

Digitale Bilder

A/D-Wandlung von Bilddaten,
Digitale Bilddarstellung,
Farbräume

Wolfgang Heiden © 2014-22, mit Beiträgen von R. Herpers, F. Mannuß, B. Kahl

Wolfgang Heiden © 2014-22 wolfgang.heiden@h-brs.de
-- auf der Grundlage einer Lehrveranstaltung von Prof. Dr. Rainer Herpers sowie Folien
von Florian Mannuß 2011, Dr. Björn Kahl 2012 --

Fachbereich Informatik (Dpt. Computer Science)
Hochschule Bonn-Rhein-Sieg – University of Applied Sciences,
53754 Sankt Augustin
Germany

- Abbildung einer zweidimensionalen, kontinuierlichen Intensitätsfunktion $I(x,y)$ auf diskrete Werte

- Räumliche Diskretisierung:
kontinuierliche Ortskoordinaten (x,y)
→ diskrete Ortskoordinaten (u,v)
- Quantisierung der Intensitätswerte mit begrenzter Bittiefe:
z.B. 8 bit pro Pixel pro Farbkanal ($0 \rightarrow 255$)

→ diskrete Funktion

$$I(u, v) \in \mathbb{P}, \quad \text{mit } u, v \in \mathbb{N}$$

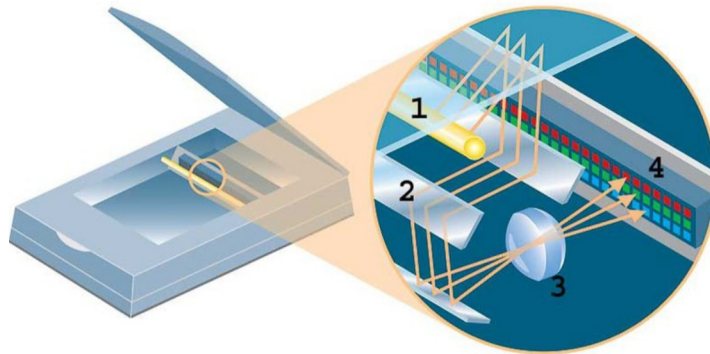
Wenn wir von „Digitalen Bildern sprechen“, meinen wir i.d.R. gerasterte Bilder mit begrenzter örtlicher Auflösung und quantisierten Signalintensitäten mit begrenzter Bittiefe.

CCD-Scanner

Strahlengang für einen
Bildpunkt:

Kaltlichtlampe:

- 1 belichtet die Vorlage.
 - Spiegelsystem/
Prisma 2 zerlegt
reflektiertes Licht in
Grundfarben Rot,
Grün, Blau.
 - Hochwertige Linse
3 projiziert
Grundfarben auf ...
 - CCD-Zeile 4.
- Vorteil: große
Tiefenschärfe.



Quelle: CHIP: Vergleichstest: 22 Scanner (Überblick)

Background: So funktionieren CCD- und CIS-Scanner (2001)

https://www.chip.de/artikel/Vergleichstest-22-Scanner-ueberblick-2_140099301.html

CCD = Charge coupled device → Belichtung von Sensorzellen verändert deren elektrische Ladung und löst dadurch ein Intensitätssignal aus.

Farbsignale entstehen durch Verwendung von (pro Pixel) jeweils 3, dicht bei einander liegenden, Sensoren mit Empfindlichkeitsmaxima in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen (rot, grün, blau) – ähnlich den 3 Zapfen-Typen im menschlichen Auge.

Quelle: https://www.chip.de/artikel/Vergleichstest-22-Scanner-ueberblick-2_140099301.html [Zugriff: 08.04.2019]

CCD-Aufnahmesensor

- **CCD = Charge-Coupled Device**
- Matrix lichtempfindlicher Zellen
 - *innerer photoelektrischer Effekt* bewirkt ungleichmäßige Elektronenverteilung in Halbleitern
 - Zelldichte (~Auflösung) vs. Zellgröße (~Lichtempfindlichkeit)
 - el. Spannung ~ Lichtstärke
- Auslesen durch Schieberegister
 - Ladungsverschiebung vgl. „Eimerkette“ zum Ausleseregister
- lineares Ansprechverhalten
- Farbsensoren mit unterschiedlichen Absorptionsmaxima:
 - *i.d.R.*: rot, grün, blau
 - *erweiterbar*: IR, UV, Röntgen
 - Farbtrennung durch Prisma oder Filter

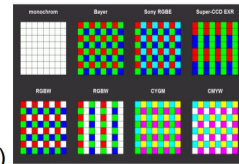


Bild: Frank Klemm, Wikipedia, 2010

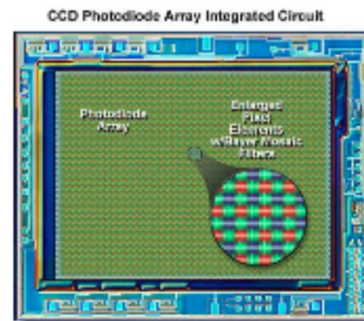


Figure 2

Prisma lenkt Farbanteile eines Lichtstrahls auf unterschiedliche Pixel;
Alternativ: teiltransparente Farbfilter (Bayer-Sensor) vor jeder Sensorzelle

CCD hauptsächlich in Scannern & Camcordern

CCD-Fehlerquellen

- Geometrische Verzerrung
 - Lineares Ansprechverhalten
- Thermisches Rauschen
 - elektrische Signale ohne Lichteinwirkung
- Sensorunregelmäßigkeiten
 - ungleiche Lichtempfindlichkeit
- Auslesefehler
 - fehlerhafte Weiterleitung von Signalen
- Blooming
 - Überspringen von Ladungsträgern auf Nachbarzelle bei Überbelichtung

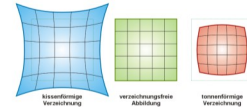


Bild: Fantagu, Wikipedia, 2009

Wie bei analogen Kameras, kann es auch bei digitalen zu systembedingten Fehlern (wenn auch anderer Natur) kommen, so dass die Bildaufnahmen nicht perfekt die Lichtverhältnisse der Originalszene wiedergeben. Solche Fehler können nachträglich mit Methoden der Bildverarbeitung korrigiert (oder zumindest abgemildert) werden.

