

Bilder

Jörg Cassens

Institut für Mathematik und Angewandte Informatik

Medieninformatik
WS 2019/2020



medieninformatik

IMAI – Institut für
Mathematik und
Angewandte Informatik



 pingo.coactum.de/917952

- Grundlagen der visuellen Wahrnehmung
 - Farbwahrnehmung
 - Darstellung in Grundfarben Rot, Grün und Blau
- Digitalisierung und Codierung digitaler, pixelbasierter Bilder
- Kompressionsverfahren für Rastergraphiken
 - Beispiel JPEG
- Grundlagen Bildbearbeitung

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur

Licht

- Oft als wichtigster menschlicher Sinn dargestellt
- Visuelle Eindrücke zweifelsohne wichtig
 - auch wenn es Tiere gibt, die besser sehen können und
 - unsere Sehleistung im Alter abnimmt
- Unsere Umwelt ist voll von Bildern
- Wandel von Produktion und Verarbeitung hin zu digitalen Technologien
- Ob DSLR oder Smartphone-Kamera, Prinzipien bei Digitalisierung und Speicherung die gleichen
 - Messung physikalischer Signale und Abbildung in einem digitalen Raster
 - Daher: geeignete Diskretisierung und Quantisierung
- Dazu: kompakte Speicherung
- Für die Be- und Verarbeitung: digitale Technologien

Es werde Licht

- Fotografieren: Mit Licht schreiben
- Licht kann heller oder dunkler sein, unterschiedliche Farben haben
- Vereinfachte Annahme: Keine Photonen, keine Relativität
- Licht ist eine **elektromagnetische Welle**
- Charakteristische Eigenschaften
 - Ausbreitungsrichtung, Frequenz/Wellenlänge, Amplitude, Polarisierung

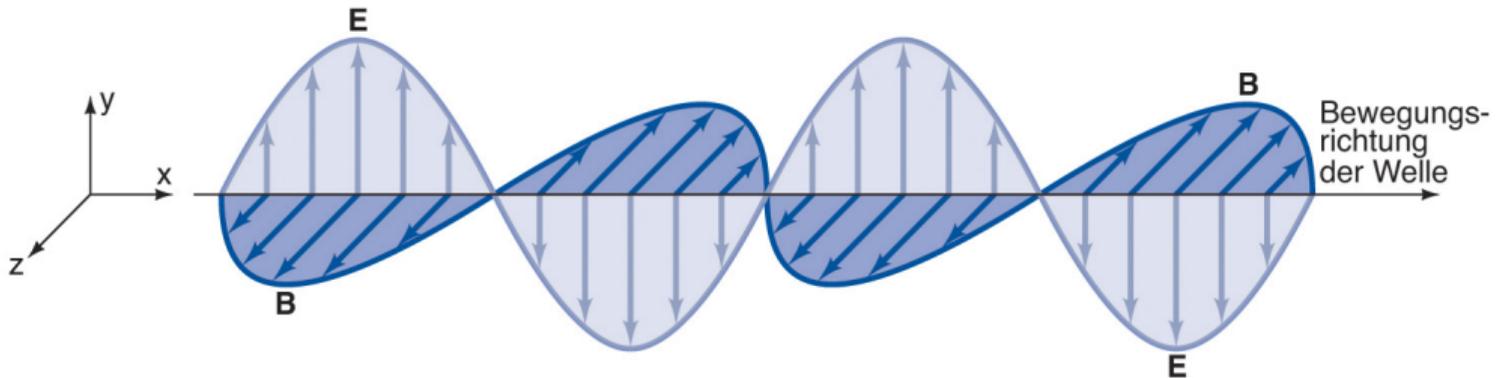


Abbildung 3.1: Zwei Wellen E und B, die sich in x-Richtung ausbreiten

- **Amplitude:** Maximaler Wert in einer Schwingung
- **Phase:** Ein Durchlauf
- **Phasenverschiebung:** Verschiebung des Nulldurchgangs (0-360 Grad)
- **Frequenz:** Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit
- **Wellenlänge:** Der Weg, den das Signal bei gegebener Ausbreitungsgeschwindigkeit zurücklegt
- **Polarisation:** Ebene, in der die Schwingung verläuft

- **Amplitude:** Maximaler Wert in einer Schwingung
- **Phase:** Ein Durchlauf
- **Phasenverschiebung:** Verschiebung des Nulldurchgangs (0-360 Grad)
- **Frequenz:** Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit
- **Wellenlänge:** Der Weg, den das Signal bei gegebener Ausbreitungsgeschwindigkeit zurücklegt
- **Polarisation:** Ebene, in der die Schwingung verläuft

Ausbreitungsrichtung

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur

- Elektromagnetische Wellen breiten sich von einer Quelle linear und mit konstanter Geschwindigkeit aus
- Abhängig von Wellenlänge und Beschaffenheit eines Hindernisses kann die Welle
 - abgelenkt, reflektiert werden
 - absorbiert werden
 - das Hindernis durchdringen
- Ungerichtete Quellen (Glühlampe)
- Gerichtete Quellen (Laser)
- Ausreichende Menge für die Wahrnehmung

- Entscheidet, ob und wie die Welle wahrgenommen wird
- Frequenz in Hz
- Sichtbarer Teil 385 bis 789 THz
- Idealisierte Ausbreitungsgeschwindigkeit 300.000.000 m/s
- Daher: Eine Schwingung ca. 380 bis 780 nm (Wellenlänge)
- Was ist sichtbar: unterschiedlich je nach Lebewesen
- Wellenlänge entscheidet über Farbwahrnehmung

Frequenz (contd.)

- Licht
- Wahrnehmen
- Farbräume
- Digitalisierung
- Kompression
- Bearbeitung
- Literatur

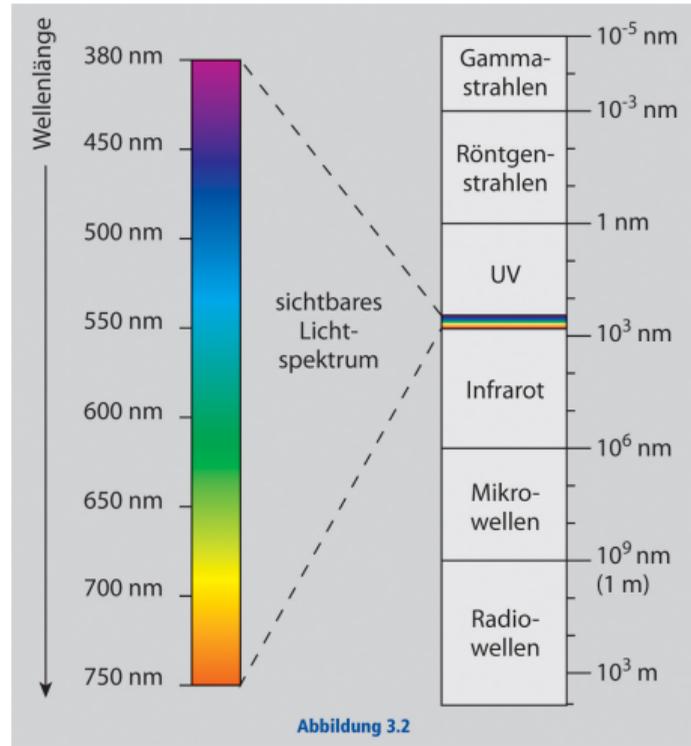


Abbildung 3.2

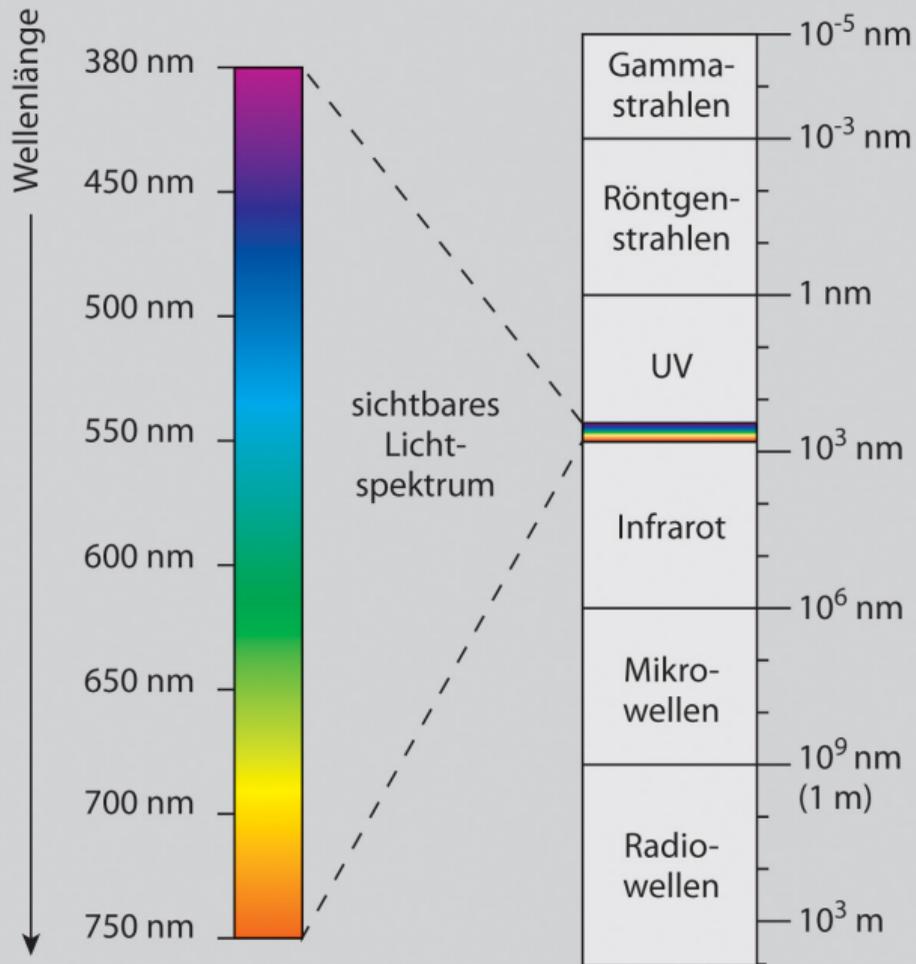


Abbildung 3.2

■ Amplitude

- Stärke einer Welle, höhere Amplitude = helleres Licht

■ Polarisation

- Horizontal/Vertikal oder Links/Rechts rotierend
- Spielt im Alltag kaum eine Rolle
 - Sonnenlicht kann in der Atmosphäre polarisiert werden
 - einige Tiere können das wahrnehmen und zur Navigation nutzen
 - Polfilter Kameras gegen Spiegelungen
 - 3D-Darstellung (Stereoskopie)
 - Ein Auge bekommt vertikal polarisiertes Licht, das andere horizontal polarisiertes (bzw. unterschiedliche zirkulare Polarisation)

Wahrnehmen

Das menschliche Auge

Rekapitulation

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur

- Komplexes Sinnesorgan
- Über die Linse wird das Licht auf die innen liegende Netzhaut projiziert
- Etwa 120 Millionen Sehzellen
 - ca. 113 Millionen Stäbchen, die nur Helligkeit wahrnehmen
 - ca. 7 Millionen Zapfen, die jeweils auf blaue, grüne, rote Farbtöne reagieren
- In der Tierwelt: Arten mit 2-4 Arten von Zapfen
- Bei Frauen tetrachromatisches Sehen möglich, allerdings nur ein Fall bekannt
- Ca. 8% der Männer, 1% der Frauen sind farbenblind
 - Verschiedene Formen
 - Meist können weniger Farben unterschieden werden
 - Häufigste Form: Rot-Grün-Schwäche

