlustfreie Kompression von Faksimile-Anwendungen war einer der ersten Standards zur Bildkompression.

Bilder werden von Faxalgorithmen der Gruppe 3 als **bitonal** betrachtet, d.h. jedes Pixel kann entweder schwarz oder weiß sein. So kann jedes Pixel mit einem Bit repräsentiert werden. In jedem bitonalen Bild gibt es in der Regel lange Bitfolgen ("runs"), die entweder vollkommen schwarz oder vollkommen weiß sind.

Beispiel:



Lauflängen-Kodierung: 4w 3s 1w 1s 2w 1s

Fax-Standards der ITU (vormals CCITT)

Standard T.4

Erstmals verabschiedet 1980, überarbeitet 1984 und 1988 (Fax Gruppe 3) für *fehleranfällige* Leitungen, insbesondere Telefonleitungen.

A4-Dokumente in schwarz/weiß.

100	dots per inch (dpi) oder 3,85 Zeilen/mm vertikal
1728	Pixel pro Zeile

Ziel:
Übertragung einer Seite in einer Minute bei 4800 bit/s

Standard T.6

Erstmals verabschiedet 1984 (Fax Gruppe 4) für *fehlerfreie* Leitungen oder digitale Speicherung.

Standards für die Fax-Kompression

Fax Gruppe 3, ITU-T Recommendation T.4:

Kodierungsansatz 1: Modified Huffman Code (MH)

- Bild wird als Folge von Pixel-Zeilen betrachtet.
- Für jede Zeile wird eine Lauflängen-Kodierung ermittelt.
- Die (Lauflänge,Wert)-Beschreibung wird dann Huffman-kodiert, mit standardisierter, festgeschriebener Tabelle
- Dabei werden schwarze und weiße Runs mit separaten Huffman-Codes behandelt, da die Auftrittswahrscheinlichkeiten der Lauflängen recht unterschiedlich sind.
- Zur Fehlererkennung wird nach jeder Zeile ein EOL (end-of-line=)-Codewort eingefügt. Dies ermöglicht das Wiederaufsetzen nach Bitübertragungsfehlern.

Fax-Kompression

Kodierungsansatz 2: Modified Read (MR) Code

- Pixelwerte der vorangehenden Zeile werden für die Vorhersage der aktuellen Zeile verwendet.
- Anschließend wird eine Lauflängen-Kodierung und ein statischer Huffman-Code wie bei MH eingesetzt.
- Auch hier wird ein EOL-Codewort verwendet.

Die Kodierungsansätze MH und MR werden regelmäßig abgewechselt, um die Fortpflanzung von Fehlern zu vermeiden.

Huffman-Tabelle für Fax Gruppe 3 (Ausschnitt)

White run length	Code word	Black run length	Code word
0	00110101	0	0000110111
1	000111	1	010
2	0111	2	11
3	1000	3	10
4	1011	4	011
5	1100	5	0011
6	1110	6	0010
7	1111	7	00011
8	10011	8	000101
9	10100	9	000100
10	00111	10	0000100
11	01000	11	0000101
12	001000	12	0000111
13	000011	13	00000100
14	110100	14	00000111
15	110101	15	000011000
16	101010	16	0000010111
17	101011	17	0000011000
18	0100111	18	0000001000
19	0001100	19	00001100111
20	0001000	20	00001101000

Fax Gruppe 4

Fax Gruppe 4, ITU-T Recommendation T.6

Kodierungstechnik: Modified Modified Read Code (MMR)

- Vereinfachung des MR-Codes; es werden keine Fehlererkennungsmechanismen mehr eingesetzt, um die Kompressionsrate zu erhöhen.

Kompressionsraten

	Geschäftsdokumente
Gruppe 3:	20:1
Gruppe 4:	50:1

Für Fotos u. Ä. ist die Kompressionsrate schlecht, weil dort nur kurze Lauflängen vorkommen. Eine adaptive arithmetische Kodierung wäre beispielsweise besser geeignet.

2.2.2 Block Truncation Coding (BTC)

Ein einfaches Verfahren für *Graustufen*-Bilder. Man nimmt an, dass jedes Pixel im Original mit einem Grauwert von 0 (schwarz) bis 255 (weiß) beschrieben ist.

Algorithmus BTC

1. Zerlege das Bild in Blöcke der Größe n x m Pixel
2. Berechne Mittelwert und Standardabweichung der Pixelwerte für jeden Block

$$\mu = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} Y_{i,j}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{nm} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} (Y_{i,j} - \mu)^2}$$

mit $Y_{i,j}$ = Helligkeit (Graustufe) des Pixels.

3. Weise dem Block eine Bitmatrix der Größe n x m nach folgender Regel zu:

$$B_{i,j} = \begin{cases} 1 \ldots falls \ Y_{i,j} \leq \mu \\ \\ 0 \ldots sonst \end{cases}$$

Algorithmus BTC (Forts.)

4. Berechne zwei Graustufenwerte für den Block, *a* für den Wert der dunkleren Pixel, *b* für den Wert der helleren Pixel:

$$a = \mu - \sigma \sqrt{p/q}$$

$$b = \mu + \sigma \sqrt{q/p}$$

p ist dabei die Anzahl der Pixel, die heller als der Mittelwert • sind, *q* die Anzahl der dunkleren Pixel.

5. Ausgabe: (Bitmatrix, *a*, *b*) für jeden Block

Dekompression bei BTC

Für jeden Block werden die Graustufen der einzelnen Pixel wie folgt berechnet:

$$Y'_{i,j} = \begin{cases} a \ldots falls \;\; B_{i,j} = 1 \\ b \ldots sonst \end{cases}$$

Beispiel für die Kompressionsrate

Blockgröße:	4 x 4
Original (Grauwerte)	1 Byte pro Pixel
Kodierte Darstellung:	Bitmatrix mit 16 Bits + 2 x 8 Bits für *a* und *b*

=> Reduktion von 16 Bytes auf 4 Bytes

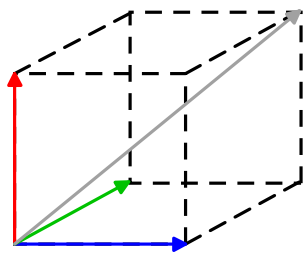
2.2.3 Color Cell Compression

Ein Verfahren zur Kompression von Farbbildern. Im Prinzip könnte man BTC für jeden der drei Farbkanäle RGB getrennt anwenden. Aber CCC liefert qualitativ bessere Ergebnisse.

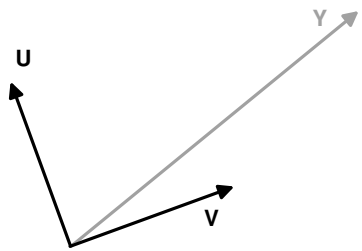
Farbmodelle

Das klassische Farbmodell ist das **RGB-Modell**. Der Farbwert eines Pixels ergibt sich aus den Intensitäten der Komponenten rot, grün und blau. Die maximale Intensität aller drei Farben ergibt weiß.

Beim **YUV-Modell** ist Y die Helligkeit (Graustufe) des Pixels, U und V sind zwei "senkrecht darauf stehende" Farbvektoren. Der Farbwert eines Pixels läßt sich leicht von dem einen in das andere Modell umrechnen.



RGB-Modell



YVU-Modell

Das YUV-Modell hat den Vorteil, dass man den Helligkeitswert eines Pixels unmittelbar kennt. So kann man leicht eine Graustufenversion des Bildes darstellen. Weiterhin kann man bei der Kompression den Helligkeitswert mit einer anderen Auflösung kodieren als die Farbvektoren.

Algorithmus CCC

1. Zerlege das Bild in Blöcke der Größe m x n Pixels.
2. Berechne für jedes Farbpixel die Helligkeit gemäß:

$$Y = 0.3P_{red} + 0.59P_{green} + 0.11P_{blue}$$

   Y=0 entspricht schwarz, Y=1 entspricht weiß
3. Für c = red, green, blue berechne die mittleren Farbwerte der Pixel gemäß

$$a_c = \frac{1}{q} \sum_{Y_{i,j} \le \mu} P_{c,i,j}\ , \qquad b_c = \frac{1}{p} \sum_{Y_{i,j} \succ \mu} P_{c,i,j}$$

   p ist die Anzahl der Pixel, die heller als der Mittelwert sind, q die Anzahl der dunkleren Pixel.

Algorithmus CCC (Forts.)

4. Weise dem Block eine Bitmatrix der Größe n x m nach folgender Regel zu:

$$B_{i,j} = \begin{cases} 1 \ldots falls \;\; Y_{i,j} \leq \mu \\ \\ 0 \ldots sonst \end{cases}$$

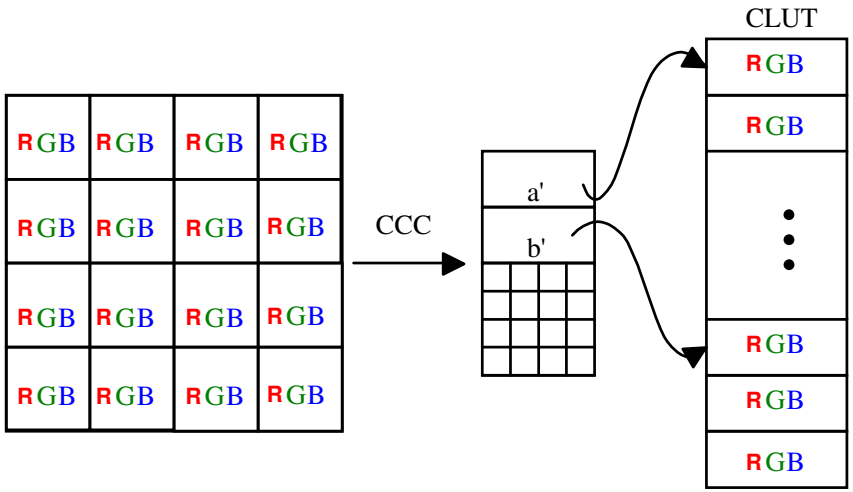
5. Die Werte a = (a_{red}, a_{green}, a_{blue}) und b = (b_{red}, b_{green}, b_{blue}) werden in eine Farbtabelle abgebildet, gemäß einem Nähe-Maß. Es ergeben sich die Werte a' und b' als Indizes der Farbtabelle (Color Lookup Table, CLUT).
6. Ausgabe: (Bitmatrix, a', b') für jeden Block