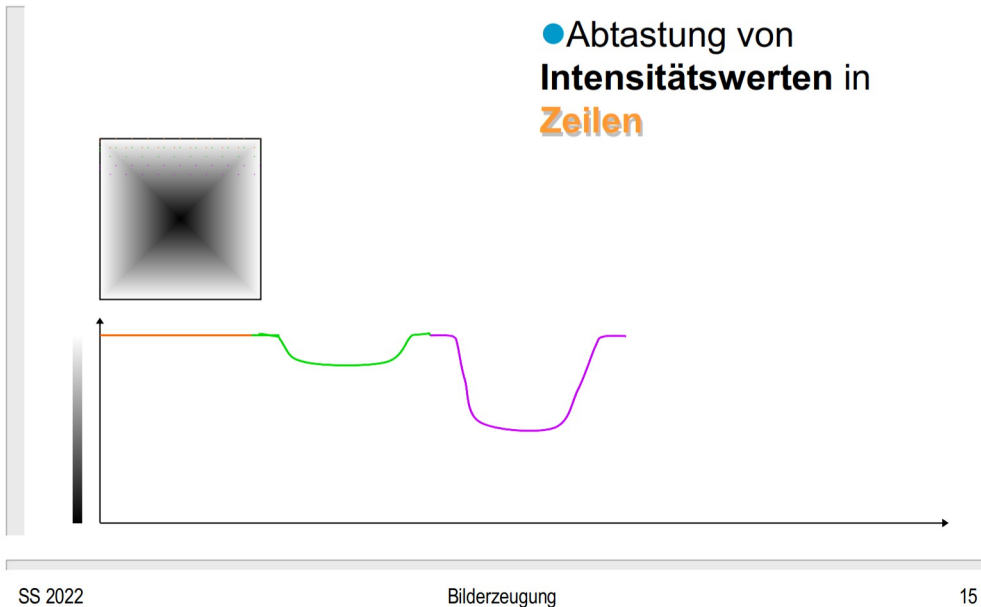
Active Pixel Sensor (APS)

- **= CMOS-Sensor**
 - ◉ Complementary metal-oxide-semiconductor
- **Halbleiterdetektor** mit **Signalverstärker** für jedes Pixel
- **Alternative zu CCD-Sensoren**
 - direkte Ladungsauslesung ohne Verschiebung
 - geringere Lichtempfindlichkeit
 - ungünstige Signal-to-Noise Ratio (SNR)
 - ❖ schneller, kleiner, geringer Energieverbrauch
- **Anwendung:** SmartPhones, Digitalkameras

Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Complementary_metal-oxide-semiconductor [Zugriff: 08.04.2019]

Ein Bild als analoges Signal

● Abtastung von
Intensitätswerten in
Zeilen



SS 2022

Bilderzeugung

15

Ein Bild kann prinzipiell als ein analoges, zweidimensional variierendes, Signal angesehen werden.

Die Abtastung in regelmäßigen Abständen als Bildzeilen liefert ein eindimensionales Intensitätssignal.

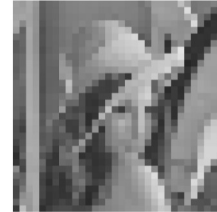
Mehr oder weniger regelmäßige Muster können periodische Signale erzeugen, die auch als Überlagerung von Schwingungskurven interpretiert werden können. Damit werden visuelle Signale in gewisser Weise vergleichbar zu akustischen, mit dem Unterschied, dass erstere (visuell) über den Ortsraum variieren, während letztere (akustisch) eine Abfolge im Zeitraum wiedergeben.

Abtastung: Maßgrößen

- **Räumliche Auflösung:**

- Anzahl Pixel in beide Abtastrichtungen

"Lena":
512x512
128x128
32x32



- **Räumliche Frequenz:**

- Änderungsrate von $F(x,y)$

hochfrequent



nieder-
frequent

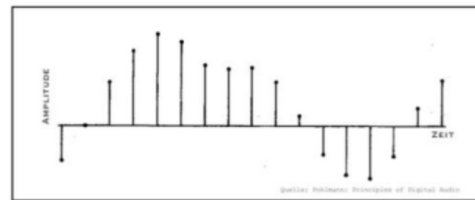
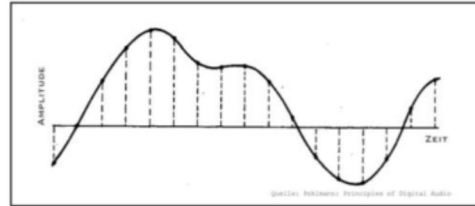
2 wesentlich Maßgrößen bestimmen digitale (gerasterte) Bildsignale:

zum einen die räumliche **Auflösung**, also die Gesamtzahl an Bildpunkten, die sich über die beiden Bildachsen verteilen und somit die Menge an einzelnen visuellen ortsbezogenen Informationen, einschließlich des Seitenverhältnisses (Breite/Höhe); die Auflösung eines Bildes sagt also etwas über dessen räumliche Genauigkeit – letztlich also die (maximal mögliche) **Bildschärfe** – aus.

zum anderen die räumliche **Frequenz** eines Bildes (nicht zu verwechseln mit der Bildwechselfrequenz in einer Serie von zeitlich aufeinander folgenden Einzelbildern!), womit die Rate von **Intensitätswechseln** pro Längeneinheit (in beide Richtungen) beschrieben wird. Hochfrequente Bilder (oder Bildanteile) zeichnen sich durch schnelle Hell-/Dunkel-Wechsel aus, während niederfrequente für farblich (bzw. hinsichtlich der Intensität) weitgehend homogene Flächen stehen.

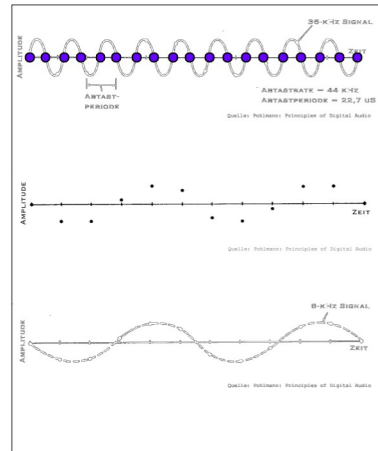
Digitalisierung: Abtastung

- **Messung** der Amplitude eines analogen Signals **in regelmäßigen Abständen**
- **Umwandlung** der zeitlich und/oder räumlich kontinuierlichen Analogsignale **in eine diskrete Folge von numerischen Werten**



Bei der Digitalisierung werden zeitlich und/oder räumlich kontinuierliche Analogsignale in eine diskrete Folge von numerischen Werten umgewandelt. So wird beispielsweise die Amplitude eines (analogen) Tonsignals bei der Digitalisierung auf einen diskreten Wert (eine endliche Zahl) abgebildet. Diese Abbildung bietet den Vorteil der vereinfachten Handhabung (und Manipulation) der vorliegenden Daten. Es muss jedoch beachtet werden, dass eine A/D-Wandlung (und deren inverse Umwandlung des digitalen Signals in ein Analoges) fast immer verlustbehaftet ist. In vielen Anwendungsbereichen ist dieser Verlust jedoch (für das menschliche Wahrnehmungssystem) nicht sichtbar bzw. hörbar.

