

## 4. Licht, Farbe und Bilder

- 4.1 Licht und Farbe: Physikalische und physiologische Aspekte
- 4.2 Farbmodelle
- 4.3 Raster-Bilddatenformate
- 4.4 Verlustbehaftete Kompression bei Bildern   
JPEG
- 4.5 Bewegte Bilder: Grundbegriffe der digitalen Videotechnik

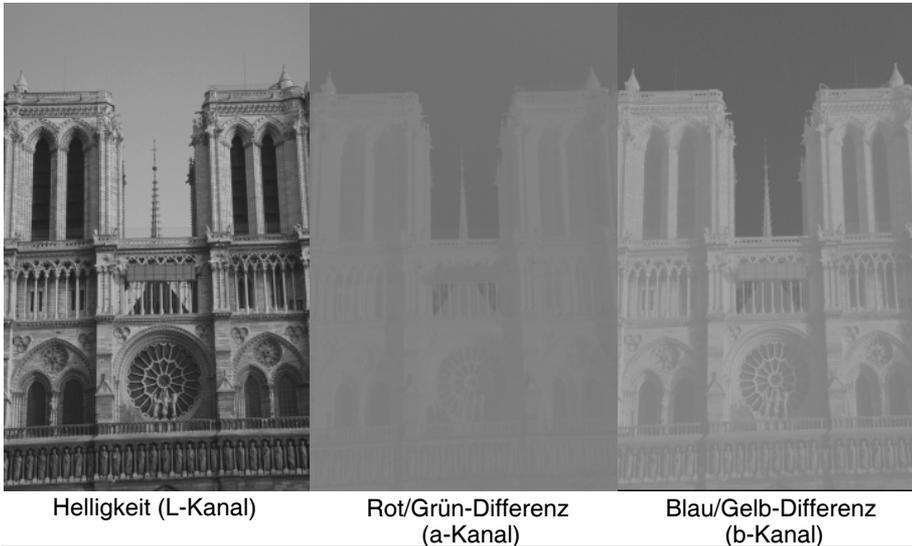
Weiterführende Literatur:

John Miano: Compressed Image File Formats - JPEG, PNG, GIF, XBM, BMP,  
Addison-Wesley 1999

## Warum und wann verlustbehaftet komprimieren?

- Durch Aufnahme aus der realen Welt erzeugte Bilder (v.a. Fotos) sind sehr groß
  - z.B. 4 Mio. Pixel mit je 24 bit = 12 MByte
- Das menschliche Auge wertet nicht alle Informationen des Bildes gleich gut aus
  - z.B. Helligkeit vs. Farbigkeit
  - z.B. Feinabstufungen von Verläufen
- Mit verlustbehafteten Kompressionsverfahren wird
  - ein oft sehr hoher Gewinn an Speicherplatz erzielt
  - der subjektive Eindruck des Bildes kaum verändert
- Bekanntestes Verfahren: JPEG
- Achtung: Für Archivierung von hochwertigen Bild-Originalen eignet sich JPEG nur bedingt (bei Einstellung von geringen Kompressionsgraden)
  - Alternativen z.B.: TIFF, PNG

## Luma- und Chromainformation: Vergleich

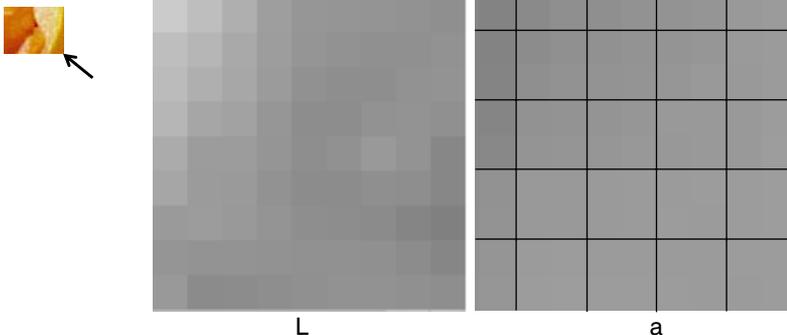


Ludwig-Maximilians-Universität München

Prof. Hußmann

Digitale Medien – 4 - 58

## Chroma-Subsampling



- In vielen Fällen genügt eine geringere Auflösung für die Farbinformation (Chroma) als für die Helligkeit (Luma).
  - Passende Farbmodelle: YUV, YIQ, Lab
  - Teilweise aber abhängig vom Darstellungsinhalt
- Chroma-Subsampling = niedrigere Abtastrate für Farbinformation
  - Speicherplatzersparnis im Beispiel 1/3 (bei gleichem Subsampling für b)