Dekompression bei CCC

Die Dekompression funktioniert für jeden Block wie folgt:

$$P'_{i,j} = \begin{cases} CLUT[a'] \ldots fallsB_{i,j} = 1 \\ CLUT[b'] \ldots sonst \end{cases}$$

Funktionsweise von CCC

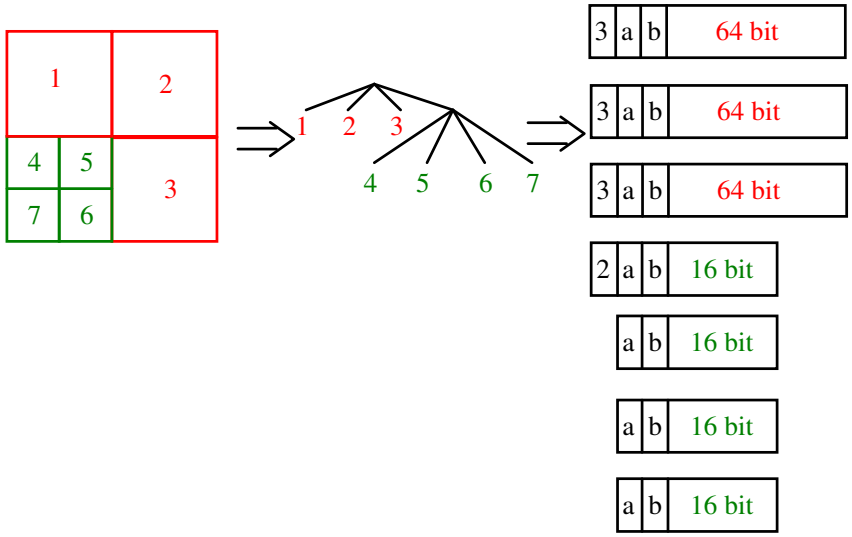


Extended Color Cell Compression (XCCC)

Eine Erweiterung von CCC zur weiteren Verbesserung der Kompressionsrate.

Idee

Hierarchie von Blockgrößen. Man versucht zunächst, einen großen Block mit CCC zu kodieren. Wenn die Abweichung der tatsächlichen Farbwerte im Block von a‘ oder b‘ größer ist als ein vorgegebener Schwellenwert, wird der Block in vier Teilblöcke zerlegt. Der Algorithmus arbeitet rekursiv.



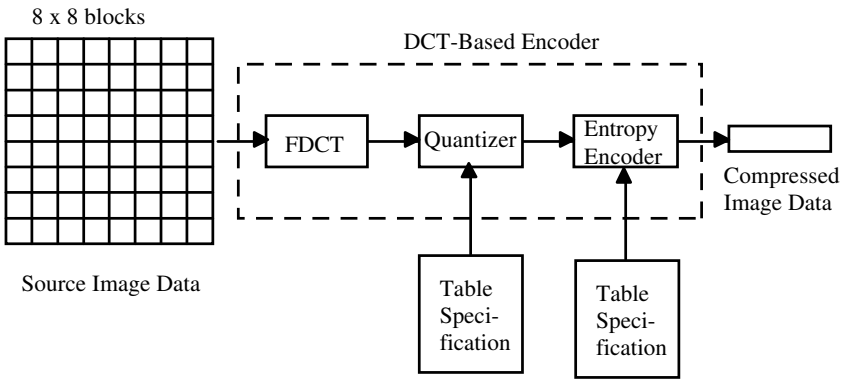
2.2.4 JPEG

Die Joint Photographic Experts Group (Komitee der ISO) hat einen sehr effizienten Kompressionsalgorithmus entwickelt, der nach ihr benannt ist. JPEG hat beispielsweise im WWW eine sehr weite Verbreitung gefunden.

Kompression in vier Schritten:

1. Bildaufbereitung
2. Diskrete Cosinus-Transformation (DCT)
3. Quantisierung
4. Entropie-Kodierung

Der DCT-basierte Kodierungsprozess



JPEG "Baseline" Mode

Ein Kompressionsverfahren auf der Basis einer Transformation aus der Zeitdomäne in die Frequenzdomäne

Bildtransformation

FDCT (Forward Discrete Cosine Transformation). Sehr ähnlich der Fourier-Transformation. Wird auf jeden Block von 8x8 Pixeln einzeln angewendet.

$$S_{vu} = \frac{1}{4} C_u C_v \sum_{x=0}^{7} \sum_{y=0}^{7} s_{yx} \cos\frac{(2x+1)u\pi}{16} \cos\frac{(2y+1)v\pi}{16}$$

mit

$$C_u, C_v = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ für } u,v=0 \\ 1 \text{ sonst} \end{cases}$$

64-mal anwenden, ergibt 64 Koeffizienten in der Frequenzdomäne

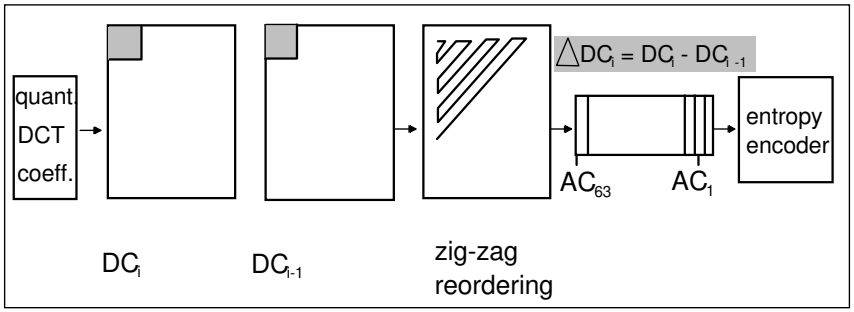
Quantisierung

Anzahl der Quantisierungsstufen je DCT-Koeffizient einzeln einstellbar (Q-Faktor). Dies geschieht durch Angabe einer Quantisierungstabelle.

Entropie-Kodierung

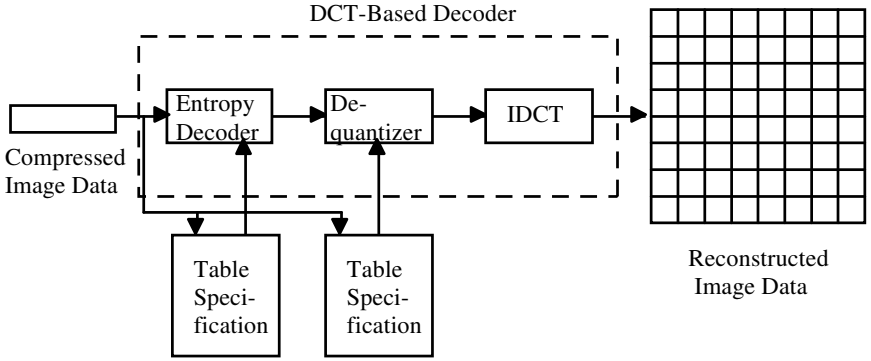
1. DC-Koeffizient sehr wichtig (Grundfarbton). Kodierung durch Differenzbildung zu vorherigem DC-Koeffizienten.
2. AC-Koeffizienten, Abarbeitung in „Zick-Zack"-Reihenfolge, Lauflängen-Kodierung
3. Huffman-Kodierung

Quantisierung und Entropie-Kodierung



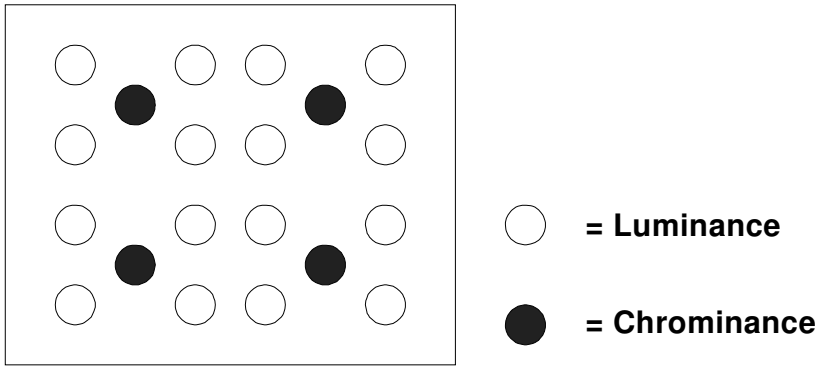
Das Zickzack-Auslesen der Koeffizienten ist besser als ein zeilenweises Auslesen. Grund: Nach der Quantisierung kommen in der rechten unteren Dreiecksmatrix viele gleiche Werte nacheinander vor, darunter viele Nullen (höhere Frequenzen entsprechen schärfer werdenden Kanten). Die Zickzack-Anordnung maximiert die Lauflängen für die anschließende Entropie-Kodierung (Lauflängen-Kodierung, gefolgt von der Huffman-Kodierung).

JPEG Decoder



Kodierung der Farbvektoren mit geringerer Auflösung ("color subsampling")

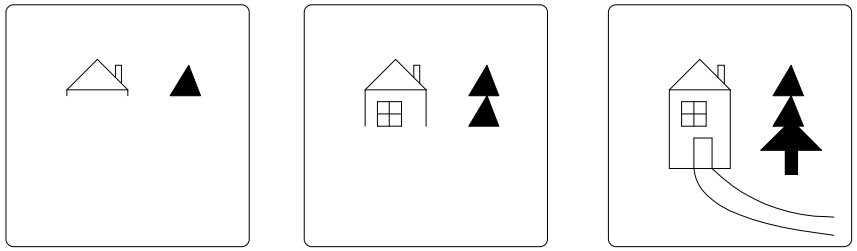
Ein Vorteil des YUV-Farbmodells ist es, dass man die Farbwerte U und V eines Pixels mit niedrigerer Auflösung kodieren kann als den Helligkeitswert Y. Das menschliche Auge reagiert nämlich auf Fehler im Helligkeitswert empfindlicher als auf Fehler in den Farbwerten. In JPEG verwendet man dieses **color subsampling** in der Weise, dass für jeweils vier Helligkeitswerte Y nur je ein Chroma-Wert U und V kodiert wird.