Schema

Licht

Wahrnehmen

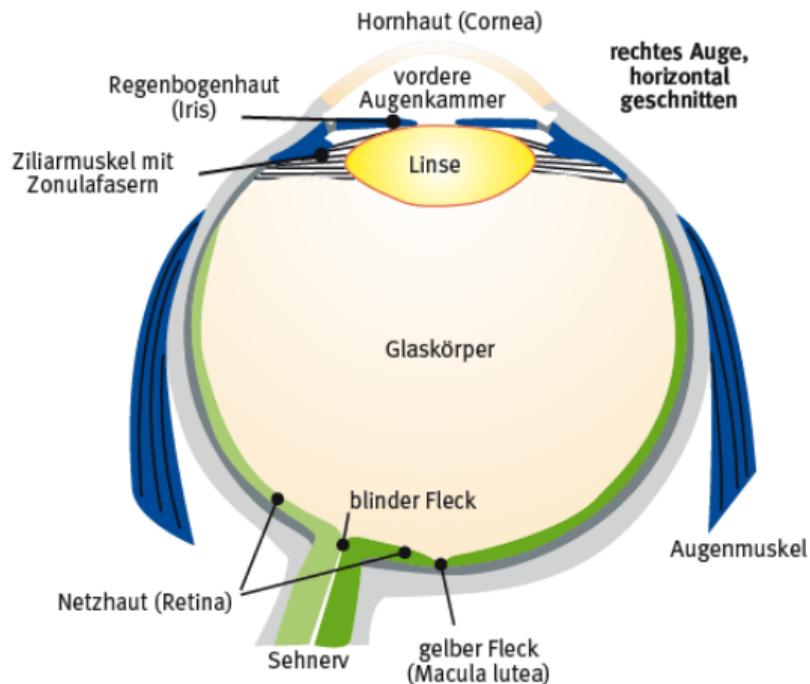
Farbräume

Digitalisierung

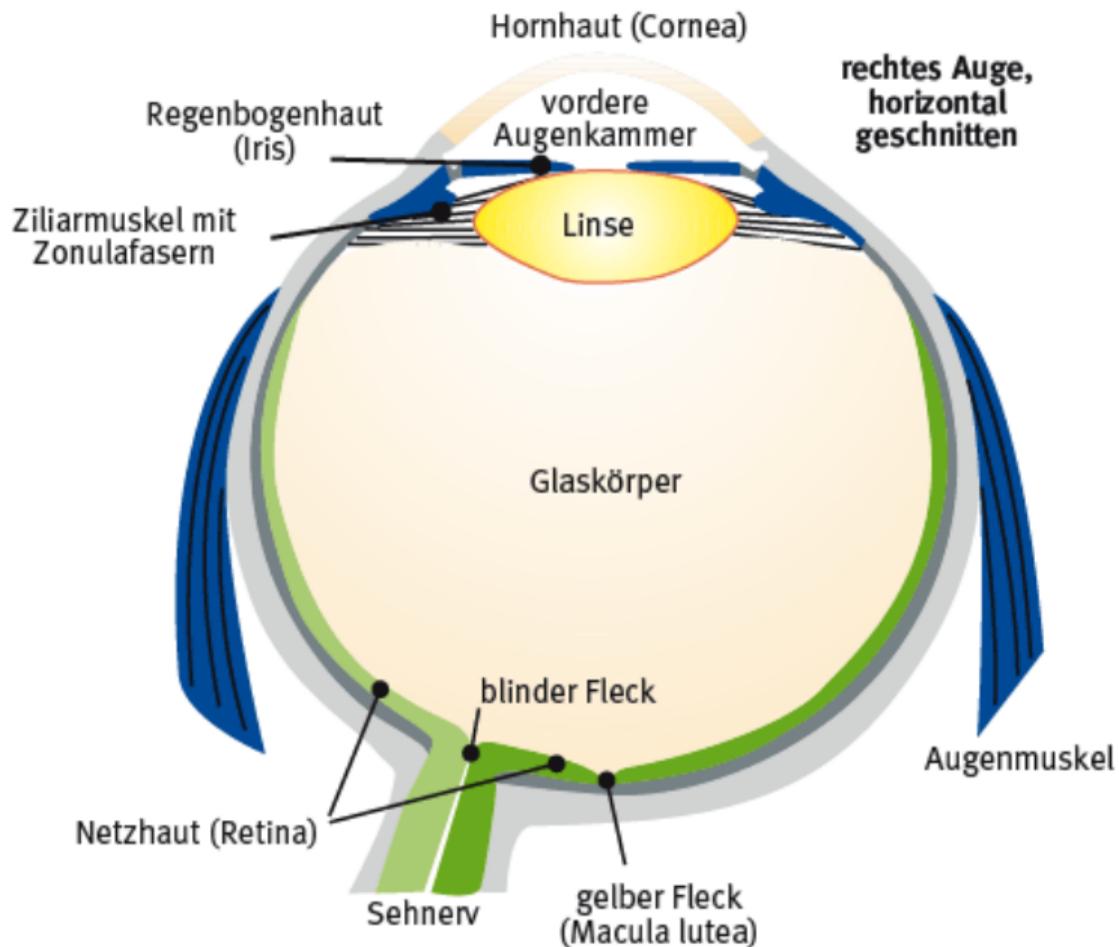
Kompression

Bearbeitung

Literatur



Bildquelle:  www.tg8.eu



Wichtige Bestandteile

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

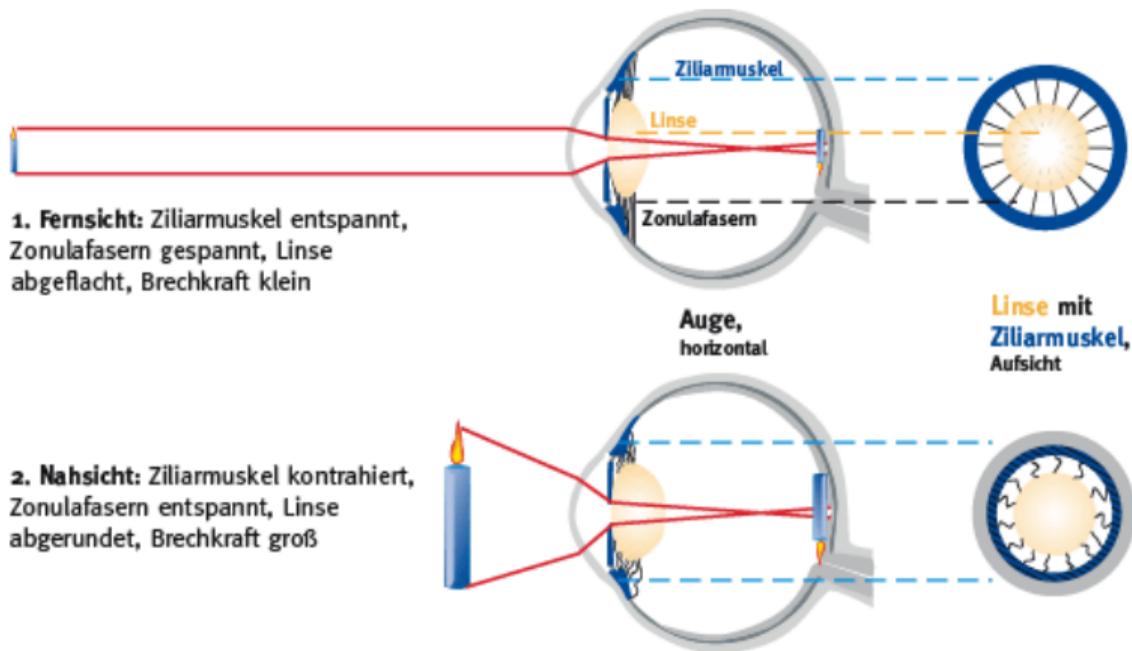
Bearbeitung

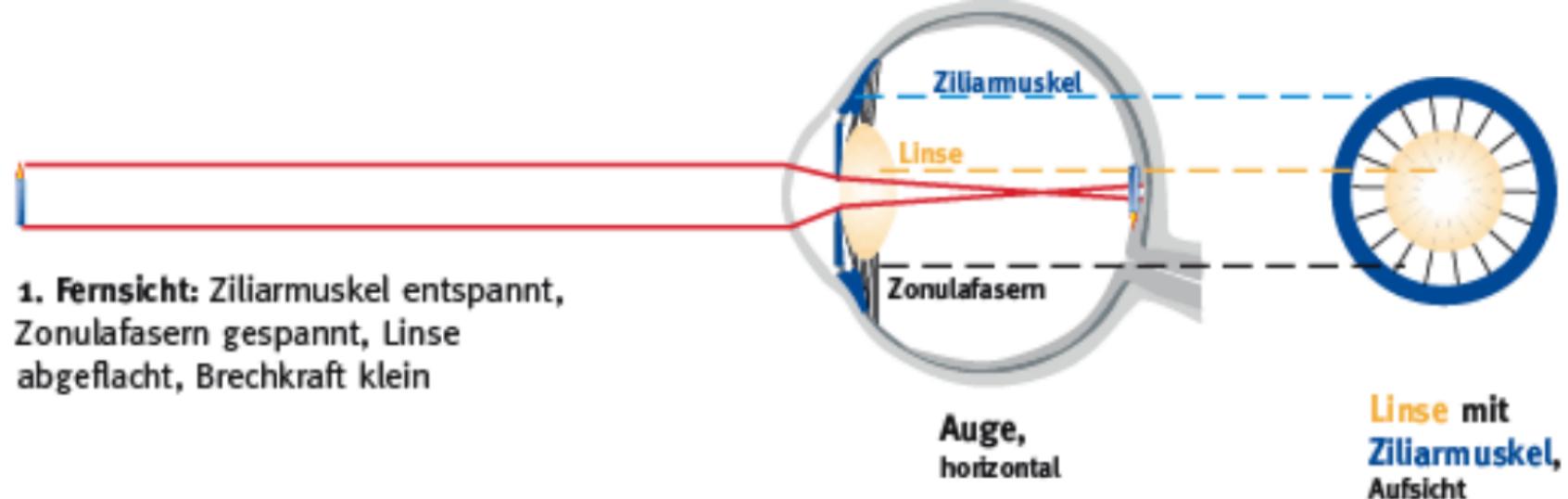
Literatur

- **Iris:** Reguliert die Menge des einfallenden Lichts
- **Linse:** Fokussiert ein kleines Abbild der Realität auf die Netzhaut
- **Netzhaut:** ist mit Lichtsinneszellen bedeckt die optische Reize (Stäbchen: Helligkeit, Zapfen: Farbe) wahrnehmen.
- **Gelber Fleck:** größte Dichte an Farbrezeptoren (17° des Sichtfeldes)
- **Fovea Centralis:** Bereich des schärfsten Sehens in der Mitte des Gelben Flecks ($1.5-2^\circ$ des Sichtfeldes)
- **Blinder Fleck:** hier verlässt der Sehnerv das Auge

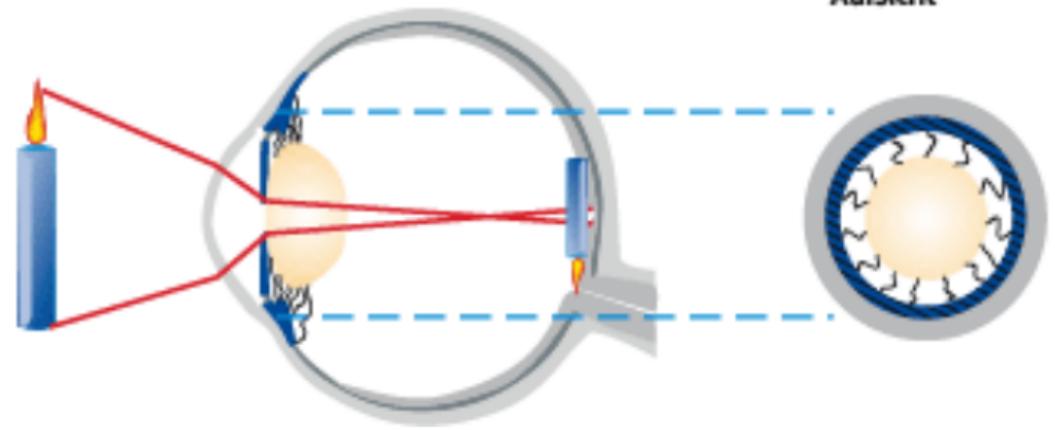
Fern- und Nahsehen

- Die Linse muß durch Muskeln abhängig von der Entfernung des Objektes eingestellt werden
- Der Prozeß heißt Akkomodation





2. Nahsicht: Ziliarmuskel kontrahiert, Zonulafasern entspannt, Linse abgerundet, Brechkraft groß



Helligkeit I

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur

- Adaptation an unterschiedliche Helligkeit sehr wichtig
 - Von Nacht zu Sonnenschein etwa Faktor 10^{10}
- Hell-Dunkel Adaptation: langsam (30-45 min)
(abgedunkelte Kabine bei Nachtlandung von Flugzeugen)
 - Physiologische Änderung der Größe der Pupille
 - Etwa 1 sec, nur etwa Faktor 16-30
 - Neuronale Umschaltung auf Stäbchen
 - Bei Tageslicht aktive Zapfen hemmen die retinale Weiterverarbeitung der empfindlicheren Stäbchen
 - Vergrößerung der rezeptiven Felder der Ganglienzellen
 - Reduktion der Auflösung durch Verschaltung von Zellen
 - "Nachts sind alle Katzen grau"
 - Chemische Änderungen in den Sehzellen
 - Verstärkte Produktion von Sehpigmenten (photosensitiven Substanzen in den Sehzellen)

- Nach etwa 2 Stunden ist die Empfindlichkeitsschwelle der Stäbchen etwa 15.000-mal geringer als die der Zapfen (1 Photon/500 sec gegenüber 3 Photonen /sec)
- Dunkel-Hell Adaptation: wesentlich schneller
 - Physiologisch: Pupille verkleinert sich
 - Zusammenkneifen der Augen
 - Neuronal: Aktive Zapfen übernehmen von Stäbchen
 - Chemisch: Reduktion der Sehpigmente
 - Änderung der Produktion der Pigmente
 - Änderungen in der Zellmembrane verringern die Empfindlichkeit

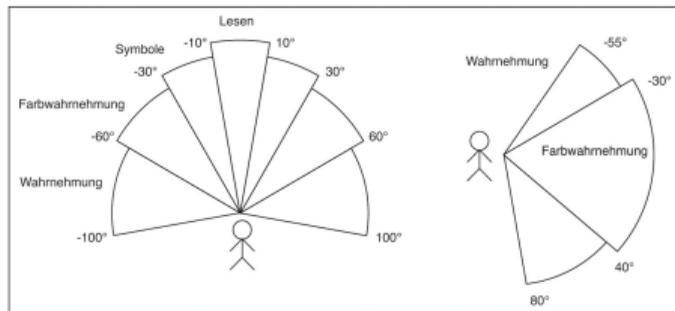


Abbildung 1.1: Sehfeld beim Menschen. Links horizontal, rechts vertikal (nach Herzeg, 1994)

- Höchste Auflösung in der Mitte des Sehfeldes (ca 2 Grad)
 - Etwa 1 Bogenminute (1/60 Grad)
 - Ein Objekt von 3 mm Größe in ca 10 m Entfernung
- Dort finden sich viele Zapfen, aber kaum Stäbchen
- Nachts sind wir im Zentrum des Sehfeldes faktisch blind
- In der Peripherie ist das Sehen stark eingeschränkt, bis 40 Grad Augenbewegung, sonst Kopf drehen

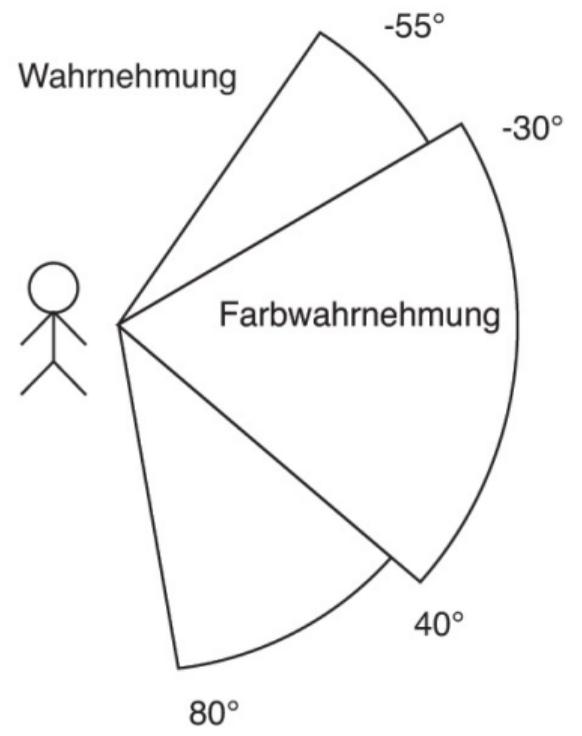
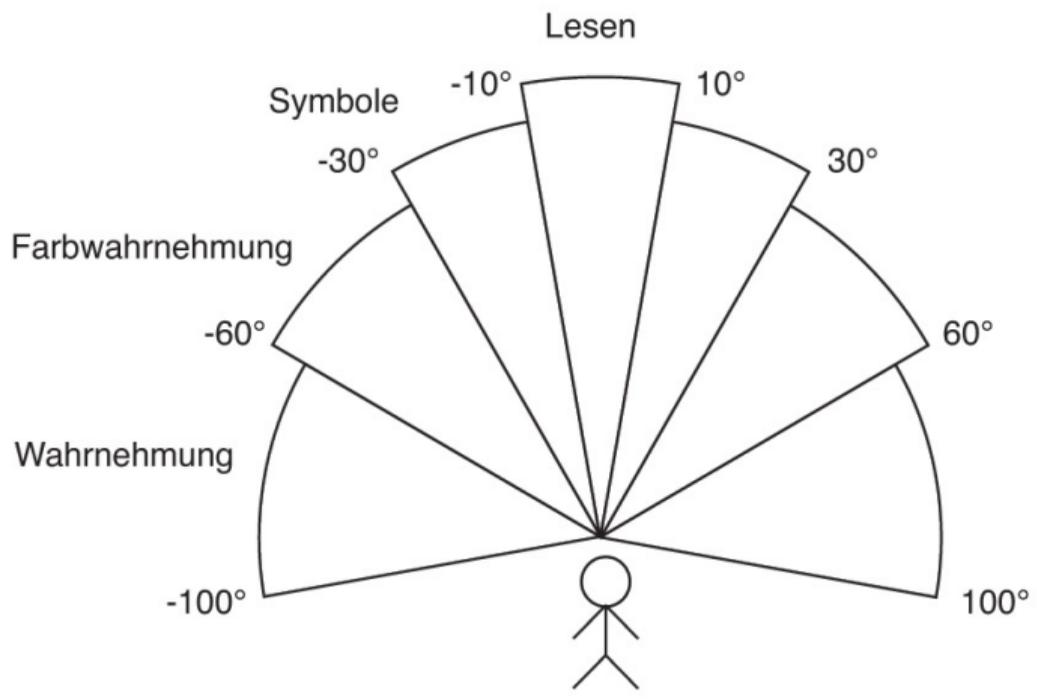


Abbildung 1.1: Sehfeld beim Menschen. Links horizontal, rechts vertikal (nach Herczeg, 1994)

Verteilung Zapfen & Stäbchen

Licht

Wahrnehmen

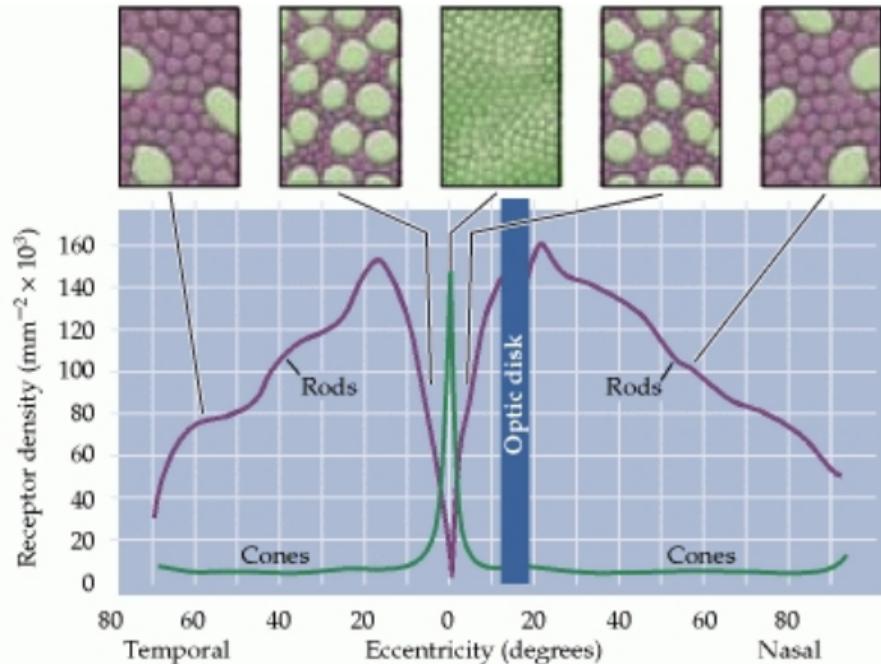
Farbräume

Digitalisierung

Kompression

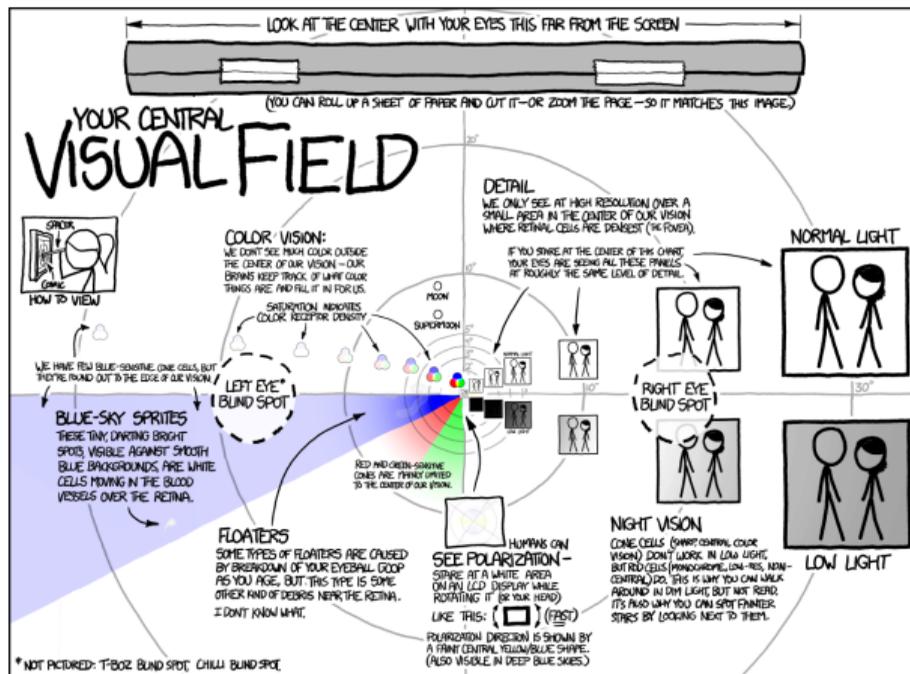
Bearbeitung

Literatur



Purves et al. [2001]

Gesichtsfeld (contd.)