- **Abtasttheorem (Shannon/Nyquist):**
 - Abtastung mit weniger als der **doppelten Maximalfrequenz** kann zu Fehlern bei der Rekonstruktion führen.
 - Bei exakt der doppelten Frequenz besteht ein Restrisiko, alle Nulldurchgänge zu treffen.



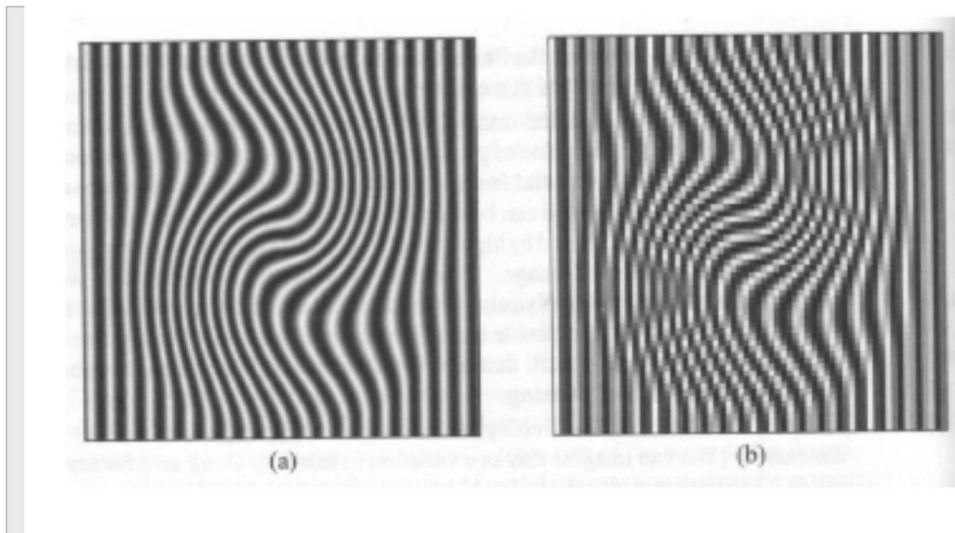
Wird das **Abtasttheorem** nicht beachtet, ist die Abtastfrequenz also niedriger als die halbe Signalfrequenz, treten Fehlabtastungen auf. Das digitale Signal enthält dann Informationen, die im Originalsignal nicht vorhanden waren. Eine fehlerfreie Rekonstruktion des Ursprungssignals ist nicht mehr möglich.

Die Mindestanforderung, um den analogen Ursprung eines periodischen Signals aus dessen digitaler Repräsentation zuverlässig rekonstruieren zu können, besteht darin, mindestens einen Messwert in jedem Wellenberg und jedem Wellental zu kennen. Liegt dieser Messwert jedoch immer an derselben Position eines Signals, dann kann dessen Amplitude damit unterschätzt werden (und eine gewisse Phasenverschiebung zustande kommen). Liegt die Abtastrate (möglichst signifikant) über der minimal geforderten Shannon-Frequenz, dann verschiebt sich der Messpunkt mit jeder Wiederholung des Wellensignals und liefert so genauere Informationen für die Rekonstruktion des Verlaufs.

Besteht ein insgesamt betrachteter Datensatz aus verschiedenen (sequenziell oder gleichzeitig überlagerten) Teilsignalen unterschiedlicher Frequenzen, so muss die Abtastrate die Anforderung für alle beteiligten Frequenzen erfüllen. Dies ist dann gewährleistet, wenn die höchste vorkommende Frequenz korrekt abgetastet wird.

Der Forderung des Abtasttheorems ist also dann entsprochen, wenn die **Abtastrate höher ist als das Doppelte der höchsten Frequenz in der** zu digitalisierenden **Signalfolge**.

Aliasing-Beispiel: Moirée-Effekt



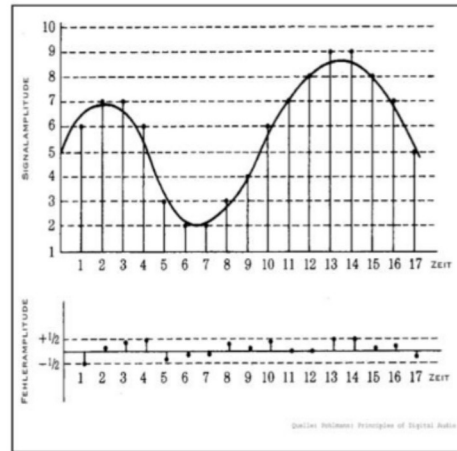
Bildquelle: Efford

Durch Aliasing-Effekte entstehen regelmäßige Fehler bei der Zuweisung heller und dunkler Bildpunkte in Grenzbereichen. Durch ihre periodische Entstehung wirken sich diese Fehler aus wie die Überlagerung einer weiteren Schwingung.

Nach der schillernden Wirkung in bestimmter Webart erzeugter Stoffe in Abhängigkeit vom Lichteinfallswinkel (Moirée-Muster) wird dieser Effekt auch in der Bildverarbeitung als Moirée-Effekt bezeichnet.

Digitalisierung: Quantisierung

- Speicherung der Abtastgrößen als **diskrete Werte** mit festgelegter Genauigkeit
- Wortlänge in bit definiert **Quantisierung**s-Genauigkeit



Bei der Digitalisierung eines analogen Audiosignals wird die Signalamplitude in periodischen Zeitabständen abgetastet und als diskreter Wert (Sample) gespeichert (quantisiert). Die Abtastgenauigkeit wird in Bits angegeben: Je mehr Bits zur Speicherung der Samples verwendet werden, desto besser wird das analoge Signal approximiert. Speichert man das digitalisierte Signal hingegen mit wenigen Bits Genauigkeit, rauscht das Signal bei anschließender Wiedergabe (Digital-Analog-Wandlung) stärker. Dieses durch den Wandlungsprozess eingeführte Rauschen nennt man **Quantisierungsrauschen**.