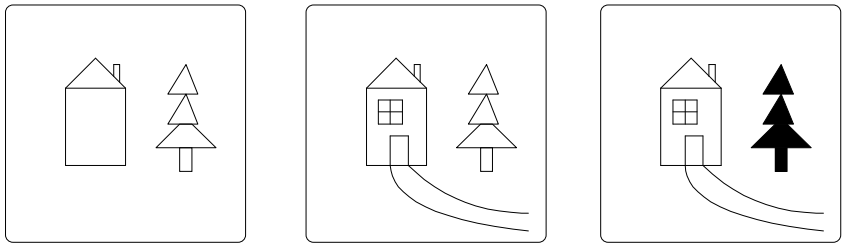
Vier Y-Blöcke der Größe 8x8 mit einem zugehörigen U-Block der Größe 8x8 und einem V-Block der Größe 8x8 bezeichnet man als einen **Macroblock**.

Verschiedene Modi in JPEG

JPEG Sequential Mode



JPEG Progressive Mode

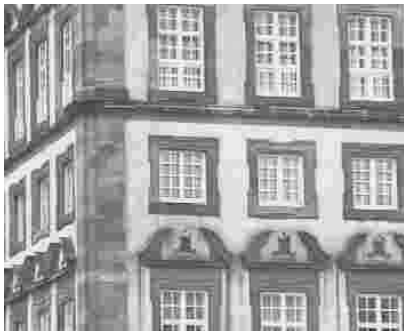


Quantisierungsfaktor und Bildqualität

Bildbeispiel 1

Schloss, Original

Schloss, Q=6



Bildbeispiel 1 (Forts.)

Schloss, Q=12

Schloss, Q=20

Bildbeispiel 2

Blumen, Original

Blumen, Q=6

Bildbeispiel 2 (Fortsetzung)

Blumen, Q=12

Blumen, Q=20

2.2.5 Bildkompression mit Fraktalen

Theorie der Fraktale = Theorie der **Selbstähnlichkeit**. Selbstähnlichkeit ist mathematisch beschreibbar (B. Mandelbrot).

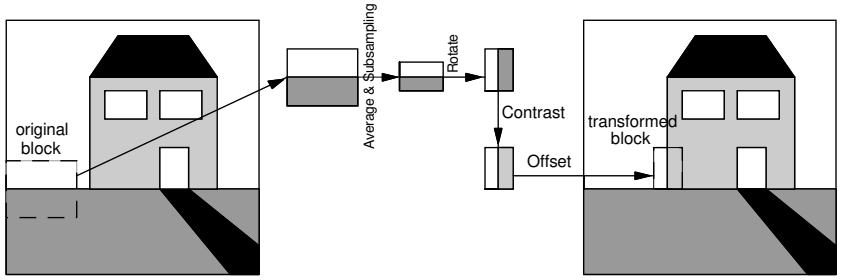
Anwendungsbeispiel: Küstenlinie einer Insel

Idee für die Bildkompression:

- Häufig ist ein Ausschnitt aus einem Bild einem anderen Ausschnitt ähnlich. Genauer: Er kann unter Anwendung von einfachen mathematischen Operationen aus dem anderen Ausschnitt errechnet werden (Translation, Rotation, Skalierung)
- Kodierung: Voll-Kodierung des ersten Bildausschnitts, für die ähnlichen Bildausschnitte Ausgabe der **Transformationsoperatoren**.

Bildkompression mit Fraktalen

Beispiel



Literatur

M.F. Barnsley, L.P. Hurd: Bildkompression mit Fraktalen, Vieweg-Verlag, 1996

2.3 Kompressionsverfahren für Video

2.3.1 MPEG

Moving Picture Experts Group (Komitee der ISO).

MPEG konzentriert sich nicht nur auf Videodaten, sondern behandelt auch die damit verbundenen Audioströme. Ziel von MPEG-I: ein Videosignal soll samt Audio bei annehmbarer Qualität auf 1,5 Mbit/s komprimiert werden. (Datenrate einer T1-Verbindung in den USA).

Ähnlich wie JPEG sollte MPEG ein möglichst allgemeiner Standard werden, der viele Anwendungen unterstützt:

- Generalität
- Flexibilität
- Effizienz

Entwurfsziele des MPEG-1-Videokompressionsalgorithmus

- Wahlfreier Zugriff innerhalb von 0,5 s ohne signifikanten Qualitätsverlust
- schnelle Vorwärts-/Rückwärtssuche
- Bildfolge kann rückwärts abgespielt werden
- gute Editierbarkeit

MPEG - Videokodierung

Vier Frame-Typen in MPEG-1:

I-Frame (Intra Frame)
Intra-kodiertes Vollbild, sehr ähnlich dem JPEG-Standbild, kodiert mit DCT, Quantisierung, Lauflänge und Huffman

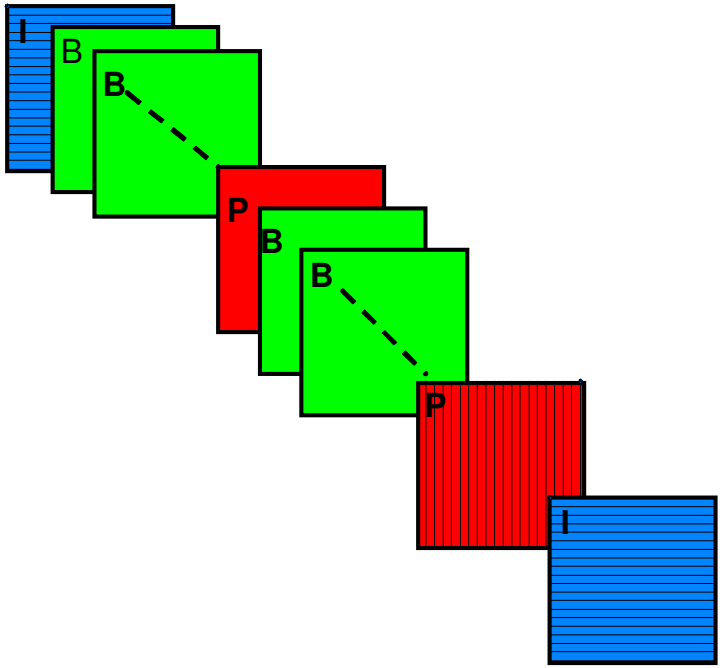
P-Frame (Predicted Frame)
Bezugnahme auf vorhergehende I- und P-Bilder.
Delta-Kodierung, DPCM-kodierte Makroblöcke
Bewegungsvektoren möglich

B-Frame (Interpolated Frame)
"bidirectionally predictive coded pictures", Bezugnahme auch auf nachfolgende Bilder, auch Interpolation zwischen Makroblöcken möglich

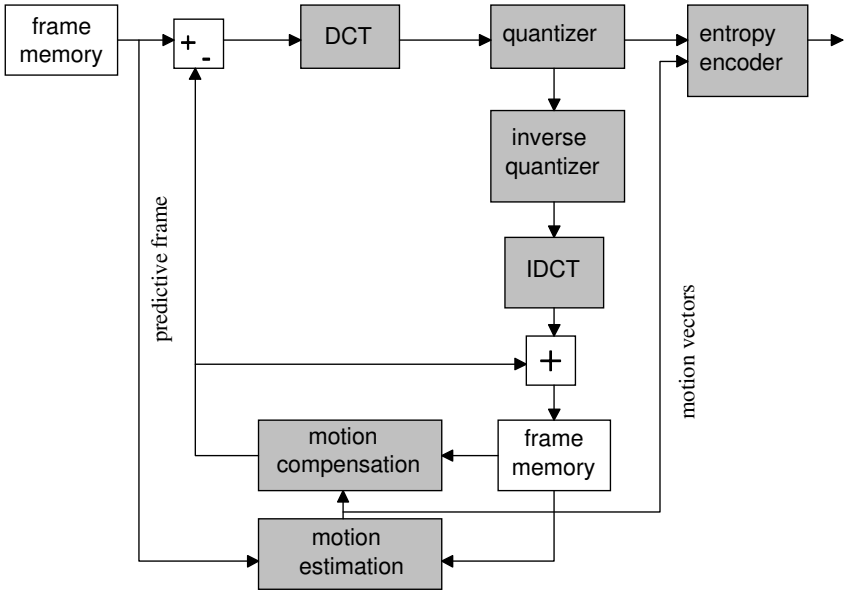
D-Frame
"DC coded picture", nur DC-Koeffizienten der Blöcke (linke obere Ecke der Koeffizienten-Matrix) für schnellen Vorlauf)

„Group of Pictures“ in MPEG

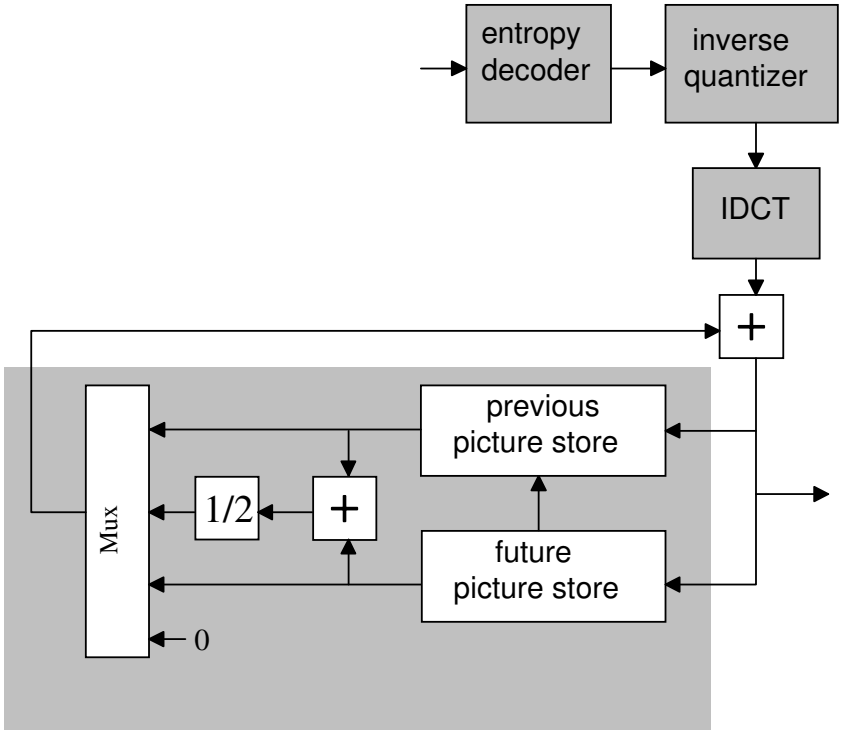
Die Folge von I, P und B-Bildern ist nicht standardisiert, sondern kann von der Anwendung bestimmt werden. So lassen sich Bildqualität und Kompressionsrate anwendungsabhängig wählen.