↳ xkcd 1080: Visual Field

LOOK AT THE CENTER WITH YOUR EYES THIS FAR FROM THE SCREEN



(YOU CAN ROLL UP A SHEET OF PAPER AND CUT IT—OR ZOOM THE PAGE—SO IT MATCHES THIS IMAGE.)

YOUR CENTRAL VISUAL FIELD



HOW TO VIEW

COLOR VISION:

WE DON'T SEE MUCH COLOR OUTSIDE THE CENTER OF OUR VISION—OUR BRAINS KEEP TRACK OF WHAT COLOR THINGS ARE AND FILL IT IN FOR US.

SATURATION INDICATES COLOR RECEPTOR DENSITY.

WE HAVE FEW BLUE-SENSITIVE CONE CELLS, BUT THEY'RE FOUND OUT TO THE EDGE OF OUR VISION.

BLUE-SKY SPRITES

THESE TINY, DARTING BRIGHT SPOTS, VISIBLE AGAINST SMOOTH BLUE BACKGROUNDS, ARE WHITE CELLS MOVING IN THE BLOOD VESSELS OVER THE RETINA.

FLOATERS

SOME TYPES OF FLOATERS ARE CAUSED BY BREAKDOWN OF YOUR EYEBALL GOOP AS YOU AGE, BUT THIS TYPE IS SOME OTHER KIND OF DEBRIS NEAR THE RETINA. I DON'T KNOW WHAT.

RED AND GREEN-SENSITIVE CONES ARE MAINLY LIMITED TO THE CENTER OF OUR VISION.

DETAIL

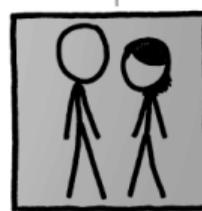
WE ONLY SEE AT HIGH RESOLUTION OVER A SMALL AREA IN THE CENTER OF OUR VISION WHERE RETINAL CELLS ARE DENSEST (THE FOVEA).

IF YOU STARE AT THE CENTER OF THIS CHART, YOUR EYES ARE SEEING ALL THESE PANELS AT ROUGHLY THE SAME LEVEL OF DETAIL.

NORMAL LIGHT



RIGHT EYE BLIND SPOT



LOW LIGHT

NIGHT VISION

CONE CELLS (SHARP, CENTRAL COLOR VISION) DON'T WORK IN LOW LIGHT, BUT ROD CELLS (MONOCHROME, LOW-RES, NON-CENTRAL) DO. THIS IS WHY YOU CAN WALK AROUND IN DIM LIGHT, BUT NOT READ. IT'S ALSO WHY YOU CAN SPOT FAINTER STARS BY LOOKING NEXT TO THEM.

HUMANS CAN SEE POLARIZATION—

STARE AT A WHITE AREA ON AN LCD DISPLAY WHILE ROTATING IT (OR YOUR HEAD) LIKE THIS: (□) (FAST)

POLARIZATION DIRECTION IS SHOWN BY A FAINT CENTRAL YELLOW/BLUE SHAPE. (ALSO VISIBLE IN DEEP BLUE SKIES.)

* NOT PICTURED: T-BOZ BLIND SPOT, CHILLI BLIND SPOT

- Texte, die wir lesen, oder Objekte, die wir betrachten, liegen häufig außerhalb der 2 Grad scharfen Sehens
- Augenbewegungen bringen den schärfsten Punkt dahin, wo die Aufmerksamkeit liegt
- Ruckartige Bewegungen (Sakkaden)
 - Sprung von 50 ms zum neuen Fixationspunkt
 - Ruhe für 250 ms bis 2 s
 - Unbewußt, wir denken, daß es fließend geschieht

- Visuelle Reize werden ab einer Dauer von 15 bis 50 ms wahrgenommen
- Sobald genug Einzelbilder nacheinander erscheinen, nehmen wir sie als Bewegung wahr
- Flimmern kann auftreten bei unter 20 bis 70 Hz
- Fließende Bewegung: 20 bis 25 Bilder pro Sekunde
 - Aber: schon ab 3 bis 5 Bildern pro Sekunde werden Bewegungen wahrgenommen
- Interpretation der Reize des Auges aufwendige kognitive Leistung

Wissensbasiertes Sehen

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

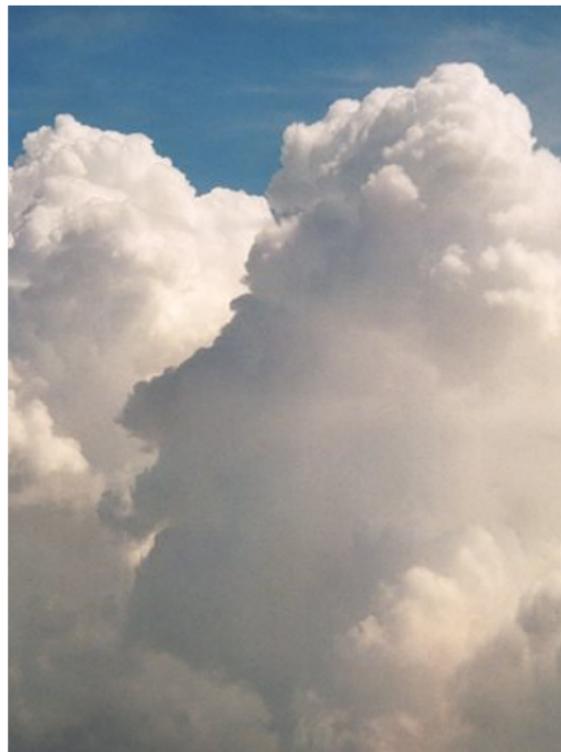
Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur

- Vertraute Konturen, wichtige Dinge besser erkennen
- Menschen, Gesichter
- Daher sehen wir teilweise Gesichter, wo keine sind



- Zum einen stereoskopisch
- Unterschiedliche Bilder des rechten und linken Auges
- Verschiebungen geben Rückschlüsse auf die Tiefe
- Zum anderen: Wissensbasierte Verarbeitung
 - Verdeckungen
 - Schatten
 - Graduelle Unterschiede in der Textur
 - Wissen z.B. über die Größe von Objekten

Täuschung

- "Optische Täuschungen" sind weniger ein Beispiel für Fehler als für neuronale Verschaltung und deren Effektivität und Effizienz

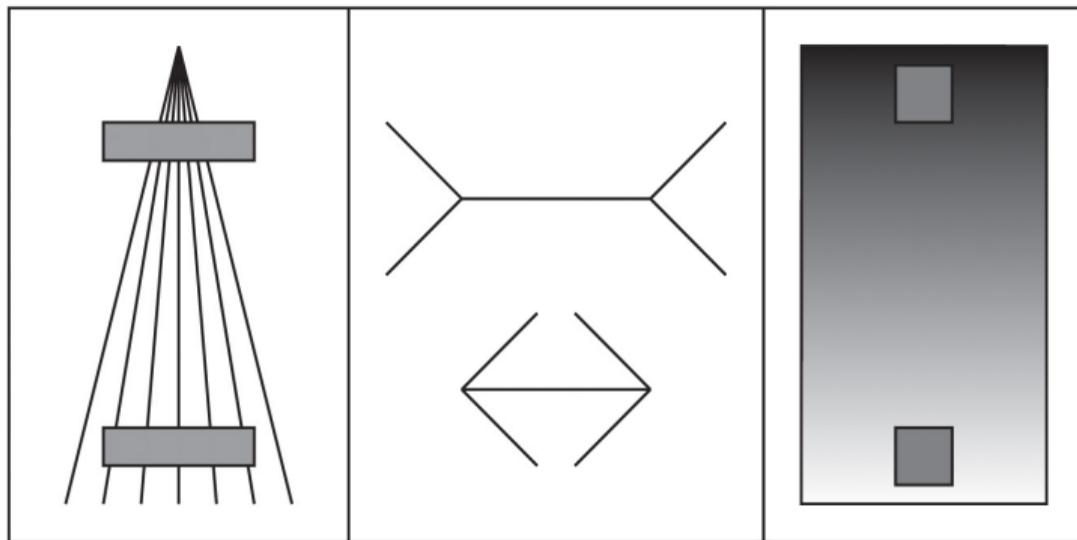
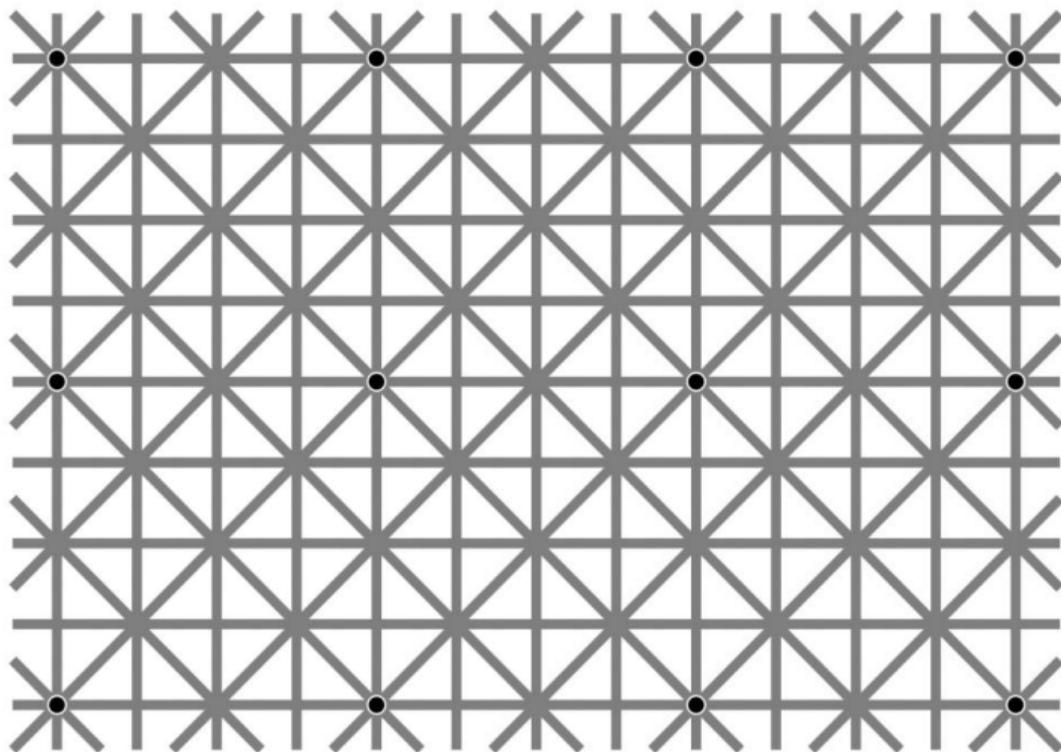
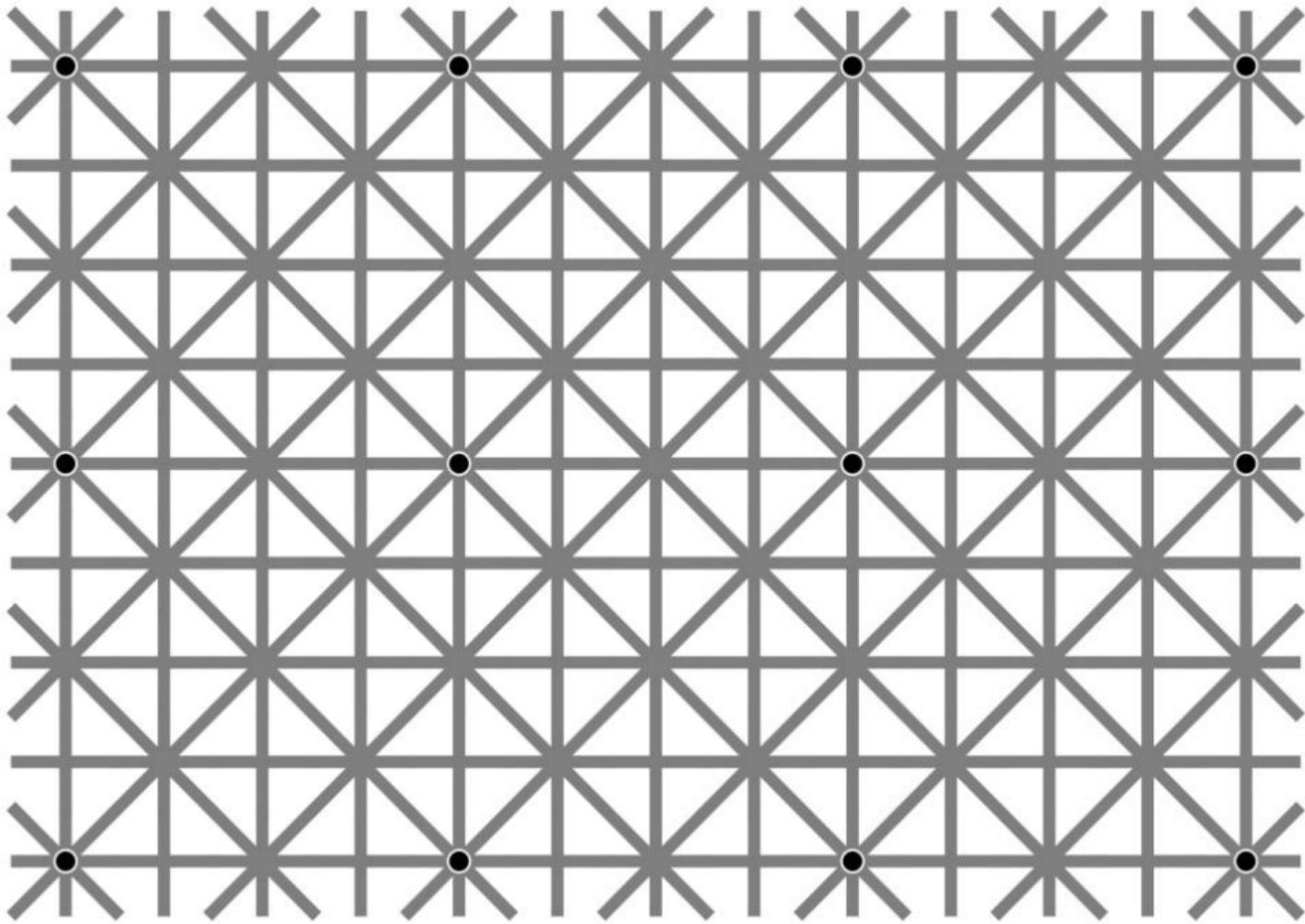


Abbildung 1.4: Optische Täuschungen. Links: Bei der Ponzo-Illusion scheint der obere Balken größer als der untere, beide sind aber gleich groß. Mitte: Müller-Lyer-Illusion: Auch hier scheint die obere waagerechte Linie größer. Rechts: Abhängig von der umgebenen Helligkeit scheint das graue Quadrat einmal heller und einmal dunkler zu sein.