● Quantisierung von Farbwerten

in digitalen Bildern:

- Abbildung kontinuierlicher Werte auf diskrete Werte

- Gebräuchliche Formate:

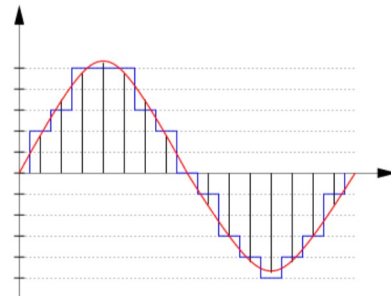
- l **Graustufen:** 8 oder 16 Bit

- l **RGB-Farbbild:**

3 Farbkanäle zu je 8 Bit für
Rot-, Grün-, Blau
→ „24 bit Farbtiefe“

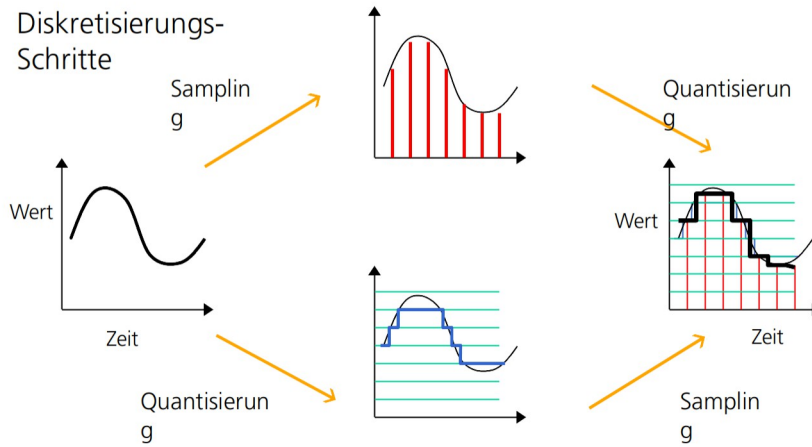
- l **RGBA:**

3 Kanäle für Farben (RGB)
+ 1 für Transparenz („Alpha“)
→ 32 bit



Die **Farbtiefe** von digitalen Bildern gibt an, wieviel Speicherplatz je Bildelement (Pixel) für die gemessenen Intensitäten der angegebenen Farbkanäle insgesamt zur Verfügung stehen, und ist damit ein Maß für die Genauigkeit der Zahlenwerte und damit auch für die **Anzahl der darstellbaren unterschiedlichen Farb- bzw. – bei Graustufenbildern – Helligkeitswerte**. Bei den meisten digitalen Bildformaten stehen in einem Kanal 8 bit zur Verfügung und damit 256 unterschiedliche Intensitätswerte. Bei einem typischen Farbbild mit den 3 Farbkomponenten Rot, Grün und Blau (**RGB**) entspricht das einer Farbtiefe von $3 \times 8 = 24$ bit. Besteht darüber hinaus noch die Möglichkeit, abgestufte Transparenzwerte in einem zusätzlichen „**Alpha**“-Kanal zu codieren, wächst die Farbtiefe damit auf **32 bit**.

Abtastung und Quantisierung



Quelle: Watkinson: *Television Fundamentals*

Die Genauigkeit der Digitalisierung eines analogen Signals hängt im Wesentlichen von zwei Größen ab: der **Sampling-Rate**, d.h. dem Abstand zwischen zwei Messungen, und der **Quantisierungs-Genauigkeit**, d.h. dem Speicherplatz für die Darstellung des gemessenen Wertes.

Digitalisierungsfehler

- **Jitter**

- zeitliche Schwankung im Signal

- **Rauschen (Noise)**

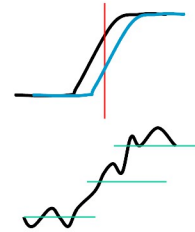
- überlagerte Amplitudenschwankung

- **Quantisierungsfehler**

- "**Quantisierungsrauschen**" durch *Aliasing*-Effekte

- Signalverfälschung

- 1 Abhilfe: **Dither**: gezieltes Hinzufügen von Rauschen vor der Digitalisierung und späteres Abziehen bei D/A-Wandlung



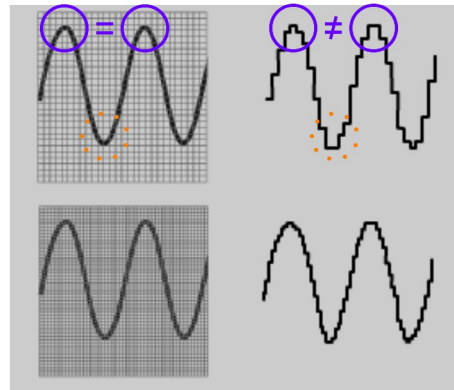
Dither (gezielt überlagertes unregelmäßig schwankendes Signal = „Zittern“) verhindert wiederkehrend gleichen Quantisierungsfehler bei wiederkehrendem Signal und ermöglicht so eine bessere Rekonstruktion.

- **Quantisierungsstufen**

- **Aliasing-Effekte:**

- Stufen
- Asymmetrie
 - 1 zwischen verschiedenen Schwingungen
 - 1 innerhalb einer Schwingung

- Je kleiner die **Bittiefe**, umso stärker wirken sich kleine Messungenauigkeiten aus, besonders bei niedrigen Amplituden.