Ludwig-Maximilians-Universität München

Prof. Hußmann

Digitale Medien – 4 - 59

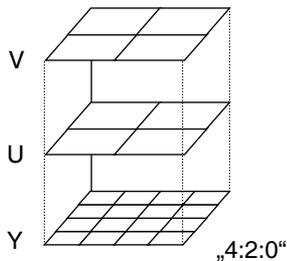
## Abtastraten für Bilder



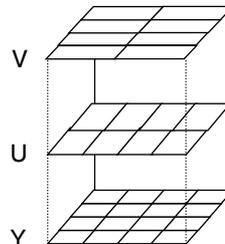
- Abtastrate: Wieviele Pixel pro Längeneinheit des Bildes?
- Mehrdimensionalität:
  - Horizontale Abtastrate ( $H$ )
  - Vertikale Abtastrate ( $V$ )
- Bei Sub-Sampling:
  - Verschiedene Abtastraten für verschiedene Komponenten des Bildes (Farben, evtl. Alphakanal)

## Abtastraten und Subsampling

Y:  $H = 4, V = 4$   
U:  $H = 2, V = 2$   
V:  $H = 2, V = 2$



Y:  $H = 4, V = 4$   
U:  $H = 4, V = 2$   
V:  $H = 2, V = 4$



- Subsampling wird bei verschiedenen digitalen Bildverarbeitungstechniken benutzt
  - in JPEG (optional)
  - auch in diversen digitalen Video-Aufzeichnungs-Standards

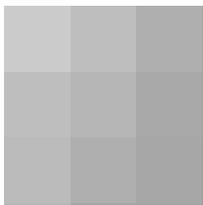


## Notation für Subsampling

- Übliche Notation für Subsampling von Farben:  
x:y:z  
– z.B.: 4:2:2
- Ursprüngliche Bedeutung: Horizontales Frequenzverhältnis für Luma (x) zu den beiden Chroma-Kanälen (y, z)
  - Vertikales Subsampling?
  - Beide Chroma-Kanäle haben in der Praxis immer die gleiche Abtastrate !
- Heutige Bedeutung:
  - x: In der Praxis meist „4“, historische Reminiszenz
  - y: Faktor für das Subsampling von Chroma gegenüber Luma
  - z: Falls z=y: kein vertikales Subsampling  
Falls z=0: vertikales Subsampling von 2:1 für beide Chroma-Kanäle
- Beispiele:
  - 4:2:0  $H_V=4, V_V=4, H_U=2, V_U=2, H_V=2, V_V=2$   
(erstes Beispiel letzte Folie; bei JPEG im praktischen Einsatz)
  - 4:2:2  $H_V=4, V_V=4, H_U=2, V_U=2, H_V=4, V_V=4$



## Prädiktive Codierung: Grundidee



45	48	60
50	55	65
52	60	70

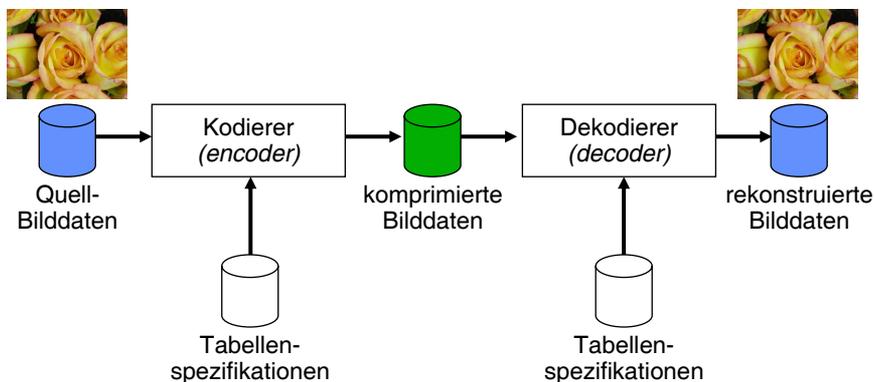
-10	-7	+5
-5	55	+10
-3	+5	+15

- Feste Werte nur für einige Basispixel definieren
- Für andere Pixel nur Differenz speichern
- Potentielle Vorteile:
  - an sehr vielen Stellen kleinere Bitbreite für Differenzwerte möglich
  - Wiederholung gleicher Differenzwerte ermöglicht effektive Kompression mit verlustfreien Verfahren
- Prinzipiell verlustfrei, in JPEG (u. a.) verfeinerte verlustbehaftete Variante der gleichen Idee