Extinction Grid



Ninio and Stevens [2000]



- Viele Eigenheiten entstehen durch Art und Weise der Wahrnehmung
- Nervenzellen in den Augen wandeln Lichtwellen in neuronale Aktivitäten
- Rekapitulation: Netzhaut
- Stäbchen (Helligkeit), drei Arten von Zapfen (Farben)
- Rot/Grün Wahrnehmung recht ähnlich

Empfindlichkeit Rezeptoren I

- Licht
- Wahrnehmen
- Farbräume
- Digitalisierung
- Kompression
- Bearbeitung
- Literatur

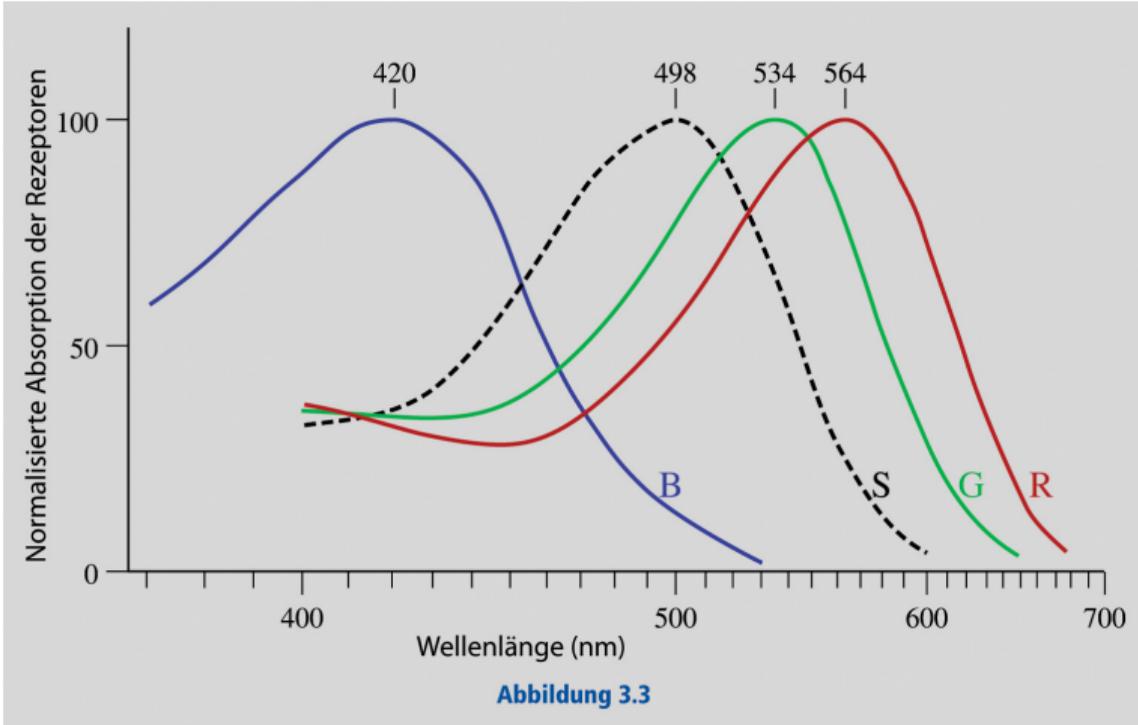


Abbildung 3.3

Achtung, normalisierte Werte

Empfindlichkeit Rezeptoren II

Licht

Wahrnehmen

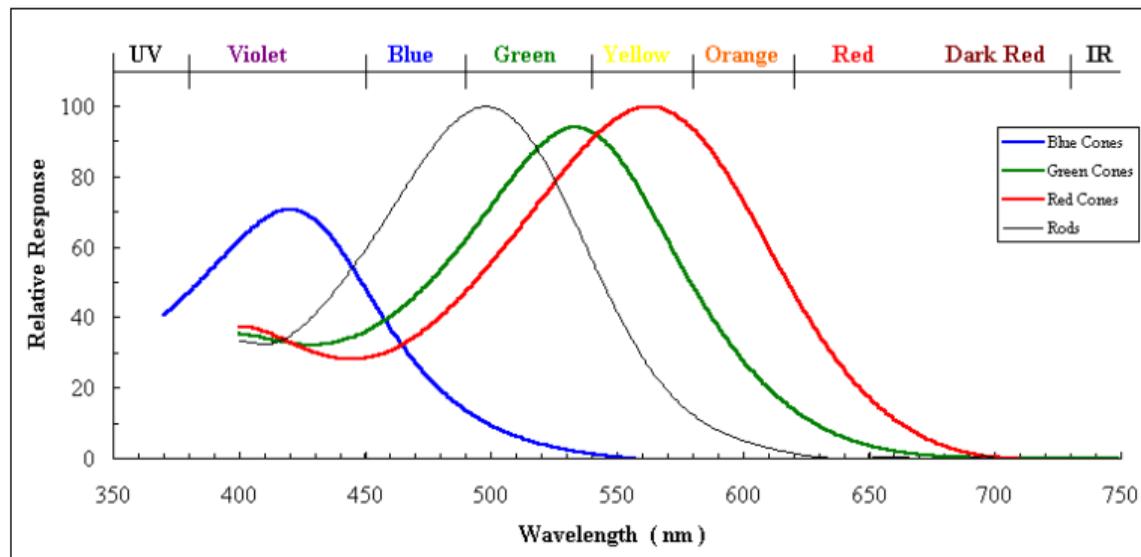
Farbräume

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur



www.unm.edu/~toolson/human_cone_response.htm

Auflösung nach der Frequenz

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

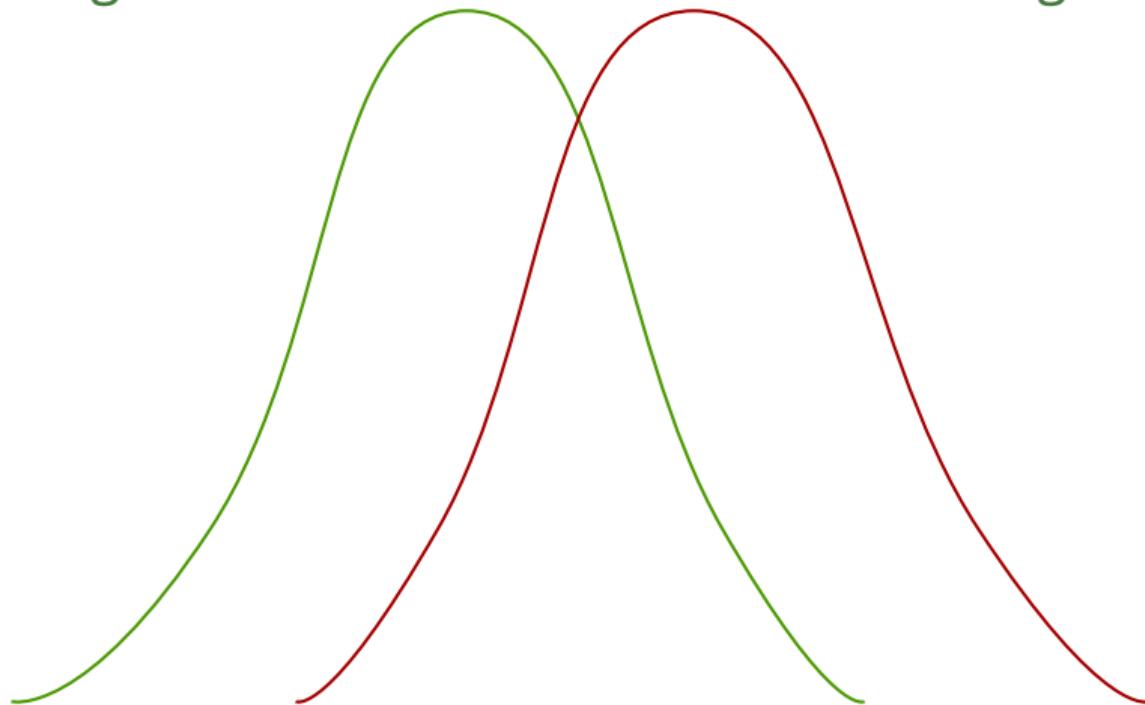
Kompression

Bearbeitung

Literatur

- Können wir also alle möglichen Wellenlängen unterscheiden?
- Nein, Wahrnehmung von Farben dramatisch reduziert
- Farben entstehen im Kopf, nicht in den Augen
- Problem: Überlagerung von Wellen
- Überlagerung schafft komplexes Signal mit den Ausgangsfrequenzen präsent
- Töne nehmen wir in ihrer Komplexheit wahr (Akkorde)
 - In der Fourier-Transformierten Anteile auch sichtbar
- Farben werden über die Sinneszellen integriert

Integration über verschiedene Wellenlängen



Licht

Wahrnehmen

Farbräume

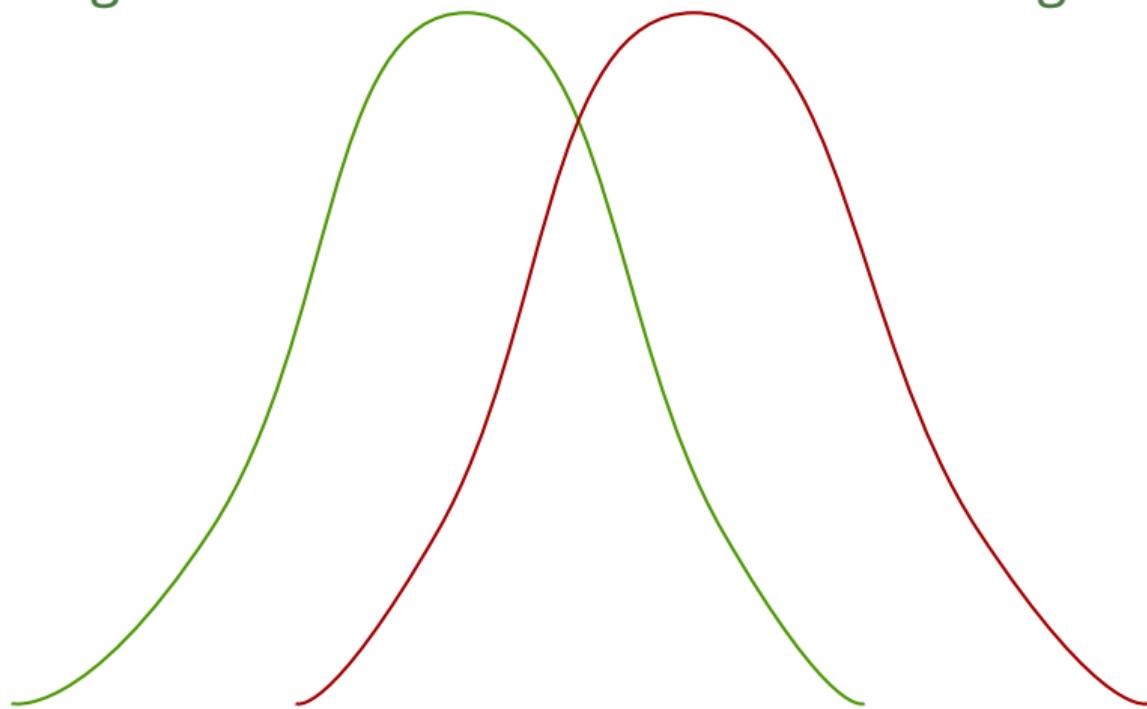
Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

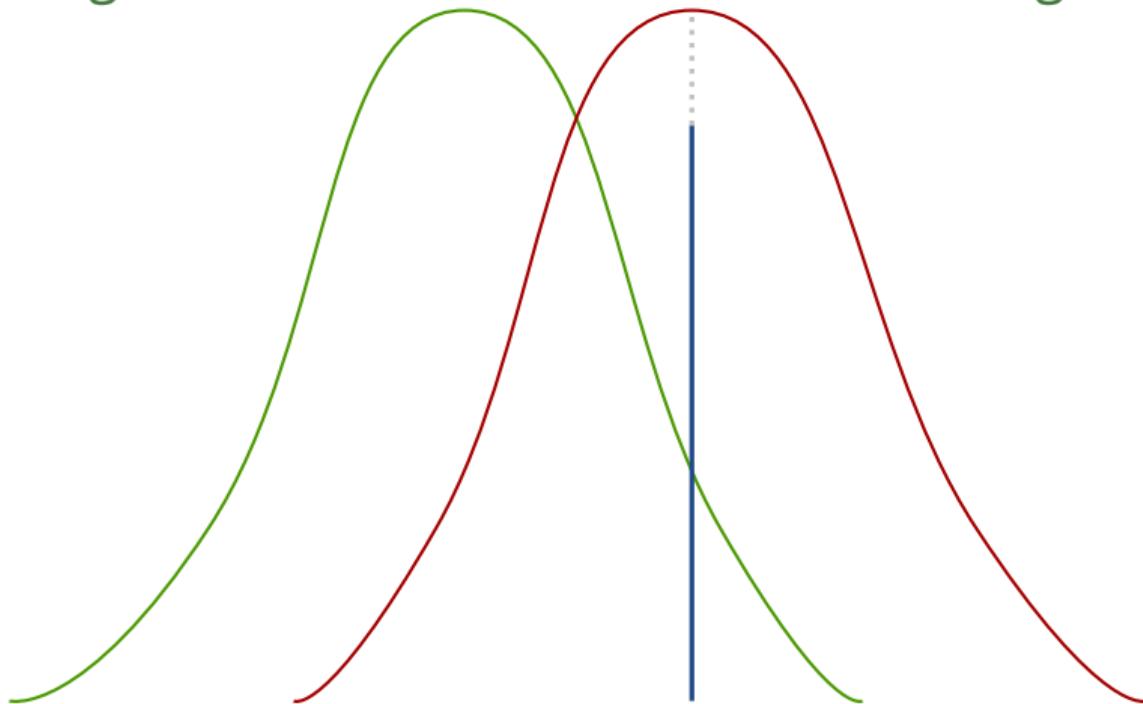
Literatur

Integration über verschiedene Wellenlängen



Erregungspotential der Sehzellen: $P_c(x) = I(x)S_c(F(x))$

Integration über verschiedene Wellenlängen



Licht

Wahrnehmen

Farbräume

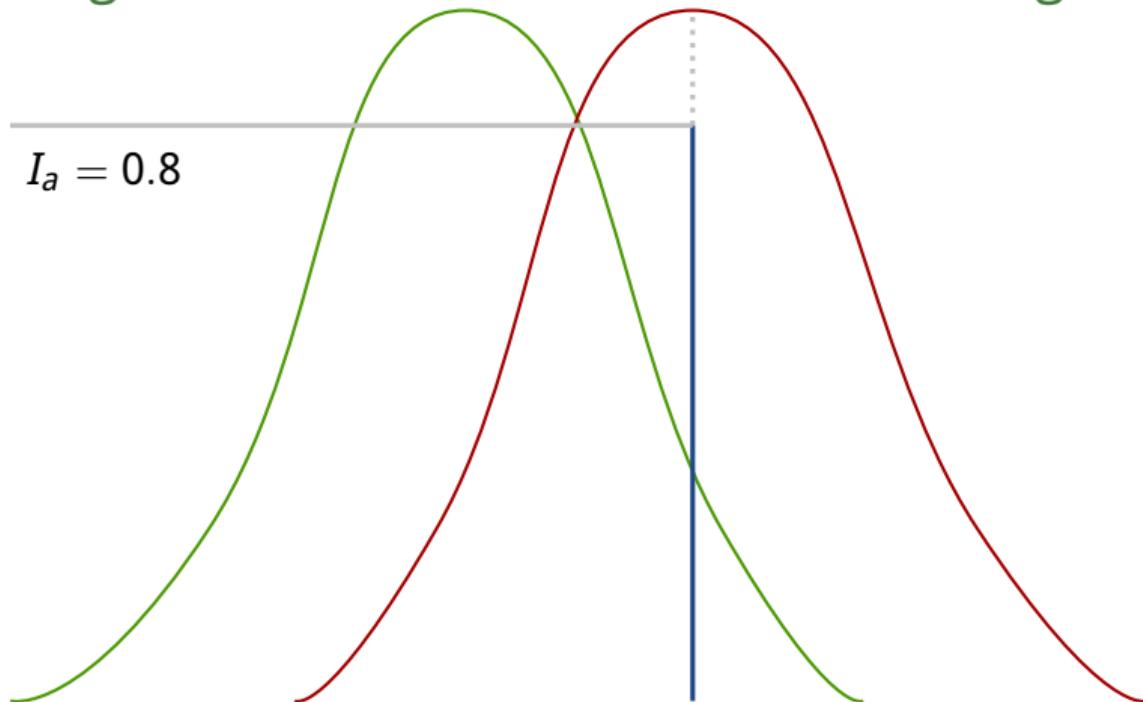
Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur