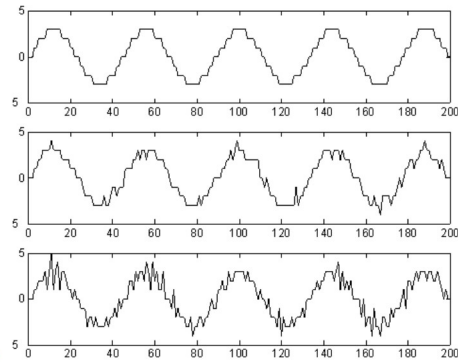
Bildquelle: http://www.gsara.be/projeteuropeen/cooldatweb/deutsch/basics/signal_9.htm

Durch **Aliasing**-Effekte (d.h. verschiedene Messwerte werden auf dem selben digitalen Bitwort abgebildet, was zunächst einmal zur Abstufung als solcher führt) entsteht bei der Quantisierung eines analogen Signals eine Treppenkurve, die das ursprüngliche Signal nicht exakt wiedergibt. Da die Sampling-Frequenz üblicherweise nicht exakt auf die Periode des Ursprungssignals abgestimmt ist (d.h. kein ganzzahliger Teiler der Periode, d.h. Abtastung bei verschiedenen Werten aufeinander folgender Einzelschwingungen), wird eine ursprünglich symmetrische Signalkurve dadurch asymmetrisch. Dies führt bei der Rekonstruktion einer reinen Sinusschwingung (z.B. eines konstanten Tons) z.B. zu einer Veränderung, die sich als "**Rauschen**" bemerkbar macht, weil der Effekt sich über einen längeren Zeitraum **wie eine der Originalschwingung überlagerte hochfrequente zusätzliche Schwingung** verhält.

Besonders bei geringen Amplituden (z.B. leisen Tönen) stehen zur Codierung von Unterschieden nur wenige Binärstufen zur Verfügung. Dadurch macht sich der o.g. Effekt hier besonders gravierend bemerkbar und kann dazu führen, dass statt eines Rauschens das Signal insgesamt verfälscht wird. Dies geschieht auch, wenn die Quantisierungsfehler sich periodisch wiederholen und so ein längerwelliges Muster (vgl. Moirée-Effekte durch Aliasing in der Bildverarbeitung) vortäuschen.

Dither

- Verfälschung des Originalsignals durch grobe Quantisierung
- Gezielt hinzugefügtes **asymmetrisches Rauschen** (Dither) vor der Quantisierung
- Bessere Rekonstruktion des Originalsignals durch nachträgliche Glättung (Rauschentfernung)

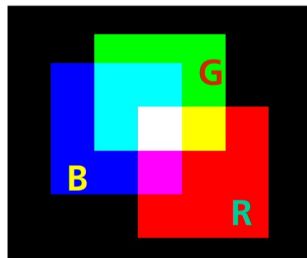


Bildquelle: siehe Beispiel

Beispiel: C. Hicks: "What is dither?",
http://www.mtsu.edu/~dsmitche/rim420/reading/rim420_Dither.html

In manchen Fällen kann es vorteilhaft sein, die Originalschwingung vor der Quantisierung mit einer hochfrequenten Schwingung so zu überlagern, dass ein asymmetrisches Rauschen entsteht. Da die Quantisierung nun das Originalsignal in jeder Periode auf unterschiedliche Weise verfälscht, lässt sich dieses durch nachträgliches Glätten genauer rekonstruieren als ohne das überlagerte Zittern (**Dither**).

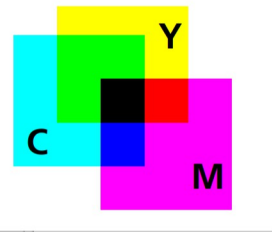
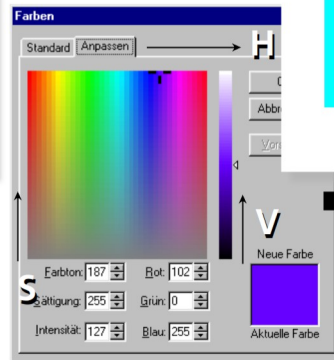
Farbmodelle



RGB

RGB → Farbsinneszellen

HSV



CMY K

HSV → neuronale
Verarbeitung

RGB → Red, Green, Blue

CMY → Cyan, Magenta, Yellow

HSV → Hue (Farbtyp), Saturation, Value (Helligkeit)

Farbmodelle

RGB – CMY(K) – HSV

Die verschiedenen Farbmodelle können (näherungsweise)
rechnerisch ineinander überführt werden.

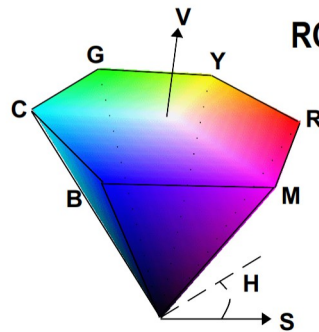
RGB ↔ CMY

$$(C \ M \ Y) = (1 \ 1 \ 1) - (R \ G \ B)$$

CMY ↔ CMYK

$$K = \min(C, M, Y)$$

$$(C \ M \ Y) = (C \ M \ Y) - (K \ K \ K)$$



RGB ↔ HSV (vereinfacht)

H = Winkel
zw. R und Y, G, ...

$$V = \max(R, G, B)$$

$$S = (V - \min(R, G, B)) / V$$

stark vereinfachte Umrechnung; eigentlich komplizierter über Farbmatrik

Beispielrechnungen: (z.B. orange = rot+gelb)

1. RGB = 255;127;0 ("schmutzig orange" 255;127;5)

📄 ➔ CMY = 0;128;255 (= 255-255;255-127;255-0)

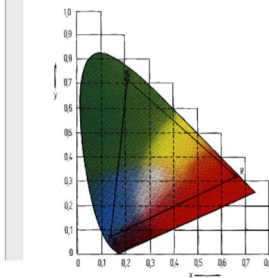
📄 ➔ CMYK = CMY, weil C=0; "schmutzig orange" CMY 5;128;255 ➔ CMYK 0;123;250;5

4. RGB ➔ HSV = 0.524;255;255 (H=30°; V=255=100%; S=255-0=255=100%)

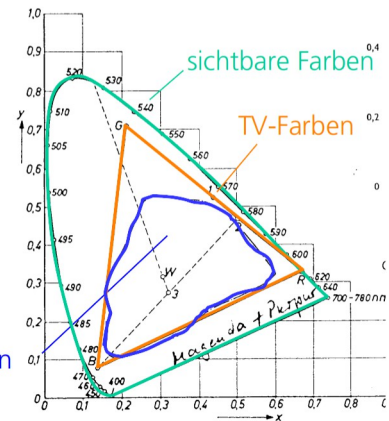
"schmutzig orange": 0.524;250;255 (H=30°; S=98%=255-5; V=100%)

5. alternative HSV-Variante für "schmutzig orange": S = (255-5)/255 = 254.98

- Farbspektrum des Menschen
- RGB-Spektrum
- CMYK-Spektrum
- Spektralwertkurven
→ CIE-LUV



Drucker-Farben



Das **Farbspektrum** des Menschen umfasst grundsätzlich mehrere Millionen verschiedener Farbwerte, von die allerdings nicht im Verhältnis 1:1 auf die 24bit-RGB Farbdarstellung abgebildet werden können, da die Empfindlichkeit nicht linear über die verschiedenen Wellenlängen variiert.