## JPEG: Hintergrund

- JPEG = „Joint Photographics Expert Group“
  - „Joint“ wegen Zusammenarbeit von Arbeitsgruppen zweier Organisationen (ISO und CCITT/ITU)
  - Arbeit seit 1982, Verfahrensvergleich 1987, Auswahl einer „adaptiven Transformationskodierung basierend auf Diskreter Cosinus-Transformation (DCT)“
  - 1992: ITU-T Recommendation T.81 + Internationaler Standard ISO 10918-1
- Wichtige Eigenschaften/Anforderungen:
  - Unabhängigkeit von Bildgröße, Seitenverhältnis, Farbraum, Farbvielfalt
  - Anwendbar auf jedes digitale Standbild mit Farben oder Grautönen
  - Sehr hohe Kompressionsrate
  - Parametrisierbar in Qualität/Kompression
  - Realisierbar durch Software und Spezial-Hardware: gute Komplexität
  - Sequentielle und progressive Dekodierung
  - Unterstützung von verlustfreier Kompression und hierarchischer Verfeinerung der Bildqualität

## JPEG-Architekturmodell



# JPEG-Modi

- Charakteristika:
  - Verlustbehaftet oder verlustfrei
  - sequentiell, progressiv oder hierarchisch
  - Abtasttiefe (für bis zu 4 Komponenten)
  - (Entropie-)Kompressionsverfahren: Huffman- oder arithmetische Kodierung
- **Basismodus (*baseline process*):**
  - Verlustbehaftet (DCT), 8 bit Tiefe, sequentiell, Huffman-Kodierung
- **Erweiterter Modus (*extended process*):**
  - Verlustbehaftet (DCT), 8 oder 12 bit Tiefe, sequentiell oder progressiv, Huffman-Kodierung oder arithmetische Kodierung, mehr Tabellen
- **Verlustfreier Modus (*lossless process*):**
  - Verlustfrei (kein DCT), 2 – 16 bit Tiefe, sequentiell, Huffman-Kodierung oder arithmetische Kodierung
- **Hierarchischer Modus (*hierarchical process*):**
  - Baut auf erweitertem oder verlustfreiem Modus auf, Mehrfach-Frames

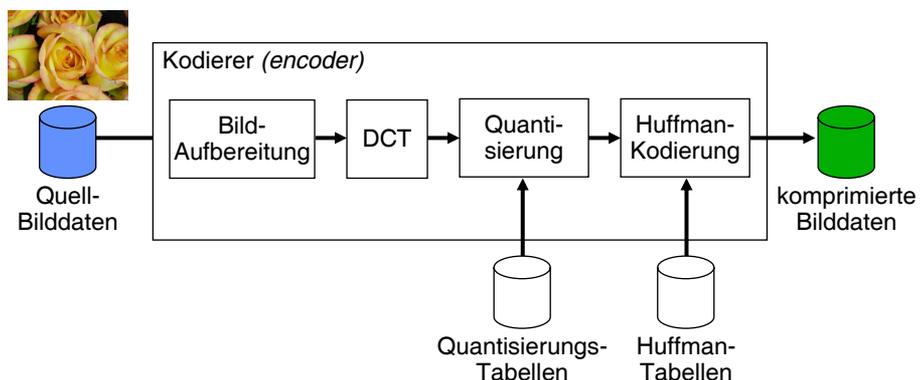
meist verwendet

selten verwendet

ungebräuchlich

# Schritte der JPEG-Kodierung

- Hier nur die gebräuchlichste Variante:  
verlustbehaftet, sequentiell, 8-bit-Daten, Huffman-Kodierung



DCT = Discrete Cosinus Transformation



## JPEG-Kodierung: Bildaufbereitung (1)

- Bild wird generell in 8 x 8-bit-Blöcke (*data units*) eingeteilt
  - Am Rand wird „aufgefüllt“
- Bild kann theoretisch aus bis zu 255 Komponenten (*components*) bestehen
  - Verbreitet: 3 oder 4, nach Farbmodell
- Verzahnte (*interleaved*) oder nicht-verzahnte Reihenfolge:
  - Ablage der Komponenten nacheinander nicht immer ideal:  
Z.B. könnten 3 Farbkomponenten *nacheinander* erscheinen
  - Verzahnte Ablage: Einheiten, die je eine *data unit* jeder Komponente enthalten: *Minimum Coded Units (MCU)*
  - Maximal vier Komponenten können verzahnt werden