Integration über verschiedene Wellenlängen



Licht

Wahrnehmen

Farbräume

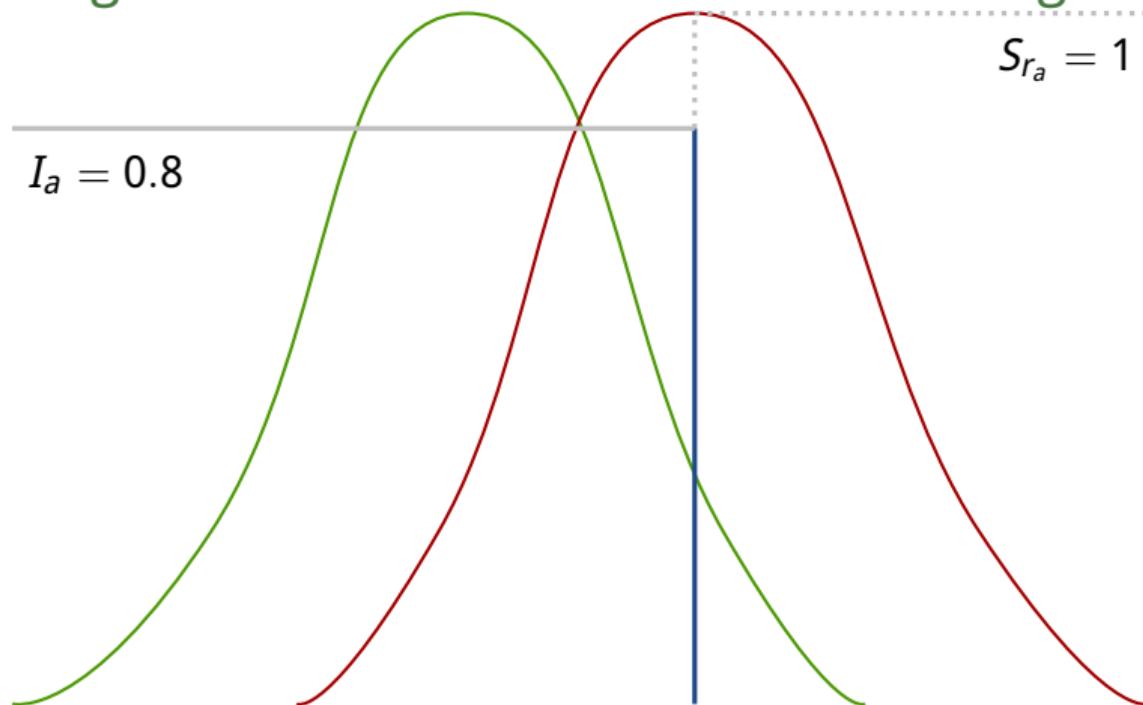
Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

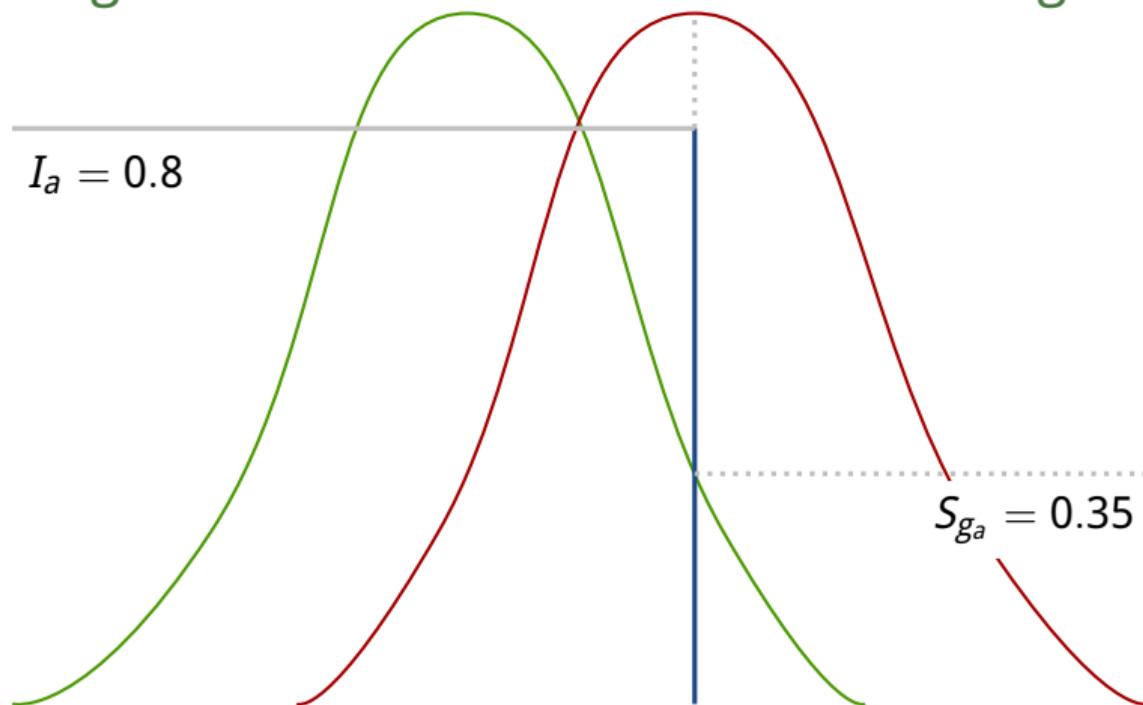
Literatur

Integration über verschiedene Wellenlängen



$P_r(a) = 0.8,$

Integration über verschiedene Wellenlängen



$$P_r(a) = 0.8,$$

$$P_g(a) = 0.28,$$

Integration über verschiedene Wellenlängen

Licht

Wahrnehmen

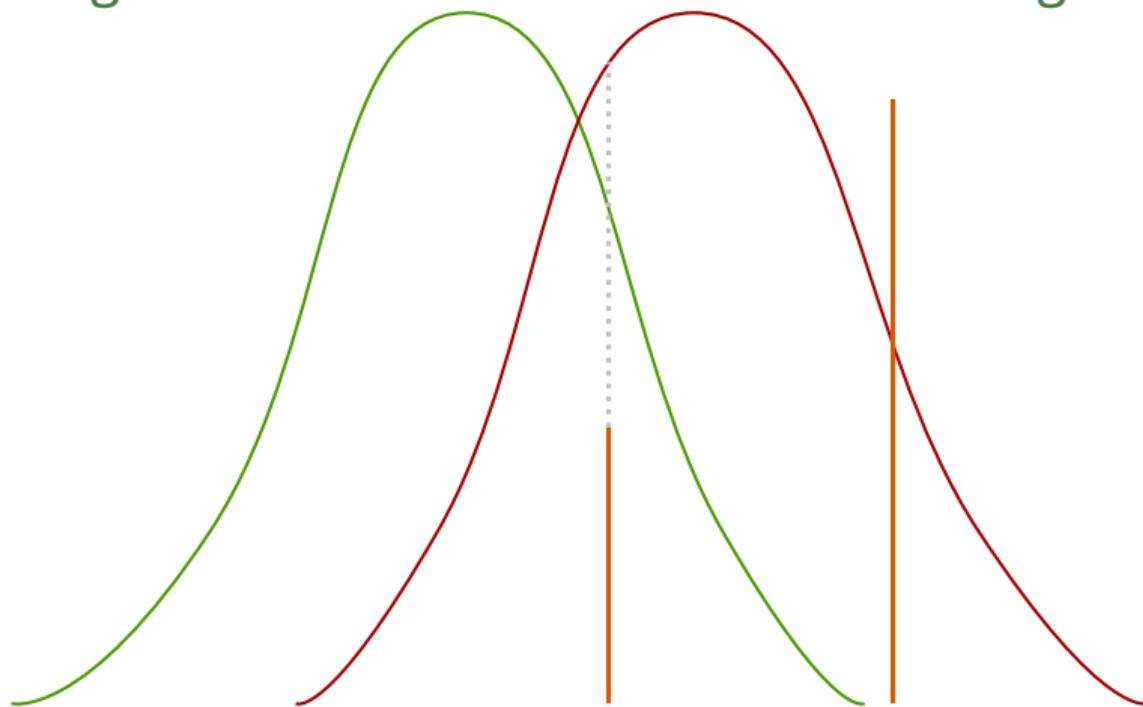
Farbräume

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

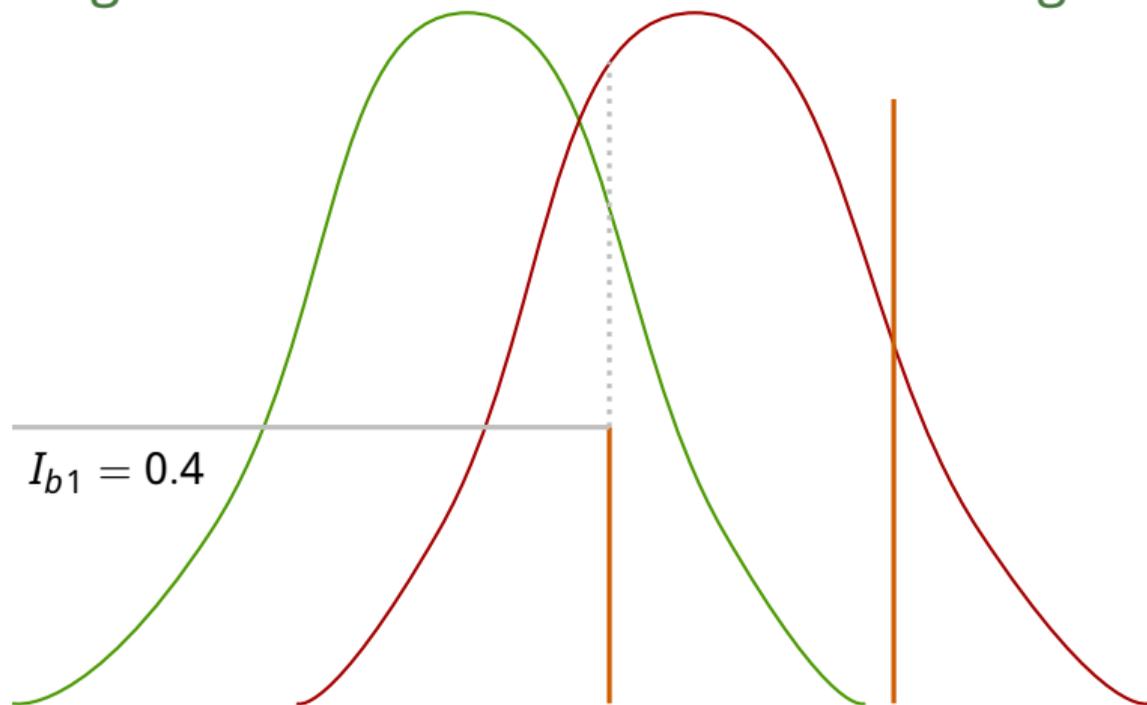
Literatur



$$P_r(a)=0.8,$$

$$P_g(a)=0.28,$$

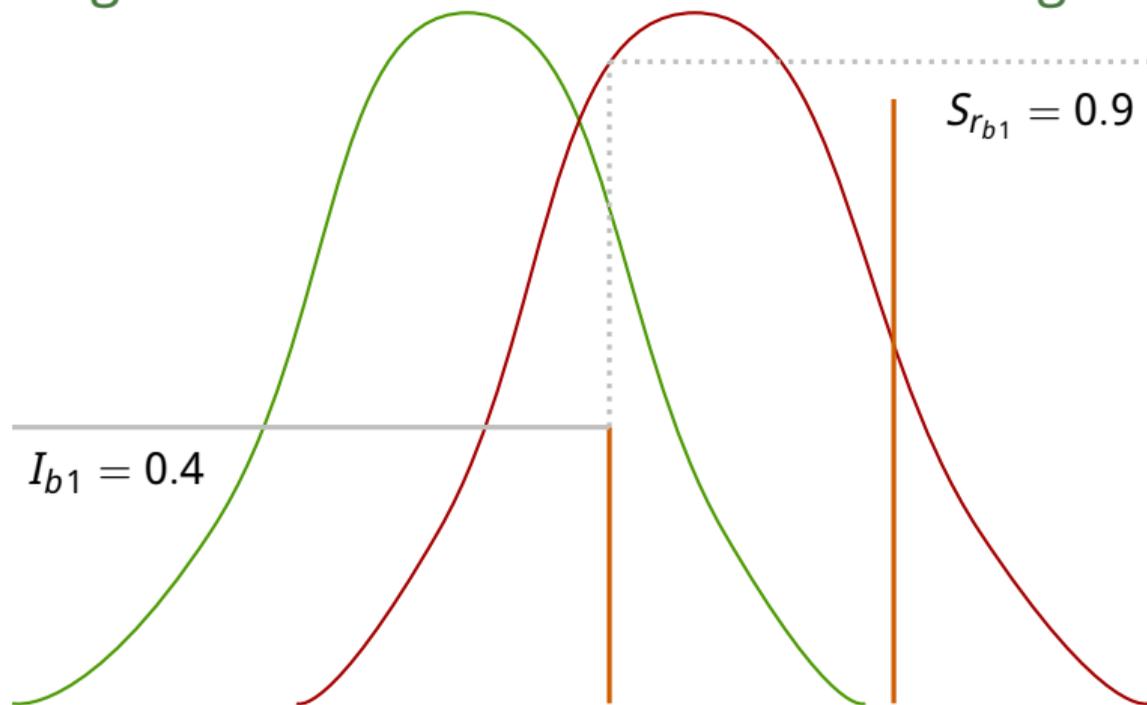
Integration über verschiedene Wellenlängen



$$P_r(a) = 0.8,$$

$$P_g(a) = 0.28,$$

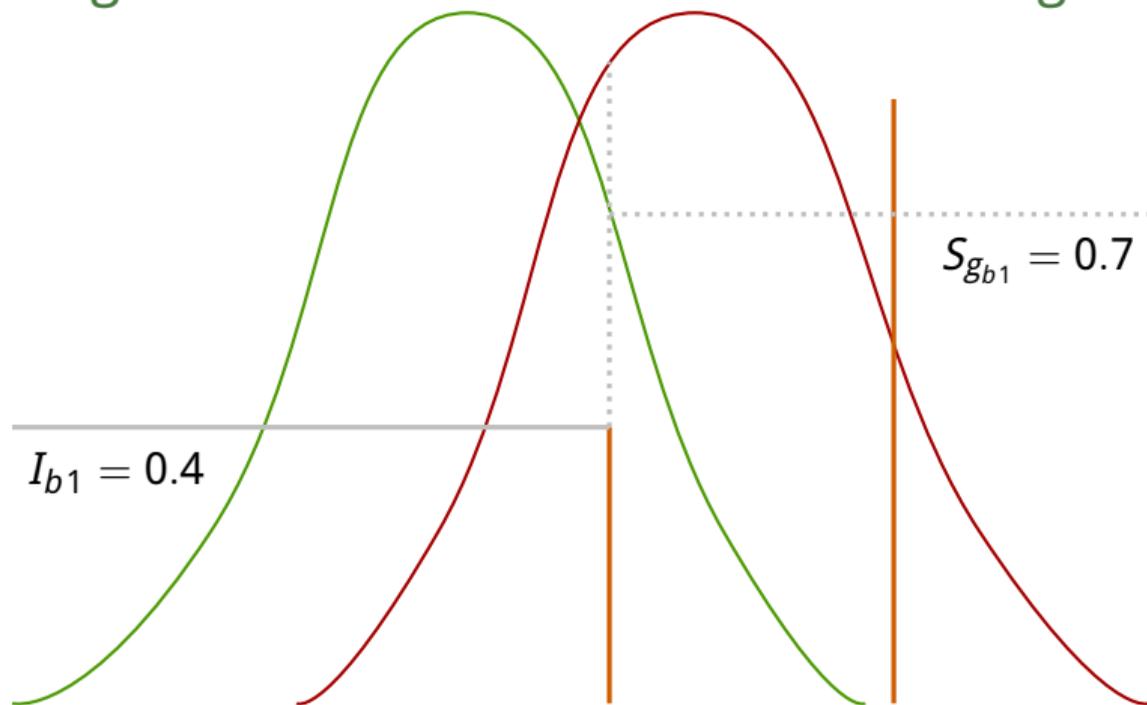
Integration über verschiedene Wellenlängen