MPEG-Encoder



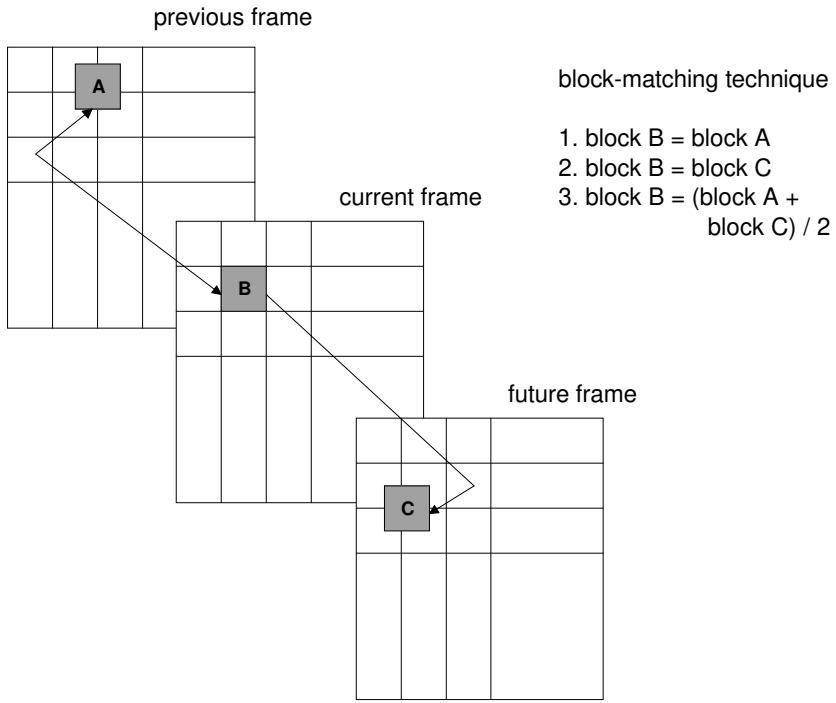
MPEG-Decoder



motion compensation

Zeitliche Redundanz und Bewegungsvektoren

"Motion Compensated Interpolation"



Der Suchradius (search range) kann bei der MPEG-Kodierung als Parameter eingestellt werden. Je größer der Suchradius, desto besser das Kompressionspotential, aber desto länger auch die Laufzeit.

MPEG-2

MPEG-2 erweitert MPEG-1 für höhere Bandbreiten und bessere Bildqualität, bis hin zu HDTV. Es wurde gemeinsam von ISO und ITU entwickelt (H.262).

Erstmals sieht MPEG-2 auch skalierbare Datenströme vor, die zur Bedienung von Empfängern verschiedener Leistungsklassen eingesetzt werden können.

Skalierbarkeit in MPEG-2 (1)

- "**SNR scalability**" wird durch die Kodierung jedes Bildes in mehreren Schichten ("layers") erreicht. Wer nur die Basis-Schicht dekodiert, erhält eine schlechte Bildqualität; wer auch höhere Schichten dekodiert, erhält Schicht für Schicht eine bessere Bildqualität. Ein Beispiel ist die Übertragung der U- und V-Komponenten in der Basis-Schicht mit einem Viertel der Auflösung von Y, die höheren Schichten erhalten dann die fehlenden Farbwerte und ermöglichen eine bessere Farbtreue.
- "**Spatial scalability**" bedeutet eine Kodierung des Bildes mit verschiedenen Pixel-Auflösungen. So könnten beispielsweise die Bildauflösungen für einen Standard-Fernseher und für einen hochauflösenden HDTV-Fernseher in einem gemeinsamen Datenstrom übertragen werden.

Skalierbarkeit in MPEG-2 (2)

- "**Temporal scalability**" bedeutet die Übertragung von wenigen Frames/s in der Basis-Schicht und von zusätzlichen Frames/s in den höheren Schichten.

- "**Data partinioning**" ermöglicht eine Skalierbarkeit bezüglich der Fehler-Resistenz. Die wichtigsten Bestandteile des MPEG-Stromes werden in der Basis-Schicht übertragen, weniger wichtige Teile in den höheren Schichten. In die Basis-Schicht legt man zum Beispiel die niedrigen Koeffizienten der DCT und die Bewegungsvektoren. Die Basis-Schicht kann dann mit mehr Redundanz zur Fehlersicherung versehen werden und wird somit fehlerärmer empfangen als die höheren Schichten, bei denen sich Übertragungsfehler weniger gravierend auswirken.

MPEG-2 Video-Profile

	Simple profile no B frames not scalable	Main profile B frames not scalable	SNR scalable profile B frames SNR scaling	Spatially scalable profile B frames spatial scaling	High profile B frames spatial or SNR scaling
High level 1920x1152x60		<=80 Mbits/s			<=100 Mbits/s
High-1440 level 1440x1152x60		<=60 Mbits/s		<=60 Mbits/s	<=80 Mbits/s
Main level 720x576x30	<=15 Mbits/s	<=15 Mbits/s	<=15 Mbits/s		<=20 Mbits/s
Low level 352x288x30		<=4 Mbits/s	<=4 Mbits/s		

Skalierbare Kodierung = Kodierung in Schichten (layers)
base layer: niedrigste Qualität
enhancement layers: Nachbesserung der Qualität

SNR scaling: enhancement layer enthält beispielsweise Chroma-Daten in höherer Auflösung
Spatial scaling: Erhöhung der Pixeldichte

MPEG-4 (1)

Ursprünglich planten ISO und ITU einen Standard MPEG-3 für HDTV-Qualität bei sehr hohen Datenraten. Dieser wurde später in MPEG-2 integriert und ist somit hinfällig.

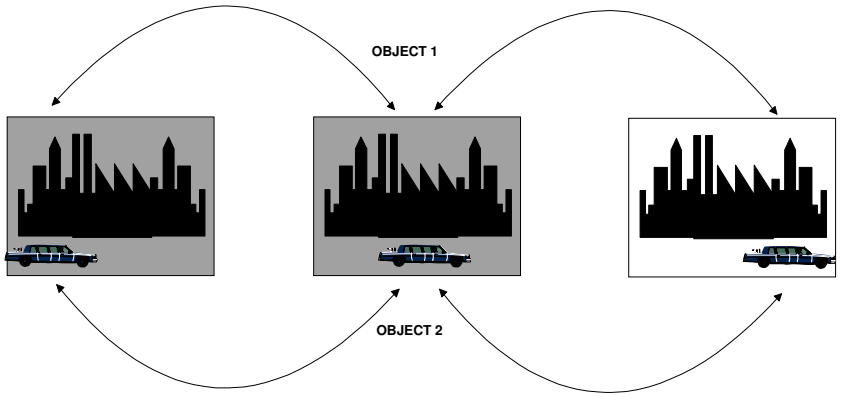
Für MPEG-4 war zunächst an Video für sehr niedrige Bandbreiten gedacht (z.B. Multimedia für Mobilfunk). Inzwischen basiert MPEG-4 nach einer radikalen Kehrtwendung im Normungsgremium auf einer **Einzelobjekt-Kodierung**. Das Bild wird in einzelne Objekte zerlegt. Für jedes Objekt kann die Kodierungstechnik getrennt gewählt werden. Die objektorientierte Kodierung eröffnet zugleich völlig neue Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung beim Empfänger.

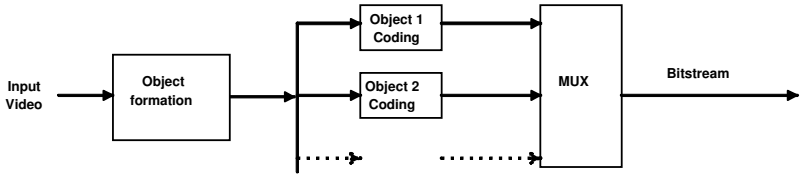
Stand der Normung

MPEG-4 Version 1 ist verabschiedet, MPEG-4, Version 2 soll Ende 1999 verabschiedet werden.