## JPEG-Kodierung: Bildaufbereitung (2)

- Bildung von MCUs bei Subsampling und Interleaving?
  - Beispiel-Annahme: Typisches Subsampling nach „4:2:0“
  - Die gleiche Bildregion wird abgedeckt von:
    - » 4 Dateneinheiten von Y
    - » 1 Dateneinheit von U
    - » 1 Dateneinheit von V
  - MCU = 4 Y-Dateneinheiten aus Y, 1 U-Dateneinheit, 1 V-Dateneinheit
  - Damit werden MCU und abgedeckte Region größer (dennoch 50% weniger Information pro Pixel als ohne subsampling)
    - » subsampling: Region 32 x 32 pixel, MCU 6 x 8 samples = 48 samples
    - » Standard: Region 8 x 8 pixel, MCU 3 x 8 samples = 24 samples
- Nach dem gleichen Prinzip lassen sich beliebige Subsampling-Verhältnisse mit Interleaving kombinieren.

Subsampling

# Diskrete Cosinus-Transformation (DCT)

JPEG-Schritte

- Grundmotivation:
  - Menschliche Sehvernehmung sehr empfindlich für niedrige und mittlere Frequenzen (Flächen, deutliche Kanten), wenig empfindlich für hohe Frequenzen (z.B. feine Detaillinien)
  - Deshalb Zerlegung der Bildinformation in Frequenzanteile (ähnlich zu Fourier-Transformation)
- Prinzip von DCT:
  - (in einer oder zwei Dimensionen...)



Datenpunkte und Koeffizienten sind bei JPEG jeweils 8 x 8 - Integer - Blöcke

## (Forward) DCT: Mathematische Definition

$$F(v,u) = \frac{1}{4} c_u c_v \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 f(x,y) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{16} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{16}$$

wobei

$x, y$  Koordinaten für die Datenpunkte einer Quell-Dateneinheit ( $x, y = 1, \dots, 8$ )

$u, v$  Koordinaten für die Ziel-Koeffizienten ( $u, v = 1, \dots, 8$ )

$f(x,y)$  Datenwert (Sample)

$F(x,y)$  Koeffizientenwert

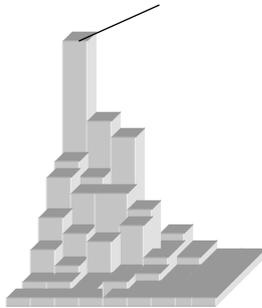
$$c_u, c_v = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{falls } u, v = 0$$

$$c_u, c_v = 1 \quad \text{sonst}$$

- Die Berechnung der Formel läßt sich auf eine einfache Matrixmultiplikation mit konstanten Matrixeinträgen reduzieren.
- Aus technischen Gründen Sample-Wertebereich zuerst in  $(-128, +127)$  verschoben

## Interpretation der DCT-Koeffizienten

DC-Koeffizient (0,0)

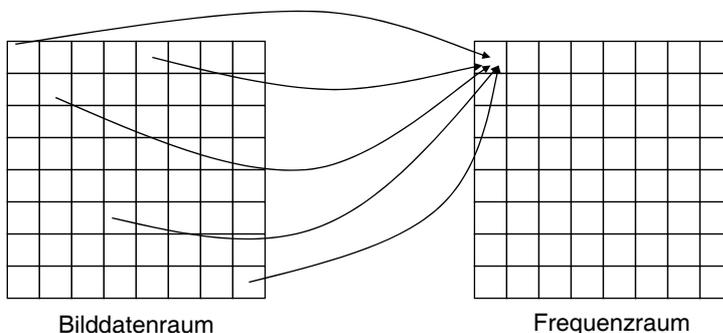


Rest: AC-Koeffizienten

DC = Gleichstrom  
AC = Wechselstrom

- Der DC-Koeffizient gibt den Grundton des beschriebenen Bereichs (8x8) im Bild an (in der aktuellen Komponente)
- Die AC-Koeffizienten geben mit aufsteigenden Indizes den Anteil „höherer Frequenzen“ an, d.h. die Zahl der (vertikalen bzw. horizontalen) Streifen
- Z.B.:
  - $F(7,0)$  gibt an, zu welchem Anteil extrem dichte waagrechte Streifen vorkommen;
  - $F(0,7)$  gibt an, zu welchem Anteil extrem dichte senkrechte Streifen vorkommen

## DCT: Zusammenhang Datenraum - Frequenzraum



- Ein Punkt im Frequenzraum faßt die Informationen aus dem aktuell betrachteten Bilddatenraum (8x8 Pixel) zusammen.
- Kanten erscheinen als Anteile hoher Frequenzen; bei Flächen sind die hohen Frequenzen fast Null
  - Gute Voraussetzung für spätere Kompression der Null-nahen Werte durch Entropiekodierung