$$P_r(a) = 0.8, \quad P_r(b) = 0.36 +$$

$$P_g(a) = 0.28,$$

Integration über verschiedene Wellenlängen

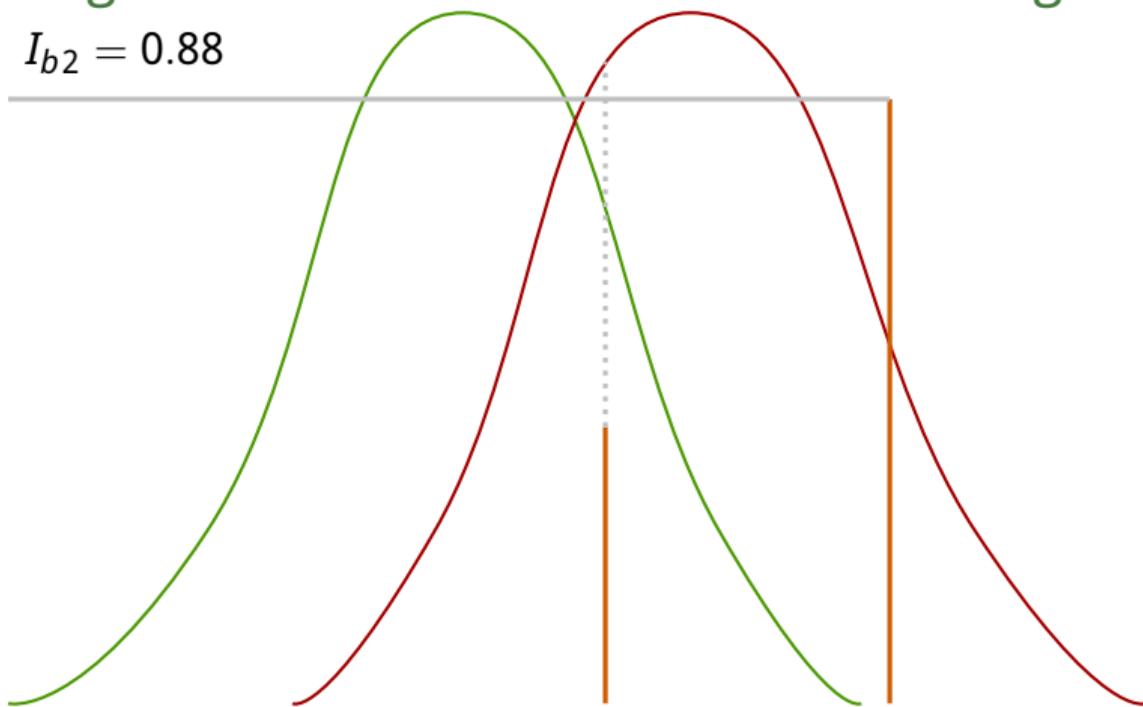


$$P_r(a)=0.8, \quad P_r(b)=0.36+$$

$$P_g(a)=0.28, \quad P_g(b)=0.28+$$

Integration über verschiedene Wellenlängen

$$I_{b2} = 0.88$$

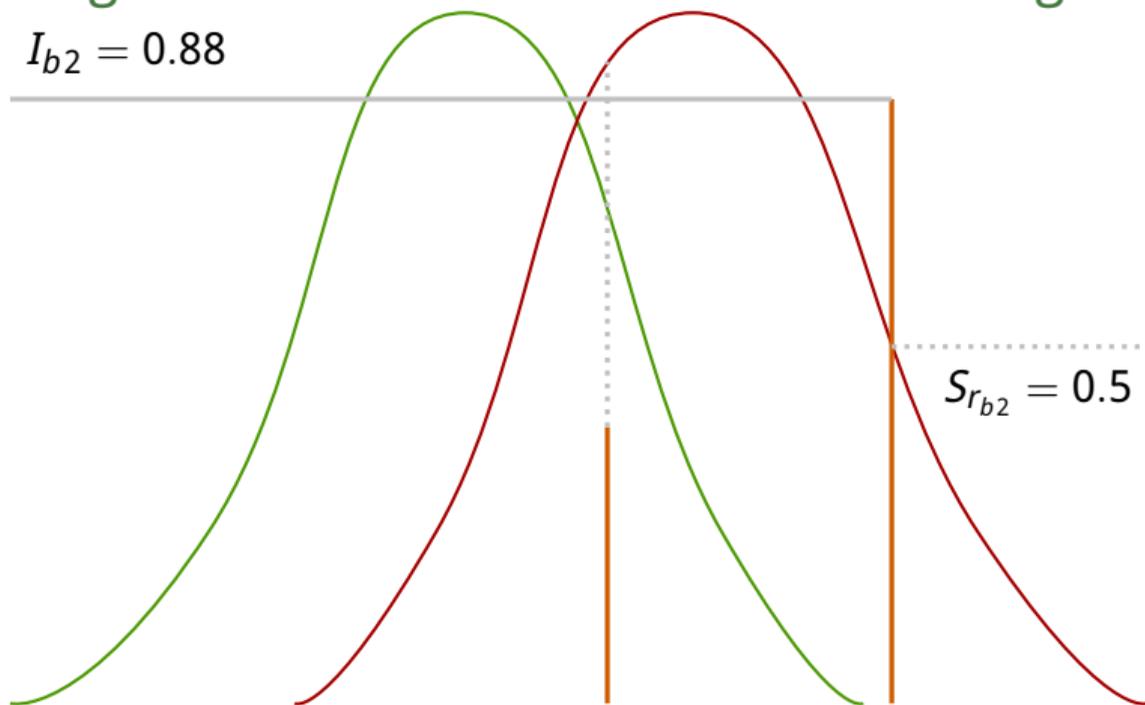


$$P_r(a) = 0.8, \quad P_r(b) = 0.36+$$

$$P_g(a) = 0.28, \quad P_g(b) = 0.28+$$

Integration über verschiedene Wellenlängen

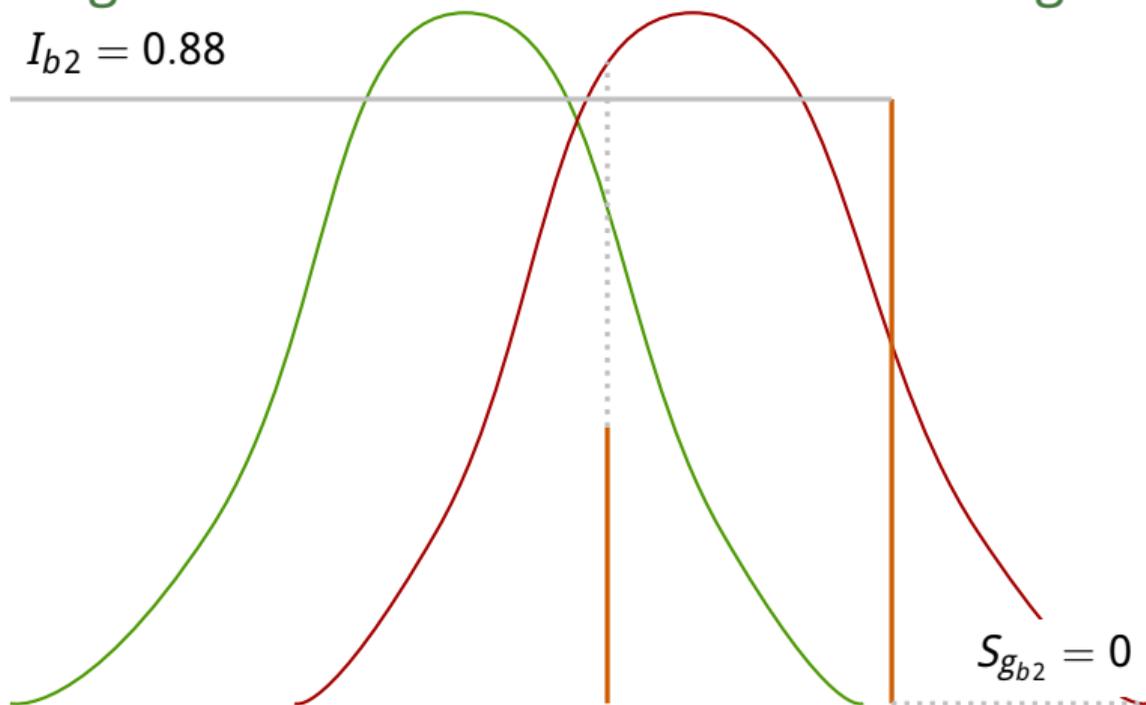
$$I_{b2} = 0.88$$



$$P_r(a)=0.8, \quad P_r(b)=0.36+0.44, \quad P_g(a)=0.28, \quad P_g(b)=0.28+$$

Integration über verschiedene Wellenlängen

$$I_{b2} = 0.88$$



$$P_r(a)=0.8, \quad P_r(b)=0.36+0.44, \quad P_g(a)=0.28, \quad P_g(b)=0.28+0$$

Integration über verschiedene Wellenlängen

Licht

Wahrnehmen

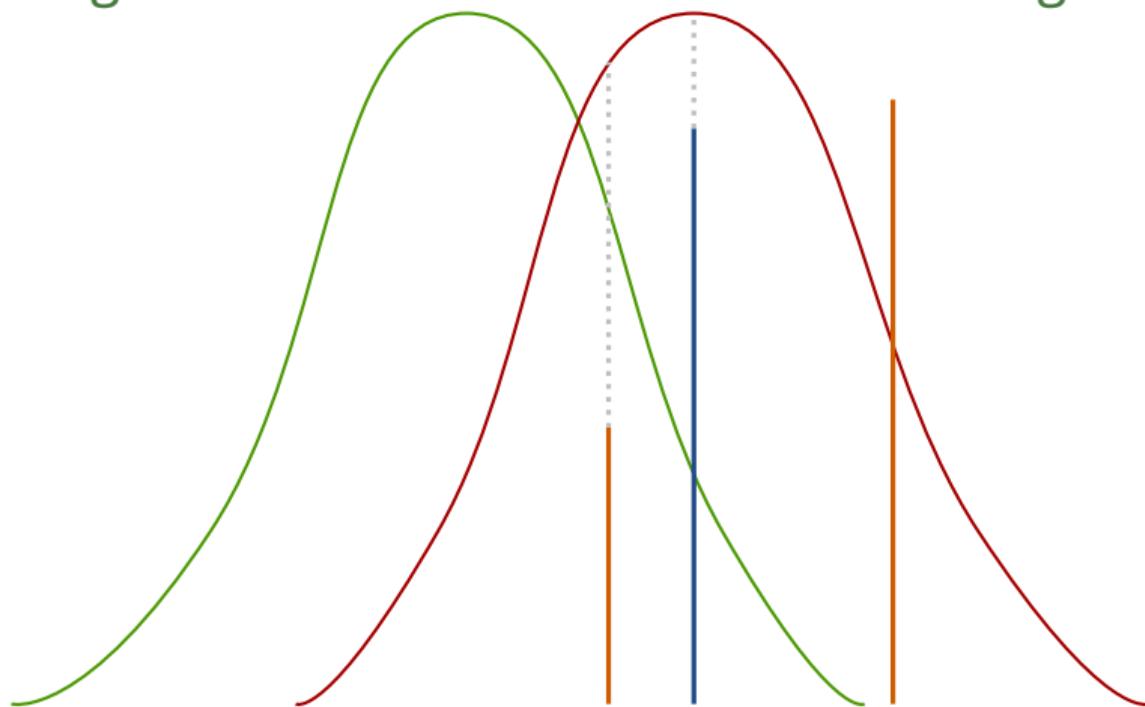
Farbräume

Digitalisierung

Kompression

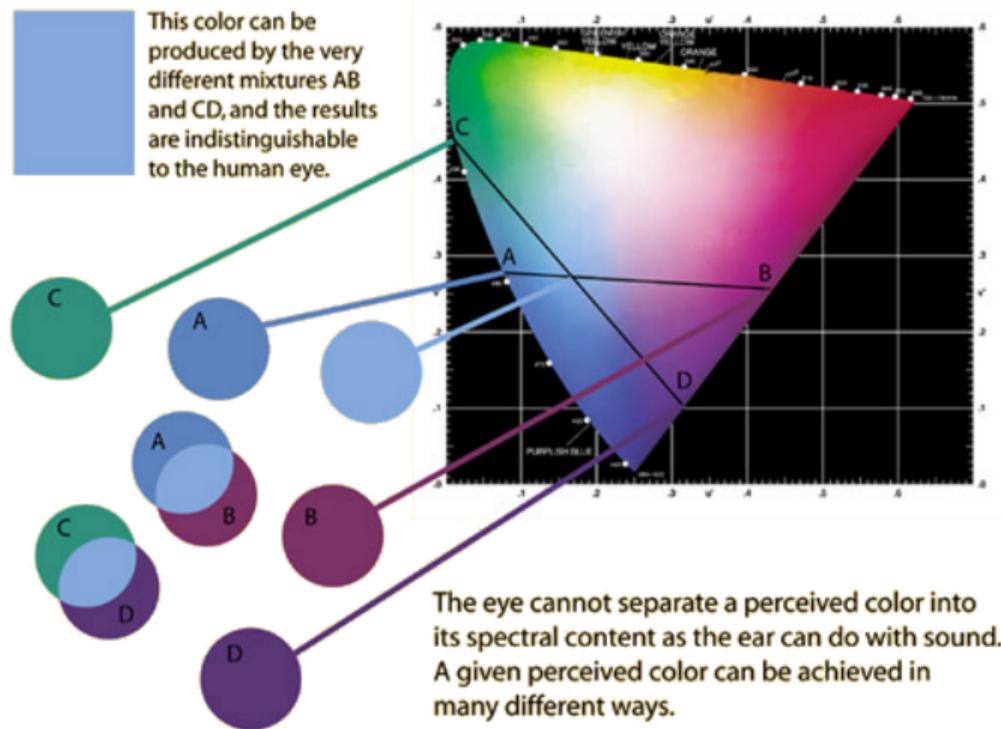
Bearbeitung

Literatur



$$P_r(a)=0.8, \quad P_r(b)=0.36+0.44, \quad P_g(a)=0.28, \quad P_g(b)=0.28+0$$

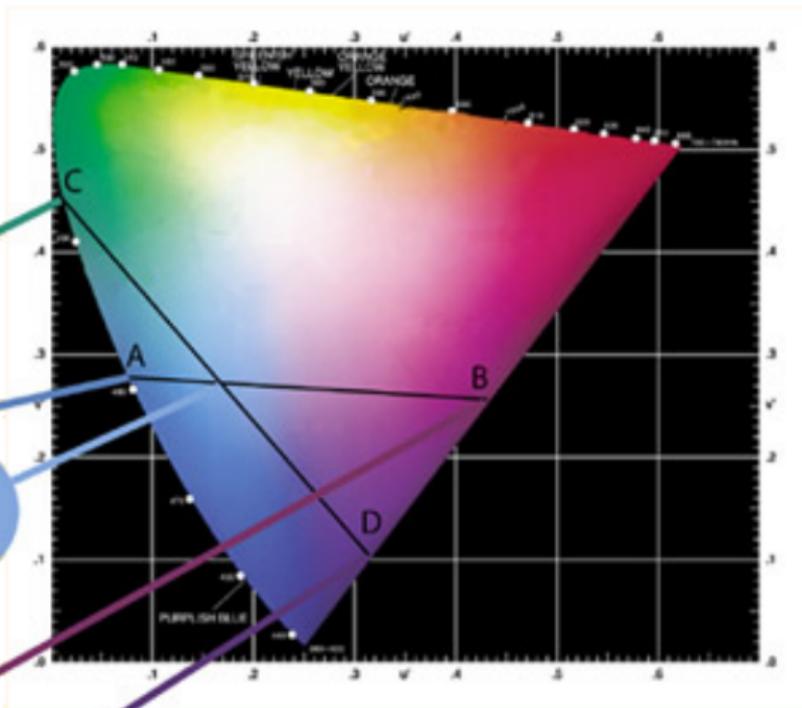
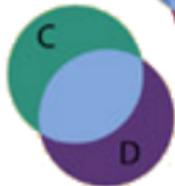
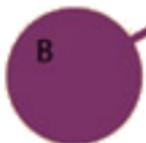
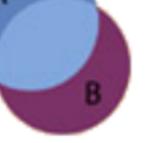
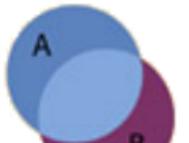
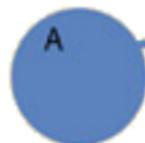
Erzeugung von Farbeindrücken



🔗 hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/colper.html



This color can be produced by the very different mixtures AB and CD, and the results are indistinguishable to the human eye.



The eye cannot separate a perceived color into its spectral content as the ear can do with sound. A given perceived color can be achieved in many different ways.