MPEG 4 (2)

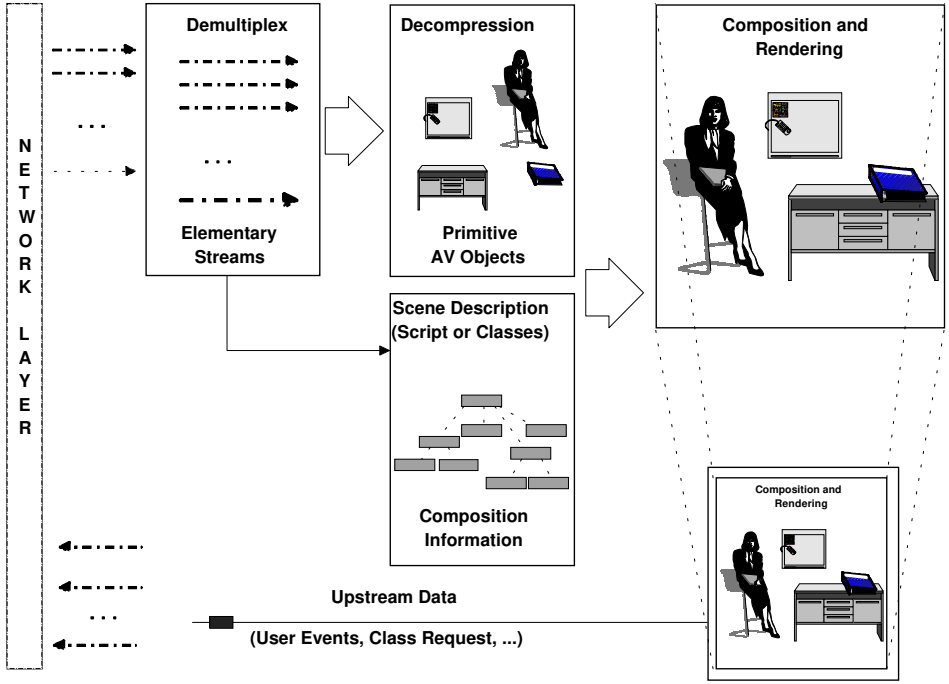
DIE TEXTE ZUM MPEG-4-KAPITEL WERDEN SPÄTER ERGÄNZT!





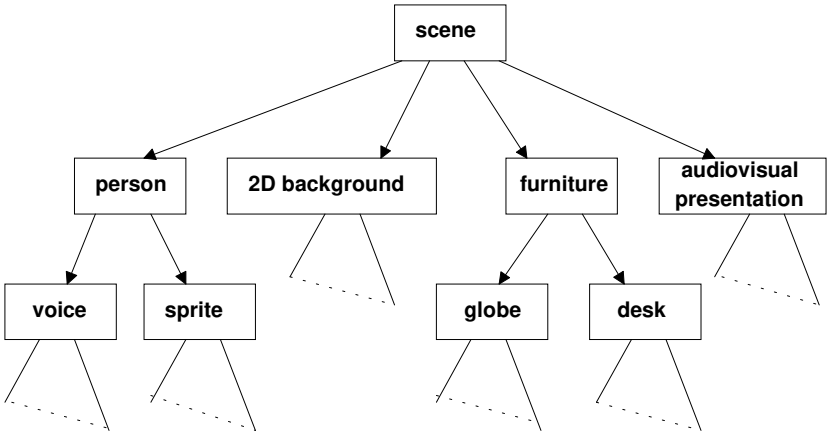
MPEG 4 (3)

DIE TEXTE ZUM MPEG-4-KAPITEL WERDEN SPÄTER ERGÄNZT!



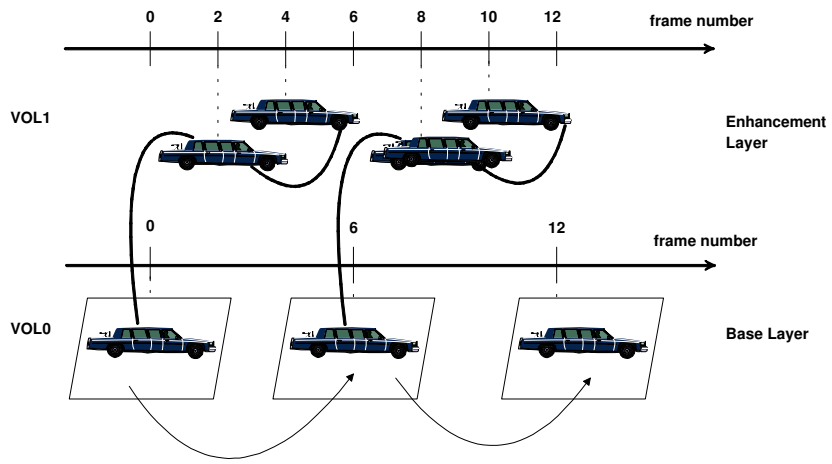
MPEG 4 (4)

DIE TEXTE ZUM MPEG-4-KAPITEL WERDEN SPÄTER ERGÄNZT!



MPEG 4 (5)

DIE TEXTE ZUM MPEG-4-KAPITEL WERDEN SPÄTER ERGÄNZT!



2.3.2 ITU Recommendation H.261

Auch bekannt als „p*64kbit/s“

- Ein Verfahren zur Videokodierung für audiovisuelle Dienste bei einer Bitübertragungsrate von p x 64 kbit/s. Nur für Video, nicht für Audio.
- Ursprünglich gedacht für ISDN
- Für den Parameter p gilt:
  - p ist aus [1,30]
  - p klein (p=1, p=2): Bildtelefon (schlechte Qualität)
  - p groß (ab p=6): auch Videokonferenz (mittlere Qualität)
- heute gebräuchlich: p=2, p=6
- Intraframe-Coding: DCT-basiert (wie JPEG)
- Interframe-Coding: ähnlich den P-Frames in MPEG-1

Videokodierung in H.261

Die fundamentalen Ideen sind denen in JPEG und MPEG gleich. H.261 ist weniger flexibel, dafür aber leichter standardkonform implementierbar.

Es werden genau drei Komponenten kodiert, nämlich Y, C_b und C_r, jeweils blockweise mit 8 x 8 Pixels pro Block. Die Helligkeit Y wird mit voller Auflösung kodiert, die beiden Chroma-Komponenten jeweils mit halber Auflösung in horizontaler und vertikaler Richtung (4:2:0-Modell).

Es gibt nur zwei Bildformate:

CIF (Common Intermediate Format): 352x 288

QCIF (Quarter CIF): 176x144

Die wichtigsten Parameter von H.261

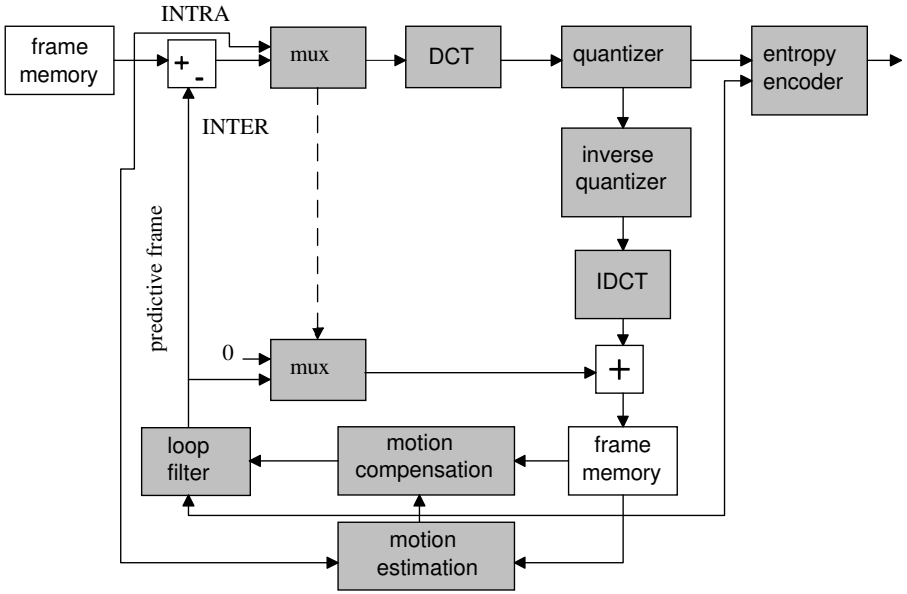
Die beiden Bildformate

	CIF (Breite x Höhe)	**QCIF (Breite x Höhe)**
Y	352 x 288	176 x 144
C_b	176 x 144	88 x 72
C_r	176 x 144	88 x 72

Die Hierarchie der Blockstrukturen

Strukturelement	**Beschreibung**
picture	one video picture (frame)
group of blocks	33 macro blocks
macro block	16 x 16 Y, 8 x 8 C_b, C_r
block	8 x 8 pixels (coding unit for DCT)

Die Funktionsweise eines H.261-Encoders



Status von H.261

Implementierungen in Hardware und Software verfügbar. Fast alle Bildtelefon-Hersteller haben inzwischen proprietäre Lösungen aufgegeben und auf H.261 umgestellt. PC-Lösungen sind auf dem Vormarsch.

H.263

H.263 ist eine Weiterentwicklung von H.261, wobei vor allem die Erfahrungen aus MPEG einbezogen wurden. Einige Unterschiede zu H.261 sind:

- Es gibt fünf Bildgrößen statt zwei.
- Es gibt eine bidirektionale Interpolation, wobei immer genau ein B-Frame nach einem P-Frame platziert wird.
- Es gibt aushandelbare Optionen, die den Algorithmus für bestimmte Anwendungen optimieren, zum Beispiel kann in der Entropie-Kodierung eine arithmetische Kodierung an Stelle der Lauflängen-/Huffman-Kodierung verwendet werden.

2.4 Audio-Kompression

2.4.1 Pulse-Code-Modulation

Audiosignale sind analoge Wellenverläufe. Die charakteristischen Eigenschaften werden im Wesentlichen von der Frequenz (Tonhöhe) und von der Amplitude (Lautstärke) bestimmt.

Vor der weiteren Verarbeitung im Rechner müssen die analogen Wellenverläufe in digitale Signale transformiert werden. Dies geschieht durch **Abtastung**.

Abtastung

Für die Zeitdiskretisierung muss eine Abtastung der Analogverläufe erfolgen. Praktisch wichtig ist vor allem die periodische Abtastung.

Der zum Abtastzeitpunkt vorliegende Momentan-Wert des Analogsignals wird der Analog-Digital-Umsetzung unterworfen.