Grundsätzlich ist eine **Farbempfindung** immer subjektiv. Die Erzeugung einer bestimmten Farbwahrnehmungsempfindung mit technischen Hilfsmitteln lässt sich zwar eindeutig, aber keineswegs trivial, berechnen. Mit derartigen Berechnungen befasst sich die

Farbmetrik.

Spektralwertkurven zur technischen Erzeugung von Farbeindrücken → Primärvalenzen

→ CIE-LUV (HVC = Hue, Value, Chroma); verzerrter HSV-Raum

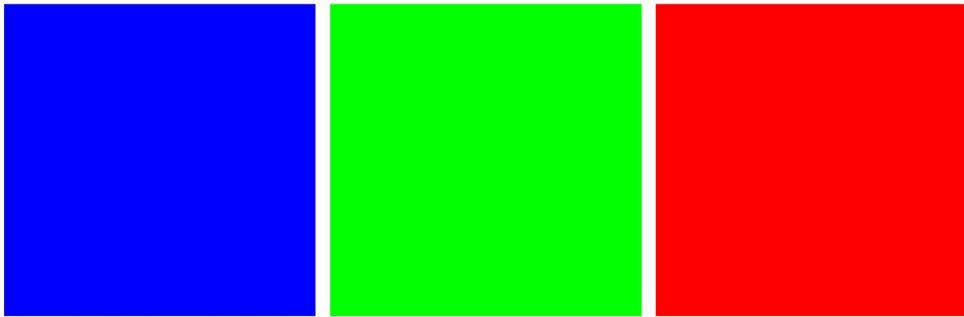
CIE = Commission International de l'Éclairage

Aufgrund unterschiedlicher Spektralausschnitte der jeweiligen Lichtabsorption bzw. -emission weichen die darstellbaren Farben zwischen menschlichen Sehpigmenten (grüne Kurve), üblichen Monitoren (orange Kurve) und druckbaren Farbstoffen (blaue Kurve) deutlich von einander ab. So können z.B. viele Grün- und Violett- bzw. Rottöne technisch nicht (oder nur mit besonderem Aufwand) erzeugt werden. Auch einige Farben, die auf Monitoren sichtbar sind, lassen sich im Druck nicht reproduzieren.

Absolute Helligkeitswahrnehmung

● Farb-Helligkeit

R G B – 100% jeweils



Weil die Empfindlichkeit unserer Sehrezeptor-Zellen mit der Wellenlänge des Reiz auslösenden Lichts variiert, nehmen wir Farbflächen unterschiedlicher Wellenlänge trotz physikalisch identischer Lichtintensität unterschiedlich hell wahr. Daher trägt grünes Licht stärker zu unserem Helligkeitsempfinden bei als rotes oder gar blaues.

Physiologisch optimierte Farbräume – CIE-Lxx

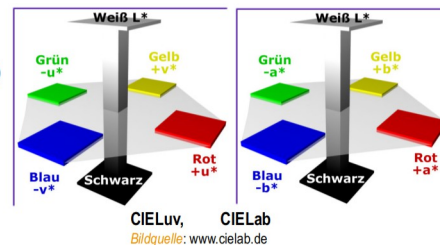
- Intuitiv nachvollziehbare Farbcodierung
- Subjektiv gleichmäßige Aufteilung der Farbskala

- Physiologische vs. Physikalische Farbskalen



- CIE-Farbräume
(physiologisch linear)

- CIELuv (leuchtende Farben:
Monitore, Projektoren, Scanner)
- CIELab (reflektierende Farben:
Drucker)



Um eine Farbskala zu erzeugen, die sich gemäß der menschlichen Wahrnehmung linear abgestuft ändert, hat die **Commission International d'Éclairage (CIE)** spezielle Farbräume entworfen, welche diese Anforderung jeweils für selbst leuchtende Abbildungsgeräte (**Luv**: im 2D-Farbraum mit den Koordinaten u und v) bzw. absorbierend wirkende Farbdarstellungen (**Lab**: Koordinaten a und b) erfüllen. Eine einfache Farbskala, in welcher die Farbkomponenten kontinuierlich linear anwachsen bzw. abfallen, leistet dies dagegen nicht. Das führt dazu, dass menschliche Betrachter in einfachen Farbräumen im gelb-grünen Bereich erheblich mehr verschiedene Farbtöne unterscheiden können als im blauen.

Farbdarstellung in Bilddateien

- **Farbtiefe: bpp = bits per pixel**

- *typisch*: 8 bpp / Farbkanal
→ 0 - 255

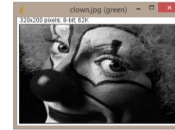
- **Standard: RGB/A**

- RGB: 24 bpp = 8 rot + 8 grün + 8 blau
 - RGBA: 32 bpp = RGB + 8 alpha (Transparenz)

- **Alternative (oft komprimierte)**

Bilddatenformate

- LUT-basiert (indiziert)
 - Farbraumreduktion
 - Trennung von Luminanz und Chrominanz
 - Basis: YUV (o.ä.)



LUT = Look-up Table

YUV: Y=Luminanz (Helligkeit); U,V: Chrominanz (Farbigkeit)

Luminanz und Chrominanz

● YUV-Farbmodell

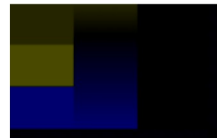
- farbabhängige Helligkeitswahrnehmung beim Menschen

● Luminanz (Helligkeit) Y

- $Y := 0.299 \cdot R + 0.587 \cdot G + 0.114 \cdot B$
- $Y \approx 0.3 \cdot R + 0.6 \cdot G + 0.1 \cdot B$

● Chrominanz (Farbanteile) U, V

- $U := (B - Y) \cdot 0.493$
- $V := (R - Y) \cdot 0.877$



Die Transposition eines auf gleichartigen Farbkomponenten basierenden Farbraums (z.B. RGB, CMY) in einen anderen, der die achromatische Helligkeit (**Luminanz**: Y) von den Farbanteilen (**Chrominanz**: U und V) trennt, erlaubt separate Betrachtung und Weiterverarbeitung von Helligkeits- und Farbinformation. Um die Helligkeitsempfindung wahrnehmungsgetreu aus den Farbanteilen zu berechnen, fließen diese mit unterschiedlicher **Gewichtung** ein.