## Inverse DCT: Mathematische Definition

$$f(x, y) = \frac{1}{4} \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 c_u c_v F(u, v) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{16} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{16}$$

wobei

$x, y$  Koordinaten für die Datenpunkte einer Quell-Dateneinheit  
( $x, y = 1, \dots, 8$ )

$u, v$  Koordinaten für die Ziel-Koeffizienten ( $u, v = 1, \dots, 8$ )

$f(x, y)$  Datenwert (Sample)

$F(x, y)$  Koeffizientenwert

$$c_u, c_v = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{falls } u, v = 0$$

$$c_u, c_v = 1 \quad \text{sonst}$$

- Die Berechnung ist fast identisch mit der Vorwärts-Transformation.
- Mathematisch gesehen, ist der Prozeß verlustfrei!
  - Verluste entstehen aber durch Rundungsfehler

## JPEG-Kodierung: Quantisierung

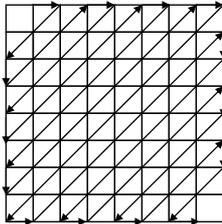
- Entscheidender Schritt zum Informationsverlust und damit zur starken Kompression !
- Quantisierungstabelle:
  - Gibt 64 Bewertungs-Koeffizienten  $Q(u, v)$  vor
  - Bedeutung: Bewertung der einzelnen Frequenzanteile des Bildes
  - Größere Tabelleneinträge bedeuten stärkere Vergrößerung
  - Konkrete Tabellen nicht Bestandteil des Standards (nur zwei Beispiele)
  - Benutzte Quantisierungstabellen werden als Bestandteil der komprimierten Daten abgelegt
- Berechnung:
  - Division Frequenz-Koeffizient / Bewertungskoeffizient und Rundung
  - Macht mehr oder minder viele der Koeffizienten zu Null

JPEG-Schritte

$$F'(u, v) = \text{Round} \frac{F(u, v)}{Q(u, v)}$$

## Vorbereitung zur Weiterverarbeitung

- Quantisierte Frequenzwerte:
  - werden in linearer Reihenfolge ausgegeben
  - unterschiedliche Behandlung DC- und AC-Koeffizienten
- DC-Koeffizienten:
  - Benachbarte Dateneinheiten haben oft ähnlichen Grundton
  - Prädiktionsverfahren: *Differenz* zum DC-Wert der vorgehenden Dateneinheit wird weiter verwendet
- AC-Koeffizienten:
  - Ausgabe nach absteigender Frequenz („Zick-Zack“)



## JPEG-Kodierung: Entropie-Kompression

- Vorletzter Schritt: „Statistische Modellierung“
  - » DC-Koeffizienten: Umsetzung in Werte, die Größen- und Amplitudenunterschied zeigen
  - » AC-Koeffizienten: im Wesentlichen Lauflängen-Codierung
- Letzter Schritt: Entropie-Kodierung
  - Wahl zwischen Huffman-Algorithmus und arithmetischer Kompression
  - Getrennt für DC- und AC-Koeffizienten
- Woher kommen die Häufigkeitsverteilungen?
  - Zwei Beispielverteilungen im Standard gegeben
  - Alternative: Durch zusätzlichen Pass über die Daten errechnen

JPEG-Schritte

## JPEG Datenströme

- Ausgabe der JPEG-Kompression
  - Besteht aus Komponenten
  - Getrennt durch *marker* (2 Bytes, erstes Byte xFF)
- Beispiele für Marker:
  - Start of image (SOI)
  - End of image (EOI)
  - Start of frame, baseline (SOF<sub>0</sub>)
  - Start of frame, extended sequential (SOF<sub>1</sub>)
  - Start of frame, progressive (SOF<sub>2</sub>)
  - Start of frame, lossless (SOF<sub>3</sub>)
  - Define Huffman table (DHT)
  - Define quantization tables (DQT)
  - Define restart interval (DRI)
  - Application specific (APP<sub>0</sub> – APP<sub>15</sub>)
  - ...

## JFIF Dateiformat

- Der JPEG-Standard definiert das Dateiformat nicht im Detail.
- De-Facto-Standard: JFIF (JPEG File Interchange Format)
  - inoffiziell (David Hamilton)!
- Neuer offizieller Standard: SPIFF (Still Picture Interchange File Format)
  - von der JPEG
  - spät eingeführt, kompatibel mit JFIF, aber wesentlich flexibler
- JFIF definiert:
  - „Signatur“ zur Identifikation von JPEG-Dateien („JFXX“)
  - Farbraum
  - Pixeldichte
  - Vorschaubilder („Thumbnails“)
  - Zusammenhang Pixel – Abstatfrequenz