Abtasttheorem von Shannon und Raabe (1939)

Zur fehlerfreien Rekonstruktion des Signalverlaufs des Analogsignals ist eine Mindestabtastfrequenz f_A erforderlich (bei periodischem Abtastzyklus). Diese hängt von der höchsten im analogen Signal vorkommenden Frequenz ab. Für rauschfreie Kanäle gilt das Folgende

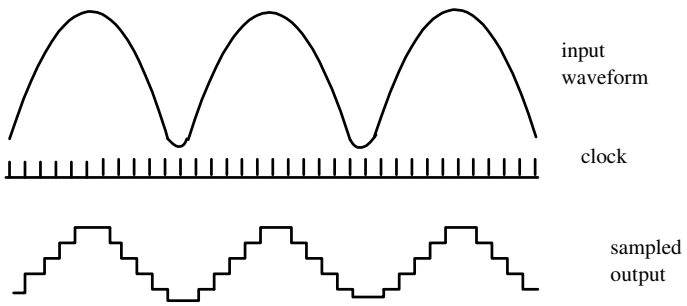
Abtasttheorem

Die Abtastfrequenz f_A muss doppelt so hoch sein wie die höchste im abzutastenden Signal vorkommende Frequenz f_S:

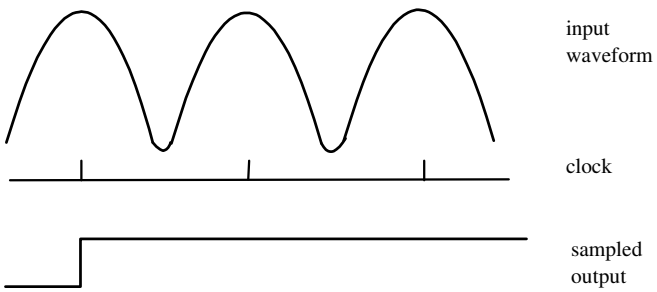
$$f_A = 2\, f_S$$

Abtastung und Quantisierung sind voneinander unabhängig zu betrachten. Eine exakte Rekonstruktion des Zeitverlaufs (bzw. des Frequenzspektrums) sagt nichts über den Fehlergrad bei der Signalwertdiskretisierung (Quantisierung) aus.

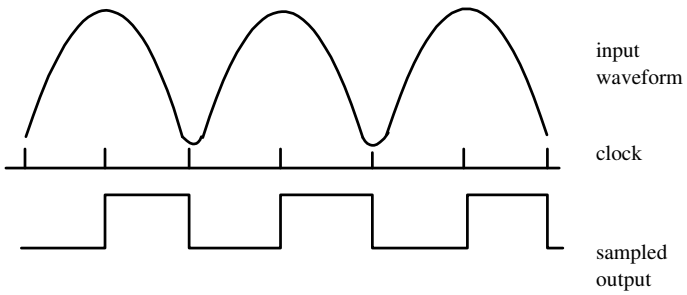
Beispiel: Abtasten bei verschiedenen Taktraten



(a) Sampling rate is much higher than signal frequency



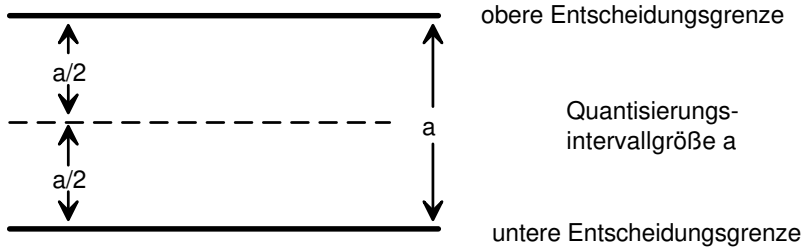
(b) Sampling rate is lower than signal frequency



(c) Sampling rate is at the Nyquist limit

Quantisierung

Der gesamte Wertebereich des Analogsignals wird in eine endliche Anzahl von Intervallen (Quantisierungsintervalle) eingeteilt, denen jeweils ein fester diskreter Wert zugeordnet wird. Da alle in ein Quantisierungsintervall fallenden Analogwerte demselben diskreten Wert zugeordnet werden, entsteht ein Quantisierungsfehler.



Rückwandlung

Beim Empfänger wird ein Analogwert rückgewonnen (Digital-Analog-Umsetzung), der dem in der Mitte des Quantisierungsintervalls liegenden Analogwert entspricht.

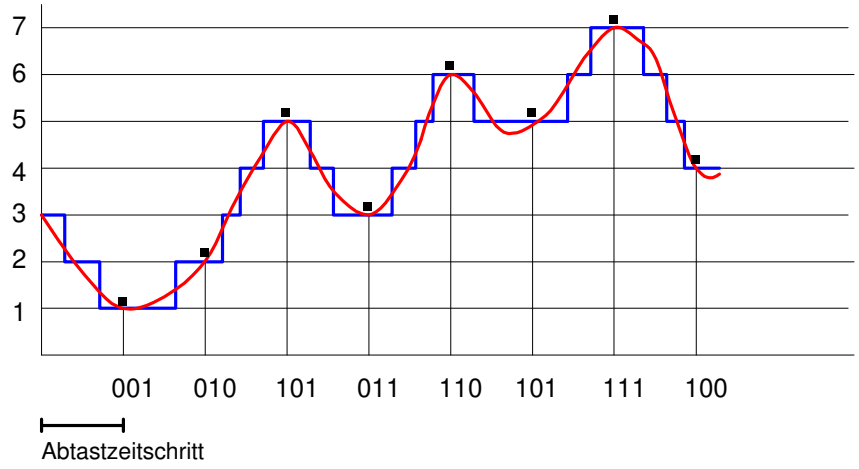
Maximaler Quantisierungsfehler: **a/2**

Kodierung

Die quantisierten Werte werden durch die Zuordnung eines - frei wählbaren - (Binär-) Codes gekennzeichnet. Anstelle des ursprünglichen Analogsignals wird der digitale Codewert übertragen.

Im einfachsten Fall wird ein reiner Binärcode als Kodierung des diskreten Digitalwertes gewählt (Darstellung als Binärzahl).

Zusammenfassende Darstellung



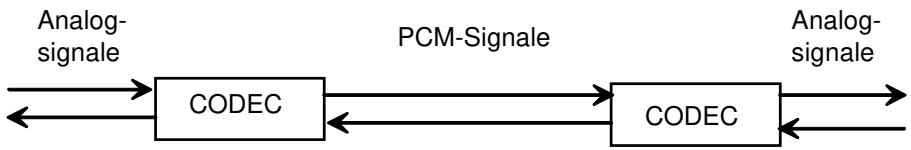
Pulse-Code-Modulation

Die Zusammenfassung der Schritte

Abtastung
Quantisierung
Kodierung

und die Darstellung der gewonnenen Codewörter als digitale Basisbandsignale bezeichnet man als Pulse-Code-Modulation (PCM).

Die A/D-Umsetzung (Abtastung/Quantisierung) und Kodierung sowie die Rückkonvertierung erfolgt im sogenannten CODEC (Kodierer/Dekodierer).



PCM-Fernspechkanal

Abtastrate

Ausgangspunkt: Analoger CCITT-Fernsprechkanal
Frequenzlage 300-3400 Hz
Bandbreite 3100 Hz

Abtastfrequenz: **f_A = 8 kHz**

Abtastperiode: **$T_A = 1/f_A = 1/8000$ Hz = 125 Mikrosekunden**

Die vom CCITT gewählte Abtastfrequenz ist höher als nach Shannon-Abtasttheorem erforderlich: 3400 Hz obere Bandgrenze ergibt 6800 Hz Abtastfrequenz. Für die höhere Abtastfrequenz gibt es technische Gründe (Filtereinfluss, Kanaltrennung usw.).

Amplitudenquantisierung

Die Zahl der benötigten Quantisierungsintervalle wird bei der akustischen Sprachkommunikation (Fernsprechen) durch den Grad der Silbenverständlichkeit beim Empfänger bestimmt.

Mit „Sicherheitszuschlag“ wurden vom CCITT 256 Quantisierungsintervalle genormt.

Bei binärer Kodierung ergibt dies 8 Bits pro Abtastung.

Übertragungsgeschwindigkeit für PCM-Kanal

Die Übertragungsgeschwindigkeit (Bitrate) für einen digitalisierten PCM-Fensprechkanal ist demnach

Bitrate	**= Abtastfrequenz**	**x**	**Codewortlänge**
Kbit/s	**= 8000/s**	**x**	**8 bit**

= **64 kbit/s**

Ungleichförmige Quantisierung

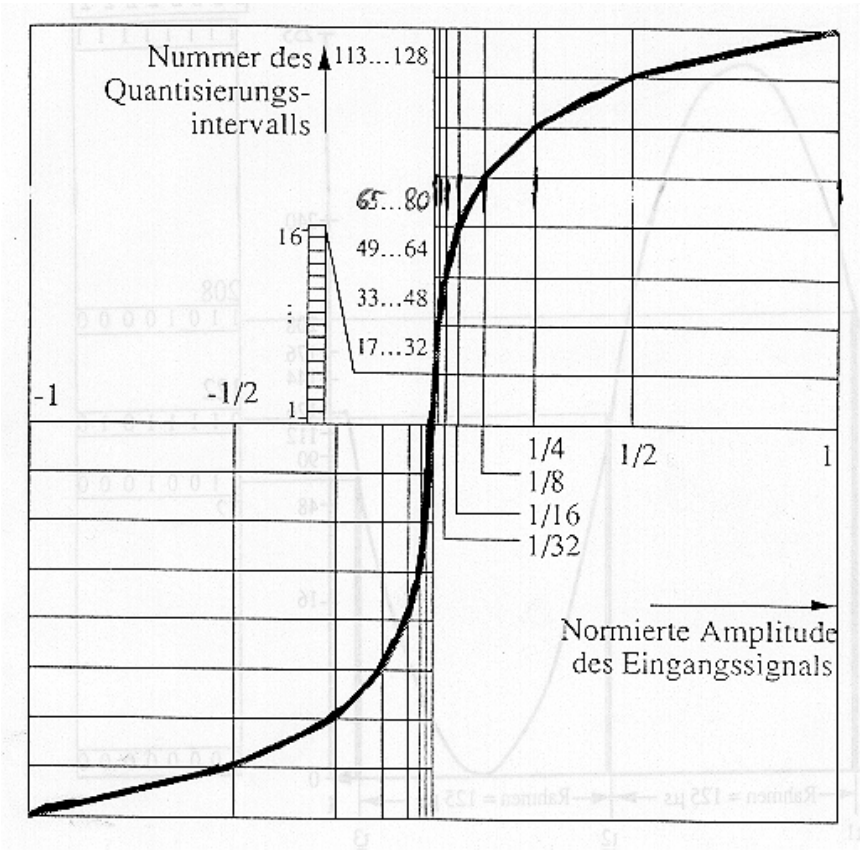
Bei gleichförmiger Quantisierung sind alle Intervalle gleich groß und vom Momentanwert des Signals unabhängig. Quantisierungsfehler machen sich bei gleichförmiger Quantisierung bei kleinen Signalwerten sehr stark bemerkbar (Quantisierungsrauschen).