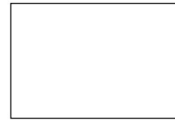
Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/YUV-Farbmodell> [02.05.2011]

Rückrechnung: $G = 1.7 \cdot Y - 0.509 \cdot R - 0.194 \cdot B = Y - 0.39466 \cdot U - 0.5806 \cdot V$

Farbraumkonvertierung + reduzierte Farbauflösung

Bei vielen Datenformaten zur Bildspeicherung, z.B. JPG, MPG

siehe auch: <http://www.fh-jena.de/contrib/fb/et/personal/ansorg/jpeg/farbraum.html>



RGB Bild
(z.B. von
Framegrabber
oder Scanner)

Farbraum- konvertierung

$$Y = 0.3 R + 0.6 G + 0.1 B$$

$$U = B - Y$$

$$V = R - Y$$

bei JPEG:

$$Cb = (U/2) + 0.5$$

$$Cr = (V/1.6) + 0.5$$

Luminanz
(Grauwertbild)



Farbdifferenz-
signale



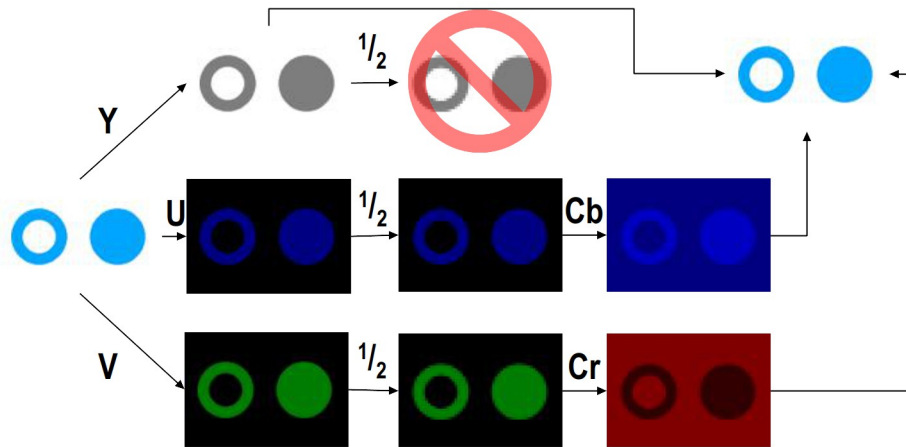
Unabhängige
DCT-Codierung

Platzersparnis durch ...

verringerte Farbauflösung

Da die menschliche Netzhaut eine erheblich größere Zahl an Helligkeitsrezeptorzellen (Stäbchen) aufweist als an Farbrezeptorzellen (Zapfen), sind wir in der Lage, Helligkeitsinformationen in deutlich höherer örtlicher Auflösung wahrzunehmen als Farbinformationen. Fehler tolerierende Methoden der **Bildkompression** machen sich das zunutze, indem die Ortsauflösung der Chrominanz-Kanäle gegenüber der Luminanz in reduzierter Auflösung gespeichert wird.

JPEG-Farbraumkonvertierung



Das Original wird vom RGB-Raum in den YUV-Farbraum konvertiert mit:

$$Y = 0.30R + 0.59G + 0.11B$$

$$U = B - Y$$

$$V = R - Y$$

Da hier für U und V auch negative Werte auftreten können, werden diese im Beispiel durch gelbe Farbtöne in der (eigentlich blauen) U-Komponente bzw. durch grüne Farbtöne in der (eigentlich roten) V-Komponente repräsentiert.

Anschließend kann die Auflösung der Farbdifferenzanteile U und V ohne erkennbaren Qualitätsverlust halbiert werden.

Bei JPEG werden die Chrominanzanteile aus U und V in Komponenten mit ausschließlich positiven Werten konvertiert:

$$Cb = (U/2) + 0.5$$

$$Cr = (V/1.6) + 0.5$$

Farbauflösung: YUV-Formate in der Bildcodierung



4:2:2

4:4:0

4:2:0

= 4:2:2 um 90° gekippt

üblich in JPEG und
meist genutzt in MPEG:
gleiche Farbauflösung
vertikal und horizontal

CCIR 601:
ungleiche Farbauflösung
vertikal und horizontal

Quelle: J. Watkinson in: TV Technology & Production, 09/97

In Videocodierung: häufig unterschiedliche Farbauflösung vertikal und horizontal:

Angabe "Y(erste und zweite Zeile gleich):C erste Zeile:C nächste Zeile"

4:2:2 → In jeder Zeile werden zu je 4 Y-Werten (Luminanz) je 2 B-Y und V-Y (Chrominanz) Werte codiert.

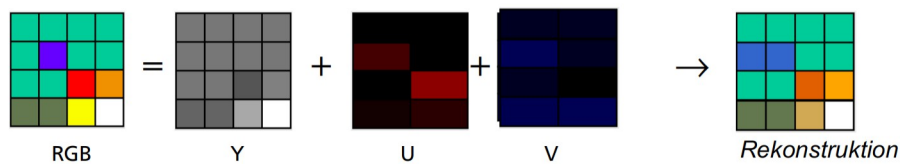
4:4:0 → In zwei aufeinander folgenden Zeilen werden zu je 4 Y-Werten abwechselnd je 4 bzw. 0 B-Y und R-Y Werte codiert, d.h. jede zweite Zeile wird entweder in voller Auflösung oder nur durch Luminanz codiert.

4:2:0 → In zwei aufeinander folgenden Zeilen werden zu je 4 Y-Werten abwechselnd je 2 bzw. 0 B-Y und R-Y Werte codiert, d.h. jede zweite Zeile wird entweder mit voller Luminanz und halber Chrominanz oder nur durch Luminanz codiert.