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

RGB/CMY(K)

Andere

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur

Farbräume

CIE und die drei Grundfarben

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

RGB/CMY(K)

Andere

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur

- Kann "jeder" Farbeindruck aus maximal drei Grundfarben erzeugt werden?
- Allgemeiner: Welche Farben kann der Mensch standardisiert sehen?
- Eine der Fragen der CIE
 - Commission internationale de l'éclairage (Internationale Beleuchtungskommission)
- Internationale, nichtstaatliche Non-Profit-Organisation
- Unter anderem: CIE-Normfarbsystem der wahrnehmbaren Farben

CIE Farbraum

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

RGB/CMY(K)

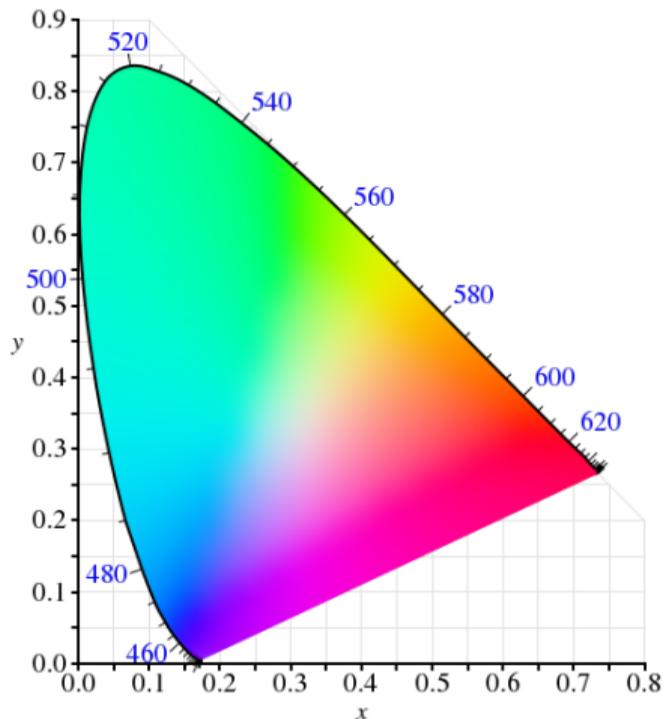
Andere

Digitalisierung

Kompression

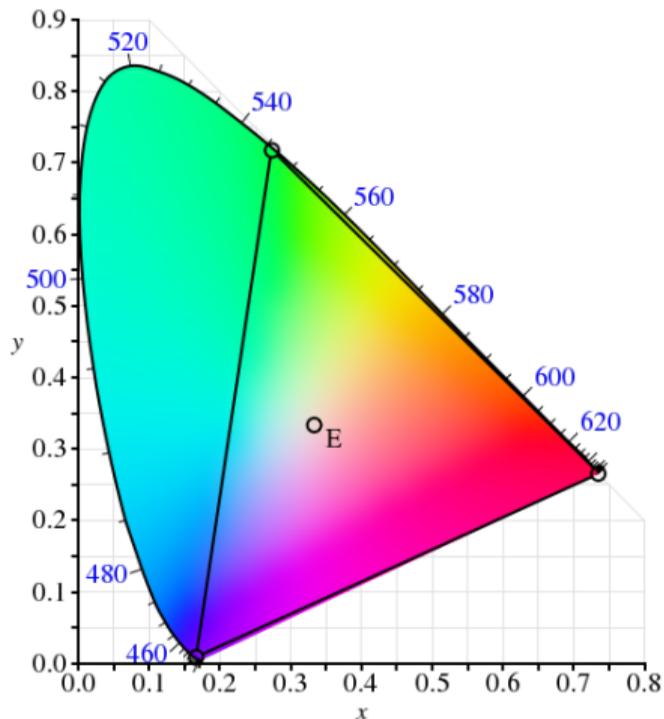
Bearbeitung

Literatur



Wikipedia-User BenRG

CIE Farbraum RGB



Wikipedia-User BenRG

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

RGB/CMY(K)

Andere

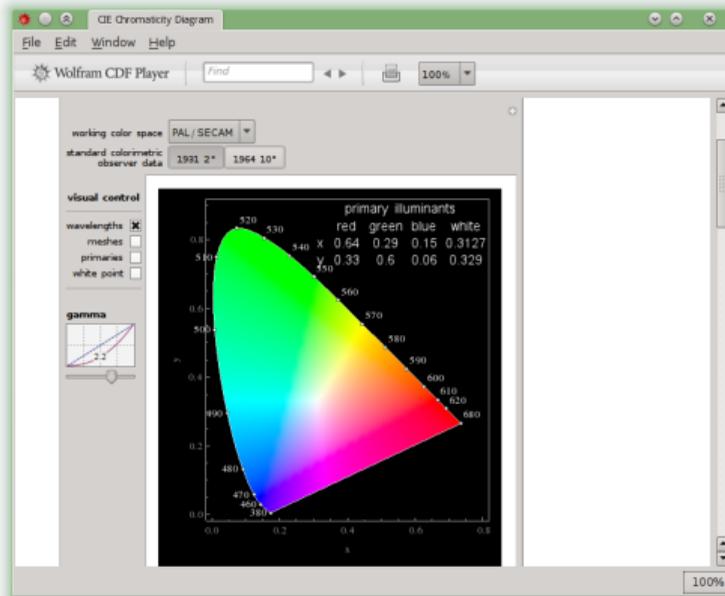
Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

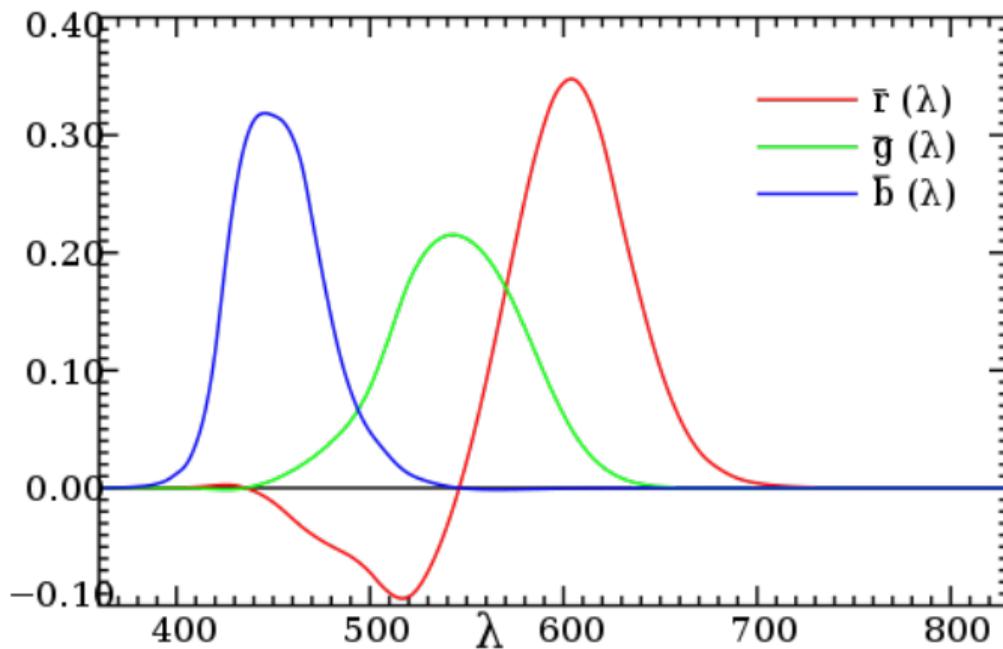
Literatur

CIE: Weitere Beispiele



demonstrations.wolfram.com/CIEChromaticityDiagram/

CIE Tristimuluskurven



Wikipedia-User Marco_Polo

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

RGB/CMY(K)

Andere

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

RGB/CMY(K)

Andere

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur

RGB/CMY(K)

- Wir können die wahrnehmbaren Farben als Mischung von Rot, Grün und Blau herstellen
- Unser Weiß ist Rot + Grün + Blau
- **Additive** Farbmischung:
- Durch Hinzufügen von Farben zu Schwarz werden neue Farben erzeugt
 - Rot + Grün = Gelb
 - Rot + Blau = Magenta
 - Grün + Blau = Cyan
- **Farbraum:** Mischbare Farben



Original



RGB



Original

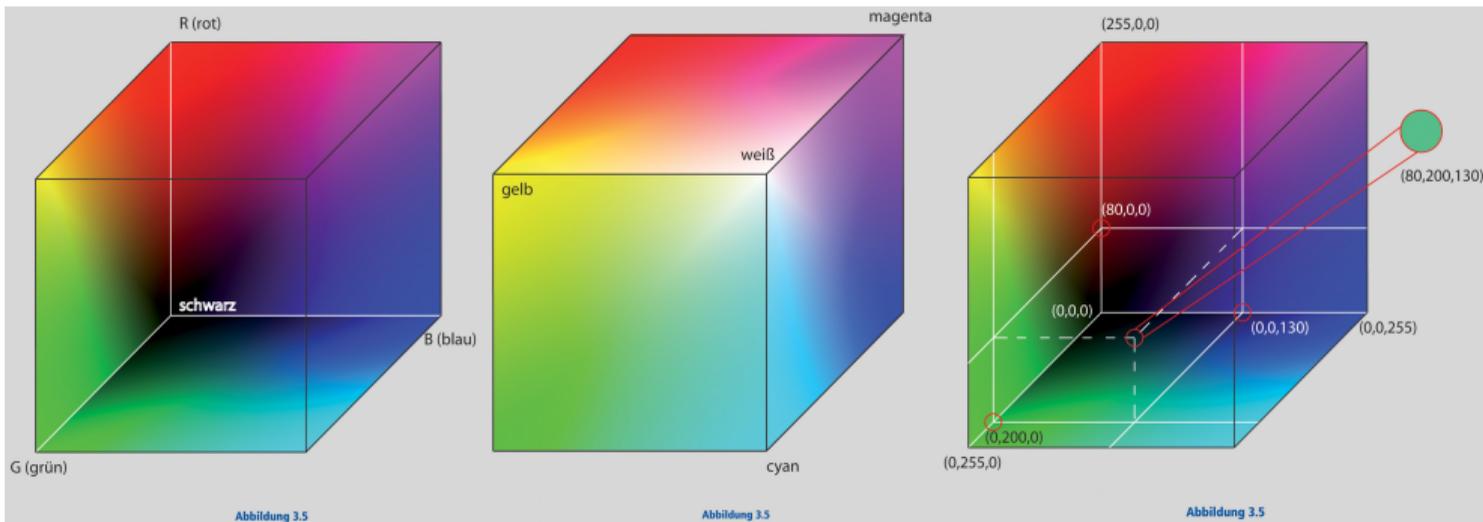


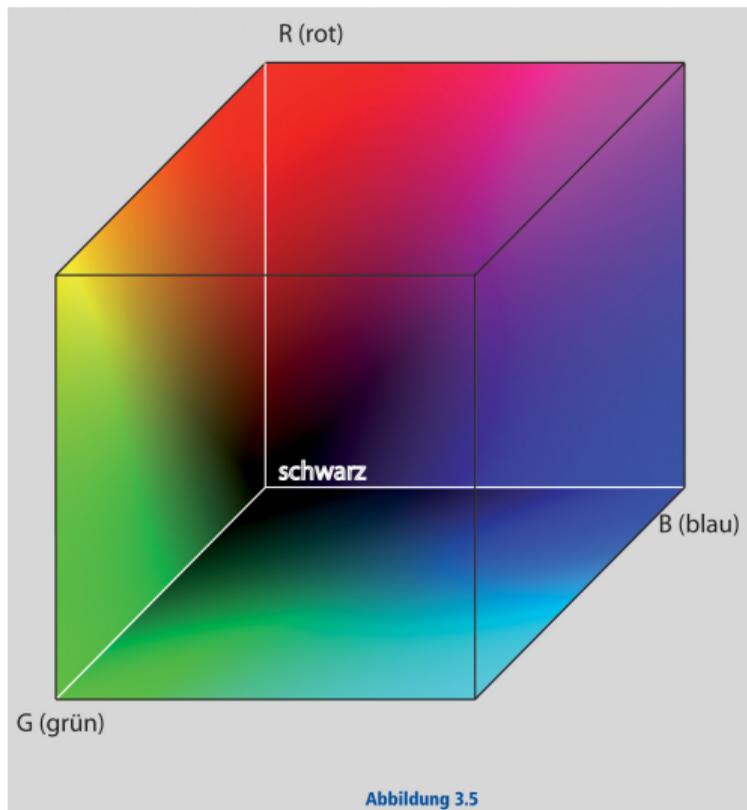
RGB

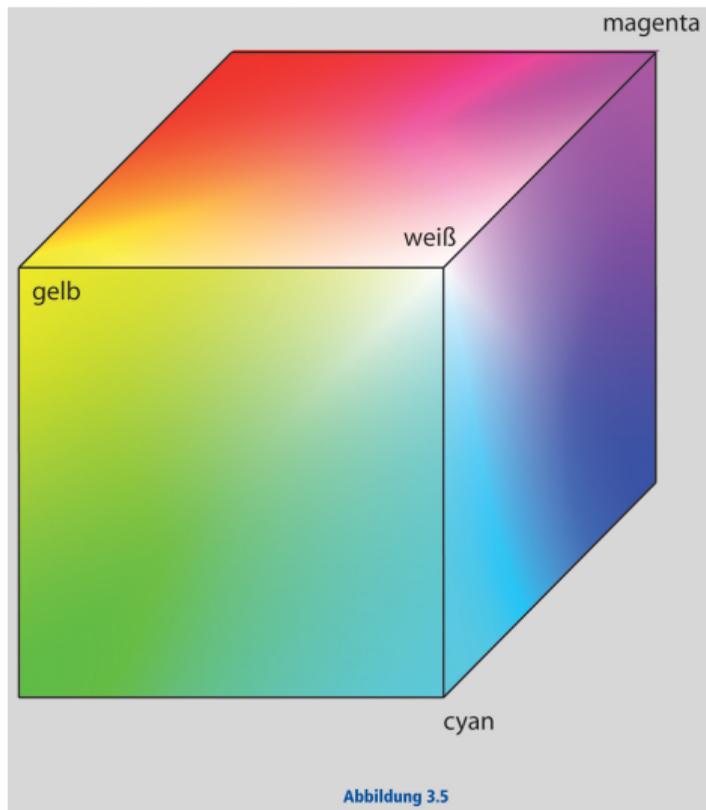


RGB

RGB-Würfel







Licht

Wahrnehmen

Farbräume

RGB/CMY(K)

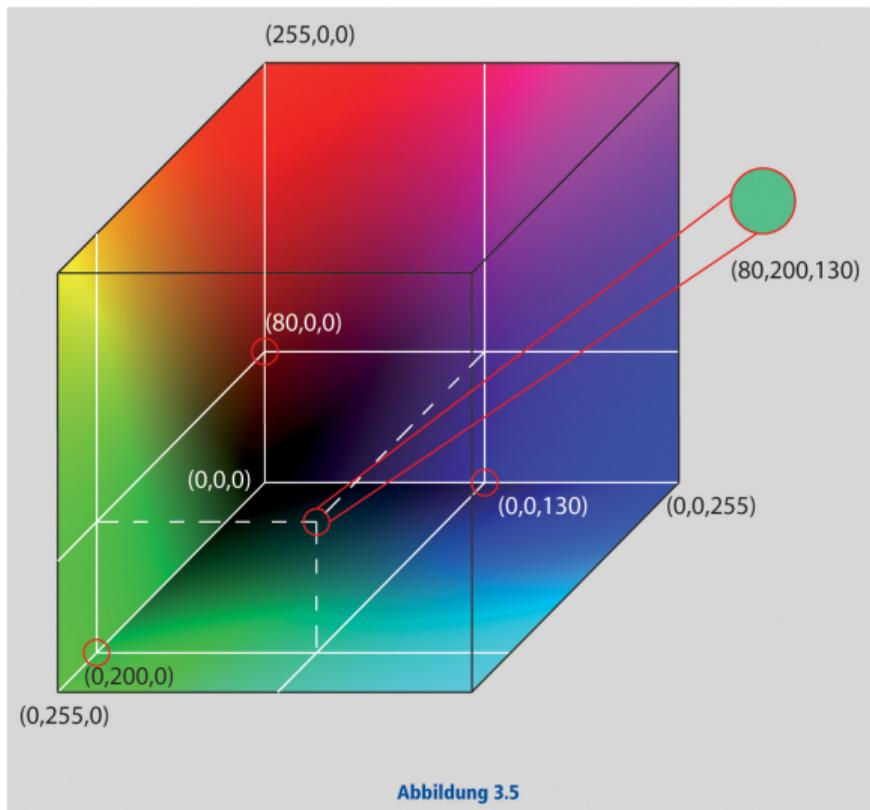
Andere

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur



Subtraktive Farbmischung

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

RGB/CMY(K)

Andere

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur

- Farbeindruck auf Papier entsteht durch Filterung von Farbanteilen
- Grün ist die Abwesenheit von Blau und Rot
 - Blau und Rot werden absorbiert
- Mischung auf Papier heißt somit: mehr Filterung
- **Subtraktive** Farbmischung
- Im RGB-Farbwürfel werden jeweils die gegenüberliegenden Ecken gefiltert
 - Cyan: Rot wird gefiltert
 - Gelb: Blau wird gefiltert
- CMY-Modell: Cyan Magenta Yellow