Bei ungleichförmiger Quantisierung sind die Quantisierungsintervalle bei großer Signalamplitude größer und bei kleiner Amplitude kleiner.

Die ungleichförmige Intervallgröße wird durch einen dem Quantisierer vorgeschalteten Signal-*Kompressor* erzielt. Auf der Empfangsseite wird in inverser Funktion ein *Expander* eingesetzt. Er dient zur Wiederherstellung der ursprünglichen Größenverteilung der Signale (Dynamik der Signale).

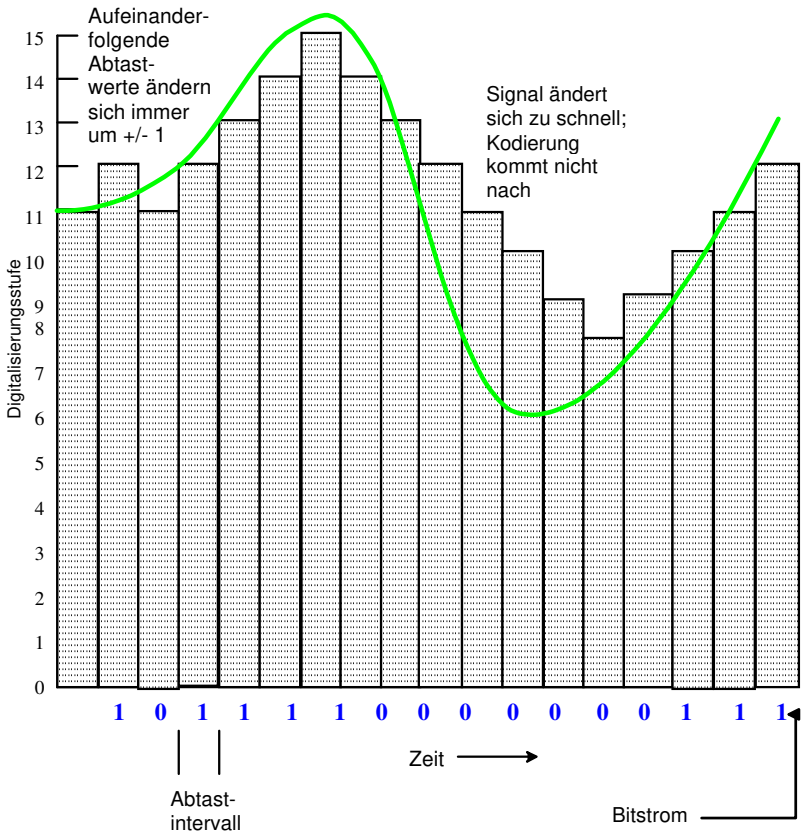
Als Kompressionskennlinien werden logarithmische Kennlinien verwendet, die schaltungstechnisch durch lineare Teilstücke approximiert werden.

13-Segment-Kompressorkennlinie



Delta-Modulation

Statt der Absolutwerte der Amplitude werden die Wertdifferenzen kodiert.



Kodierung:

1 = steigendes Signal

0 = fallendes Signal

Differenzielle PCM (DPCM)

Differenz zweier PCM-Werte wird kodiert. Ergibt kleinere Werte, geringere Bitrate, aber Quantisierungsfehler bei schnellen Signalschwankungen.

Adaptive DPCM (ADPCM)

Die Quantisierungstabelle ändert sich mit den tatsächlichen Signalschwankungen. Der Empfänger kann diese Tabellenänderung dynamisch nachvollziehen. Bei kleinen Signalschwankungen wird mit weniger bit/s übertragen als bei großen Signalschwankungen. Dadurch kann beispielsweise eine Kompression von 1,4 Mbit/s auf 0,2 Mbit/s bei vergleichbarer Qualität möglich werden.

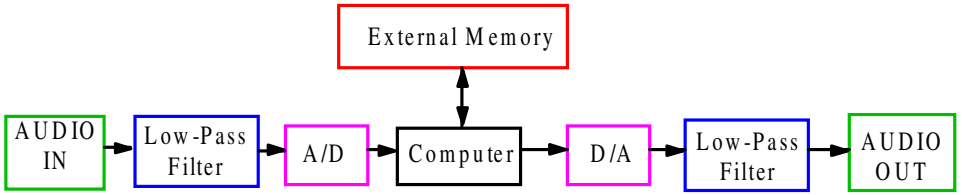
Gebräuchliche Sampling-Parameter

Abtastrate

8 kHz Telefon-Standard, • -law encoding, SUN Audio
32 kHz Digital Radio Broadcast
44,1 kHz CD
48 kHz Digital Audio Tape (DAT)

Quantisierung

8 bit 256 Amplituden-Stufen (Sprache)
16 bit 65536 Amplituden-Stufen (HiFi)



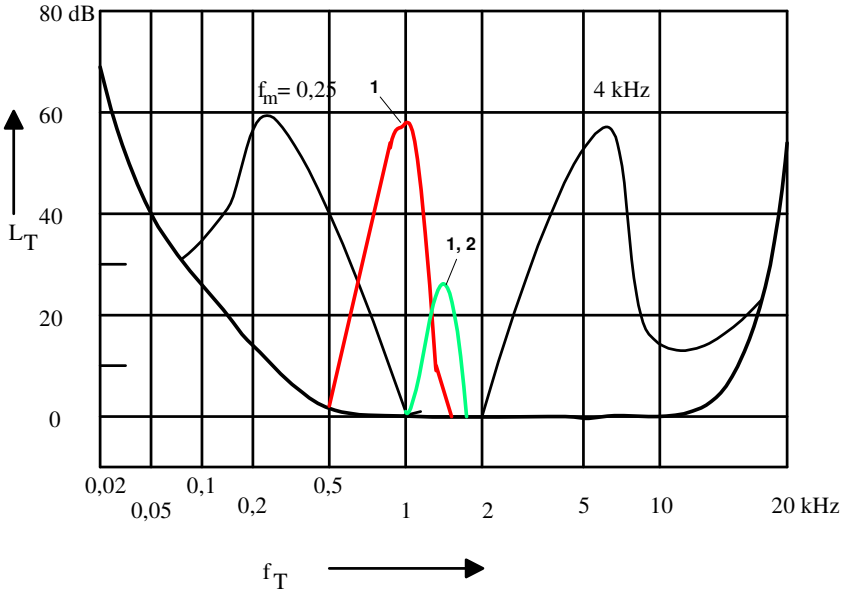
2.4.2 Psycho-akustische Modelle

"Irrelevanzreduktion"

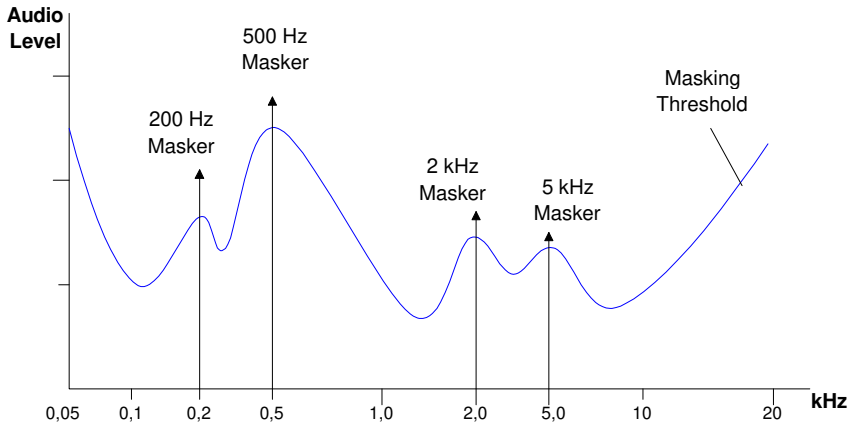
Ausnutzung des Auflösungsvermögens des menschlichen Ohres

Verdeckungseffekt

- Mithörschwelle, frequenz- und pegelabhängig



Daten, die das Ohr sowieso nicht hören würde, werden schon an der Quelle herausgefiltert.