Quelle: The Digital Fact Book, ed.9, Quantel 1998

4:2:2 (YUV)

- **Luminanz $Y = 0.30R + 0.59G + 0.11B$: $n \times 4$ Pixel je Zeile**
($3Y = R + G + B$)
- **Chrominanz $C_r (V) = R - Y$: $n \times 2$ Pixel je Zeile**
- **Chrominanz $C_b (U) = B - Y$: $n \times 2$ Pixel je Zeile**



Ein Bildausschnitt der Größe 4x4 demonstriert die Auswirkung einer chrominanzreduzierten Bilddarstellung nach dem Schema 4:2:2.

Tabellenbasierte Kompressionsverfahren

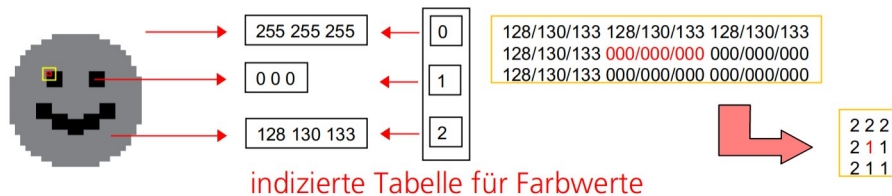
- **Beispiel: GIF-Farbcodierung (LZC)**

- Farbraumreduzierung
- z.B. 8 bpp (vgl. RGB: 24 bpp, RGBA: 32 bpp)

- **generelles Konzept: Look-Up Tables (LUT)**

(Tabellen-basierte Farbraumdarstellung)

- Tabellierung aller auftretenden Werte
- Einzelreferenzen auf Tabellenposition (Index)



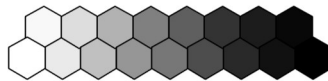
Treten in einem Bild nur wenige verschiedene Farbtöne auf, so kann es sich lohnen, jeden Farbton genau einmal exakt in eine „Look-up-Tabelle“ zu schreiben und die Zusammensetzung des gesamten Bildes aus diesen Farben später nur noch durch Referenzen in diese Tabelle zu codieren.

Differenzierung Grauskala vs. Farbskala

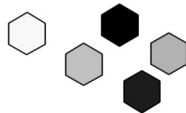
● greyscale



changing brightness



17 shades of gray (incl. white & black)



how many can you distinguish?



● color scale



changing color – constant (physical) brightness



R G B – 100% each

Nicht nur zwischen unterschiedlichen Farbtönen mit gleicher Helligkeitsempfindung variiert die menschliche Wahrnehmung nicht linear. Auch ähnliche Grautöne lassen sich in verschiedenen Helligkeitsbereichen unterschiedlich gut von einander unterscheiden. Besonders erschwert wird dies, wenn sich die zu vergleichenden Farb- bzw. Grauton-Felder nicht in unmittelbarer Nachbarschaft befinden.

Falschfarbenbilder

- **Farben repräsentieren Zahlenwerte**

- Beispiele: PET, Thermografie, ...

- **Motivation: wofür?**

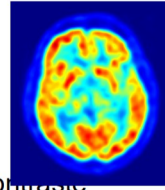
- z.B. Kontrastverstärkung

- **Wahl der Farbskala: wie?**

- Maximierung der Unterscheidbarkeit, Kontraste
- intuitives Verständnis der Farbbedeutung (z.B. Wärme)

- ggf. **Rückrechnung aus Falschfarben zu linearer Skala zur Rekonstruktion der ursprünglichen Messwerte bzw. deren Relationen: woher?**

- nicht-lineare Farbwahrnehmung → physiologische Farbskalen



Reicht die menschliche Fähigkeit zur Unterscheidung unterschiedlich heller Grautöne nicht aus, um die gesamte Bandbreite an Variation einer eindimensionalen Messgröße (wie z.B. der Temperatur im Infrarot-Spektrum) angemessen abbilden zu können, dann besteht die Möglichkeit, auf eine sog. **Falschfarbendarstellung** (d.h. Farben, wo eigentlich keine sind) auszuweichen, wobei die Messwerte auf eine eindimensionale Farbskala abgebildet werden. Die wahrnehmbare Farbauflösung übersteigt (in geeigneten Farbbereichen) die Grauwertauflösung um Größenordnungen.

Einflussfaktoren für farbige Bildwahrnehmung

- Physikalische Eigenschaften des Objekts
 - Materialeigenschaften
- Beleuchtung
 - Helligkeit, Farbigkeit, Homogenität ("Ausleuchtung") der Lichtquelle
- Betrachtungs-Medium
 - z.B. (selbst leuchtender) Monitor vs. (reflektierender) Druck
- Objekte in der Umgebung
 - Adaptation, Lichtabstrahlung
- Physiologischer Status des visuellen Systems
 - Adaptation, Hell-/Dunkel-Anpassung (Zapfen, Stäbchen), Sehfärbstoffe (Rhodopsin)
- Übertragungseigenschaften des visuellen Systems
 - rezeptive Felder, neuronale Verschaltung
- (Vergangene) Erfahrungen, emotionaler Zustand, etc.

Das Material eines Objektes beeinflusst den Ausschnitt von Wellenlängen aus dem elektromagnetischen Spektrum (d.h. Licht), der von dem Objekt reflektiert bzw. nach Teilabsorption emittiert wird – und somit die "Farbe", die der menschliche Gesichtssinn wahrnimmt, wenn das abgestrahlte Licht auf die Sehzellen der Netzhaut trifft. Selbstverständlich hängt der abgestrahlte Spektralausschnitt auch davon ab, welche Lichtwellen von einer Lichtquelle ausgegangen sind und somit überhaupt auf dem Objekt auftreffen konnten. (Ein "grünes" Objekt z.B. wirkt bei Rotlicht schwarz, weil es rotes Licht nicht reflektiert.) Streulicht von umgebenden Objekten beeinflusst ebenfalls das auftreffende und somit auch das abgestrahlte Licht. Aber auch physiologische (und psychologische) Eigenschaften beeinflussen die visuelle Wahrnehmung.

Kompetenzcheck

- **Bildaufnahmetechnik**
 - CCD, CMOS
- **A/D-Wandlung** bei Bilddaten
 - Rasterisierung, Quantisierung
 - Abtast-Theorem, Quantisierungsrauschen, etc.
- **Farbmodelle & Farbräume**
 - RGB, RGBA, CMY(K)
 - HSV
 - YUV, etc.: Luminanz & Chrominanz
 - Physiologie der Farben (u.a. CIE-Farbräume)
 - (LUT)