Beispiel: MPEG Audio

Merkmale:

Kompression auf 32, 64, 96, 128 oder 192 kBit/s

Audiokanäle:

- Mono oder
- 2 unabhängige Kanäle oder
- "Joint Stereo"

Verfahren

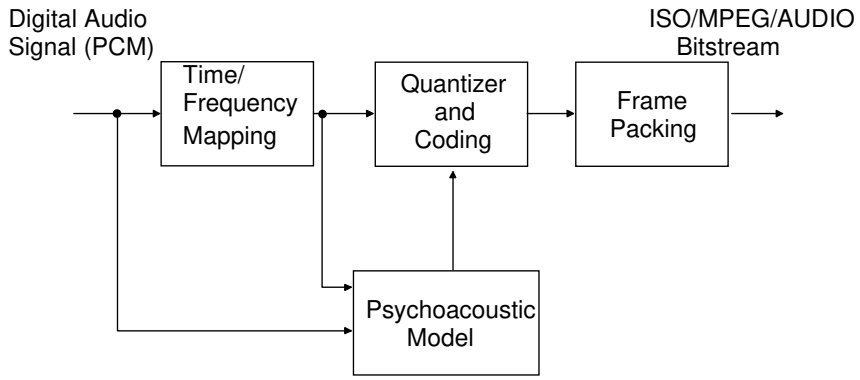
- Abtastrate 32 kHz, 44,1 kHz oder 48 kHz
- 16 Bits pro Abtastwert
- Verzögerung durch Kodieren und Dekodieren höchstens 80 ms bei 128 kbit/s
- **Ein psychoakustisches Modell steuert die Quantisierung**

Zwei Verfahren in MPEG-Audio

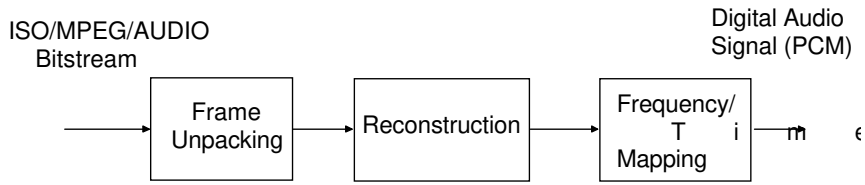
MUSICAM	ASPEC
Masking Pattern Universal Subband Integrated Coding And Multiplexing	Advanced Spectral Entropy Coding
Institut für Rundfunktechnik München	FhG Erlangen
Teilbandkodierung	dynamische Frequenz-bänder (überlappend) Entropie-Kodierung (Huffman)
einfacher Aufbau	sehr gute Ergebnisse bei niedrigen Bitraten

MPEG Audio-Encoder und -Decoder

Encoder



Decoder



Drei Schichten (layers) in MPEG Audio

I	Teilbandkodierung mit 32 Bändern nach MUSICAM • hohe Datenrate • mono, stereo, 48 kHz, 44.1 kHz, 32 kHz
II	Teilbandkodierung nach MUSICAM, aufwendigeres psycho-akustisches Modell bessere Bestimmung der Skalierungsfaktoren • mittlere Datenrate • bessere Klangqualität bei niedrigen Bitraten, Multikanal-Klang
III	Transformationskodierung mit max. 512 dynamischen Fenstern und Entropie-Kodierung nach ASPEC (MP3) • niedrigste Datenrate • Stereo Audio in CD-Qualität: 128 kbit/s (Verhältnis 12:1) • Mono Audio in Telefonqualität: 8 kbit/s

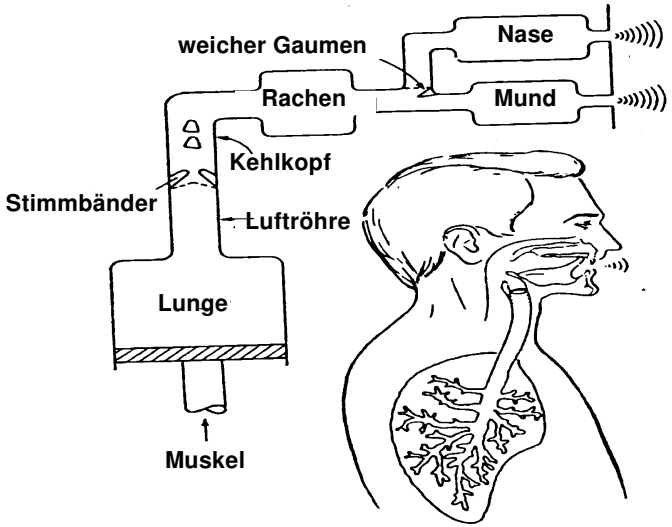
2.4.3 Sprachkodierung

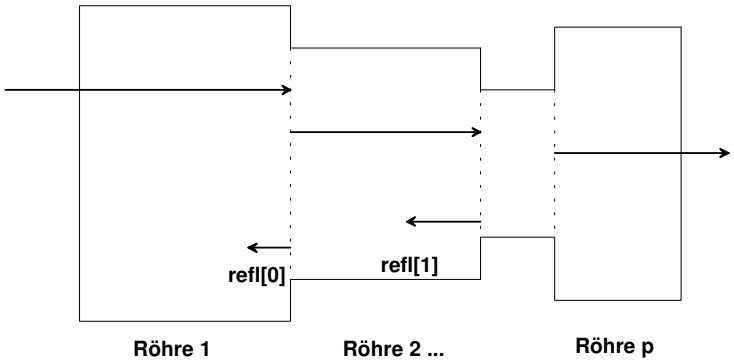
Idee: Spezielle, für die menschliche Sprache optimierte Codecs (normaler Stimmenbereich ca. 300 Hz bis 3,4 kHz) können eine hohe Sprachqualität bei sehr niedrigen Bitraten erreichen.

Solche Sprachkodierer basieren in der Regel auf **Linear Predictive Coding (LPC)**.

Linear Predictive Coding (1)

LPC modelliert den menschlichen Sprachkanal als ein System von Röhren (Zylindern) mit unterschiedlichen Durchmessern.





Linear Predictive Coding (2)

Akustische Wellen werden von den Stimmbändern stimmhaft oder stimmlos generiert, durchlaufen ein System von Röhren, werden an Übergängen von Röhren mit unterschiedlichem Durchmesser teilweise reflektiert und interferieren mit nachfolgenden Wellen. Die Reflektionsrate wird durch die Reflektionskoeffizienten refl[0], ..., refl[p-1] repräsentiert. Mit einer relativ kleinen Zahl von Parametern lässt sich so die (sprecherabhängige) Erzeugung des Sprachklangs beschreiben.

LPC Encoder

- Das Audio-Signal wird in kleine Rahmen fester Länge zerlegt (20 - 30 ms). Für jeden Rahmen s[i] werden p Gewichte lpc[0], .. , lpc[p-1] berechnet, so dass s[i] möglichst gut durch
  lpc[0] * s[i-1] + lpc[1] * s[i-2] + ... + lpc[p-1] * s[i-p]
  angenähert wird. Übliche Werte für p sind 8 oder 14.
- Ein synthetisch generiertes Quellsignal dient als Eingabe des Modells und ergibt synthetische Sprache für die Dauer des Rahmens. Die Generierung kann zwischen "stimmhaft" (Sinus-Schwingung) und "stimmlos" (Rauschen) umgeschaltet werden.
- Die Unterschiede zwischen dem generierten Sprachsignal und dem tatsächlichen Sprachsignal werden ermittelt und führen zur Neuberechnung der Prädiktionskoeffizienten lpc[i]. Kodiert und übertragen werden für jeden Rahmen die Art der Anregung (stimmhaft oder stimmlos) sowie die aktuellen Paremeterwerte lpc[i].

LPC-Varianten

- **CELP** (Code Excited Linear Prediction): Es werden nicht nur "stimmhaft" und "stimmlos" unterschieden, sondern wesentlich mehr Arten der Anregung. Diese werden vom Systementwerfer in Form eines Codebooks hinterlegt. Für jeden Rahmen werden jetzt der Codebook-Index und die lpc-Parameter kodiert und übertragen.
- **ACELP**: wie CELP, aber mit adaptivem Codebook
- **GSM 06.10**: Regular Pulse Excitation – Long Term Prediction (RPE-LTP)

Ein gutes Kurz-Tutorial über LPC mit Audio-Beispielen ist unter
http://asylum.sf.ca.us/pub/u/howitt/lpc.tutorial.html
zu finden.

LPC-Beispiele

G.723.1

Adaptiver CELP (Code Excited Linear Predictor) Kodierer.

Bitrate für G.723.1: 5,3 kbit/s - 6.3 kbit/s

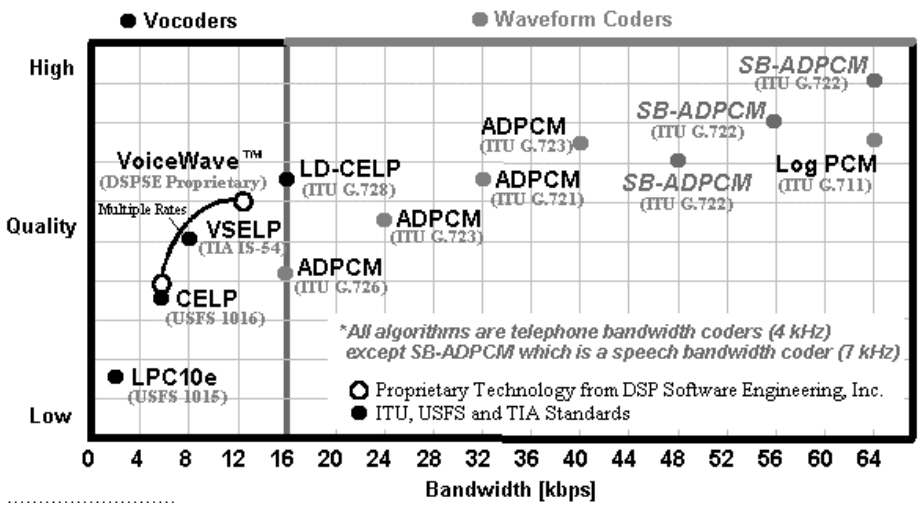
GSM 06.10

Regelmäßige Pulsstimulierung - langfristige Vorhersage (RPE-LTP)

- LPC-Kodierung
- Synthetisch generiertes Signal basiert auf vorhergehenden Signalwerten und benutzt stimmlose Phoneme im Signal zur Pulsstimulierung

Bitrate für GSM 06.10: 13.2 kbps

Spezielle Sprachkodierung vs. PCM-Kodierung



ITU-T-Standards für die Sprachkodierung

Eine Auswahl aus den G.7xx-Standards

- **G.711**: 64kbit/s (GSTN-Telefonie, H.323 & H.320 Videoconferencing)
- **G.728** LD-CELP: 16 kbit/s (GSTN-Telefonie, H.320 Videoconferencing)
- **G.729** ACELP: 8 kbit/s (GSTN-Telefonie, H.324 Video-Telefonie)
- **G.723.1** MPE/ACELP 5.3 kbit/s bis 6.3 kbit/s (GSTN Video-Telefonie, H.323 Telefonie)