Original



RGB



CMY



Original



RGB



CMY

- Umrechnung des additiven und des subtraktiven Farbmodells
- Additiv: RGB-Modell
- Subtraktiv: CMY-Modell
- Einfache Betrachtung von der gegenüberliegenden Seite des Farbwürfels

$$f_{CMY} = \begin{pmatrix} f_C \\ f_M \\ f_Y \end{pmatrix} = \text{weiß}_{RGB} - \begin{pmatrix} f_R \\ f_G \\ f_B \end{pmatrix} = \text{weiß}_{RGB} - f_{RGB}$$

$$f_{RGB} = \begin{pmatrix} f_{max} - f_C \\ f_{max} - f_M \\ f_{max} - f_Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{max} \\ f_{max} \\ f_{max} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} f_C \\ f_M \\ f_Y \end{pmatrix} = \text{weiß}_{RGB} - \begin{pmatrix} f_C \\ f_M \\ f_Y \end{pmatrix}$$

Umwandlung: Beispiel

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

RGB/CMY(K)

Andere

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur

- Annahme: Farbwerte pro Farbkanal mit 8 Bit
- Türkis in RGB: (80, 200, 130)
- Dann Umrechnung in CMY:

$$f_{CMY} = \begin{pmatrix} f_C \\ f_M \\ f_Y \end{pmatrix} = \text{weiß}_{RGB} - \begin{pmatrix} f_R \\ f_G \\ f_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 255 \\ 255 \\ 255 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 80 \\ 200 \\ 130 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 175 \\ 55 \\ 125 \end{pmatrix}$$

Varianten

- Eine Variante von CMY ist das CMYK-Modell
 - Hinzufügen von Schwarz (Black)
 - Bessere Farbdarstellung (Mischung aus CMY eher braun)
 - Kostenfaktor
- Jedes Gerät hat andere Grundfarben
- Können abhängig von Umgebung verschieden wirken
- Daher: weitere Farbprofile
- Farben können auch auf unterschiedlichem Papier unterschiedlich aussehen
- Daher muß der Drucker die (CMY-) Komponenten umrechnen und an seine Grundfarben anpassen
- Dafür muß der Drucker "kalibriert" werden
 - Messen, welche Farbwiedergabe tatsächlich erzielt wird
 - Das Ergebnis der Messung ist ein sogenanntes Farbprofil
- Entsprechendes gilt für Monitore etc.

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

RGB/CMY(K)

Andere

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur



👉 Beschreibung ColorHug



Original



CMY



CMYK



Original



CMY



CMYK

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

RGB/CMY(K)

Andere

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur

Andere

Weitere Modelle

- Im wesentlichen zwei Gruppen:
 - Varianten von RGB/CMY(K) (Grundfarbenorientierte Modelle)
 - Luminanz-Chrominanz (Wahrnehmungsorientierte Modelle)
- Letztere arbeiten nicht mit Grundfarben, sondern trennen **Farbinformation** von **Helligkeitsinformation**
- Analog menschliche Wahrnehmung: Integration über die Antwort der Zapfen
- Vorteil: Anpassung an unterschiedliche Helligkeiten
- Bei RGB und CMY durch Änderung eines Farbwertes auch Änderung von Helligkeit und Sättigung
- Auch: Schwarzweißbild + Farbinformationen
- Umrechnung zum Teil aufwendig und nicht linear

- Einfaches lineares Modell mit einem Helligkeitskanal: YCbCr
 - Y: Helligkeit, hoher Anteil von Grün, geringer Rot und Blau
 - Cb: Blauanteil
 - Cr: Rotanteil

$$f_{YCbCr} = \begin{pmatrix} f_Y \\ f_{Cb} \\ f_{Cr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.168736 & -0.331264 & 0.5 \\ 0.5 & -0.418688 & -0.081312 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_R \\ f_G \\ f_B \end{pmatrix}$$



Original



RGB



YCbCr



Original



RGB

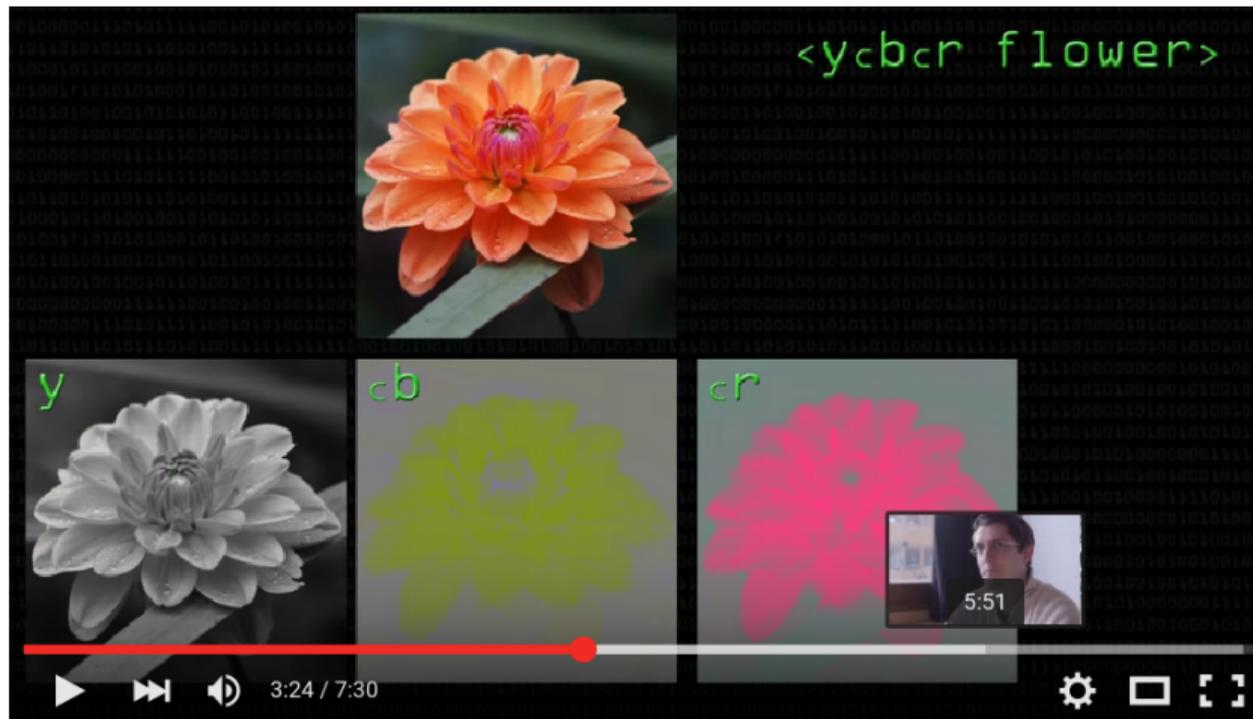


YCbCr

Eigenschaften YCbCr

- Cr und Cb viel “flächiger”
- benachbarte Bildpunkte haben oft den gleichen Wert
- zudem sind diese oft im mittleren Wertebereich
- Das Phänomen, das mehr Information in den Helligkeitswerten spricht, tritt bei vielen natürlichen Bildern auf – Farben sind gleichmäßiger verteilt als Helligkeiten
 - einheitliche Färbung bei dreidimensionaler Struktur
 - Licht und Schatten liefern Kontrastunterschiede
- Unser Sehsystem hat sich mit darauf eingestellt, es verarbeitet Helligkeitsinformationen besser
- Besonders deutlich nachts, wenn wir ohne Farben sehen
- Farbkanäle haben weniger Informationen, unser Sehsystem ist daran angepaßt

Video 7.1: JPEG – Farbräume



🔊 Colourspaces – Computerphile (7:30)

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur

Digitalisierung

- Digitale Bilder setzen sich aus Bildpunkten zusammen, den **Pixeln**
- Jedes Pixel hat Helligkeitsinformationen und Farbinformationen
- Typisch:
 - 2 Farben – 1 Bit – Schwarz-Weiß
 - 16 Farben – 4 Bit
 - 256 Graustufen – 8 Bit
 - 256 Farben – 8 Bit
 - 16,7 Millionen Farben – 24 Bit – “True Color”
- Weiterer Farbkanal: Alphakanal
- HDR (High Dynamic Range) je Farbkanal (mindestens) 32 Bit

Beispiel HDR 1

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur



cc by-nc-sa Kenny Teo

Beispiel HDR 2



cc by-nc-sa Kenny Teo

Beispiel HDR 3

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

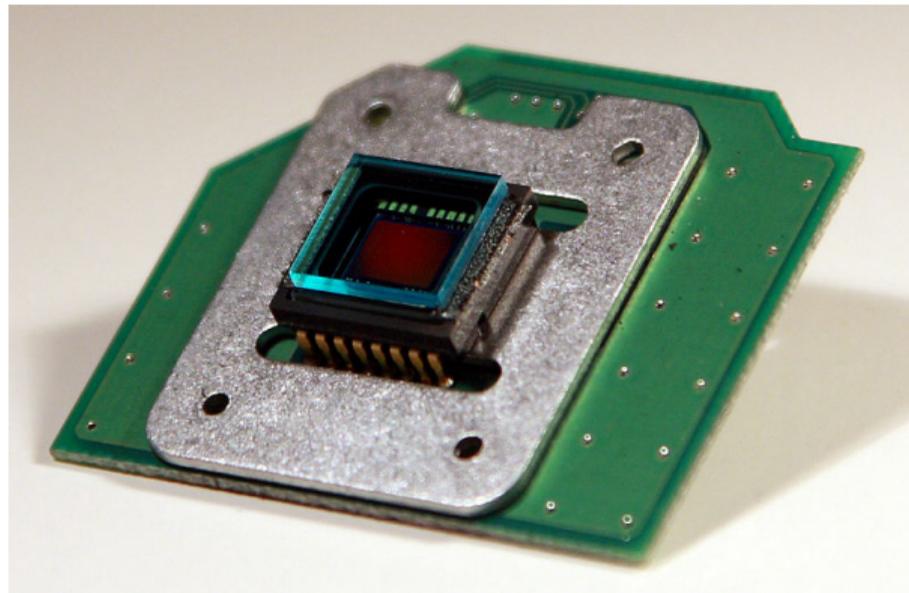
Literatur



cc by-nc-nd kennytyy

Typische Anwendungen

- Digitale Fotografie mit 24 Bit
- Im besonderen bei Graphiken mit reduzierter Farbzahl:
 - Farbpalette
 - Beispiel GIF mit Farbtabelle mit max. 256 Farben
 - Dazu eine Farbe als "Transparenzfarbe"
- Alternative: PNG
 - Echter Alphakanal
 - Farben als Paletten oder Farbkanal mit bis zu 24 Bit
- Fotos können je nach Auflösung und Farbtiefe erhebliche Größe erreichen
 - 10 Megapixel, 48 Bit pro Pixel = 480 Millionen Bit = 60 MByte
- Kompression sinnvoll
- Aber: Möglichkeiten des RAW-Formats



CCD-Sensor (Wikipedia-User Merzperson)

Erinnerung: Farbwahrnehmung

- Licht
- Wahrnehmen
- Farbräume
- Digitalisierung
- Kompression
- Bearbeitung
- Literatur

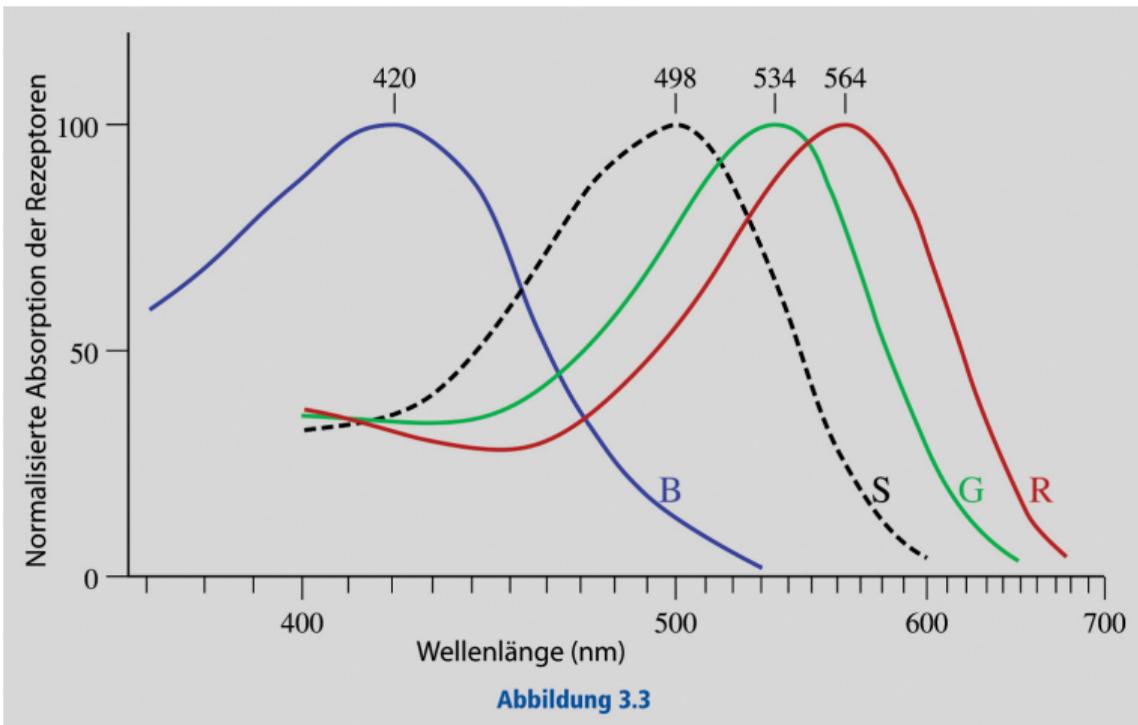
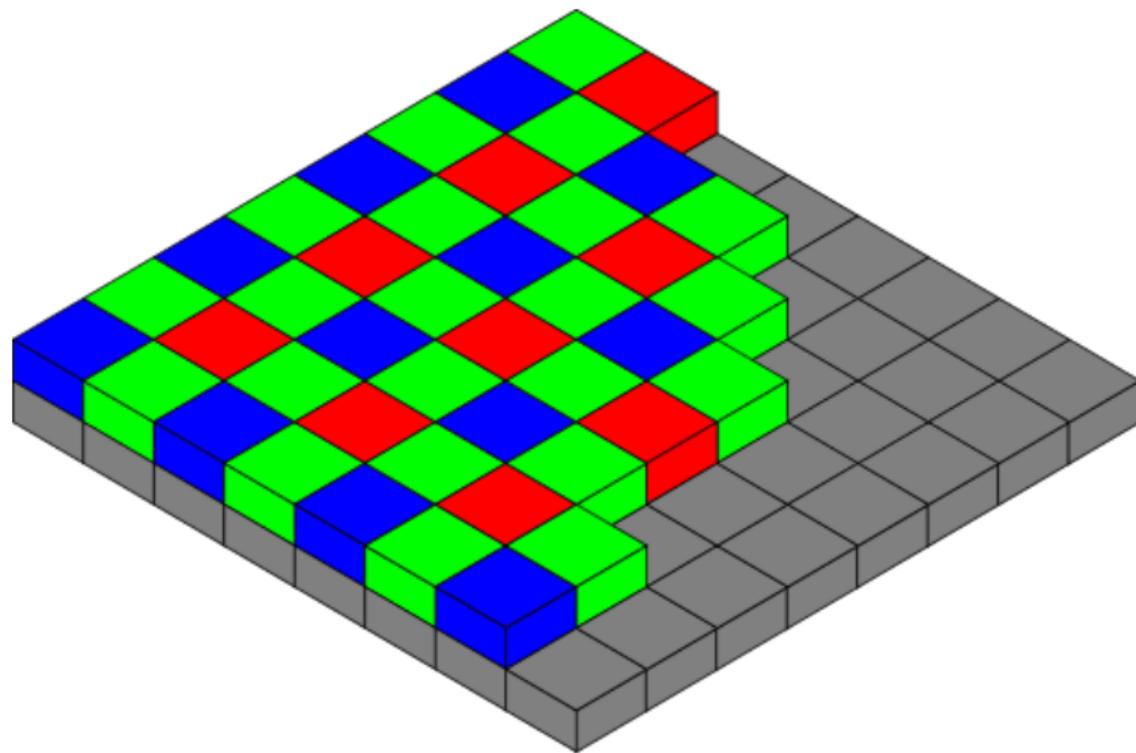


Abbildung 3.3

Achtung, normalisierte Werte

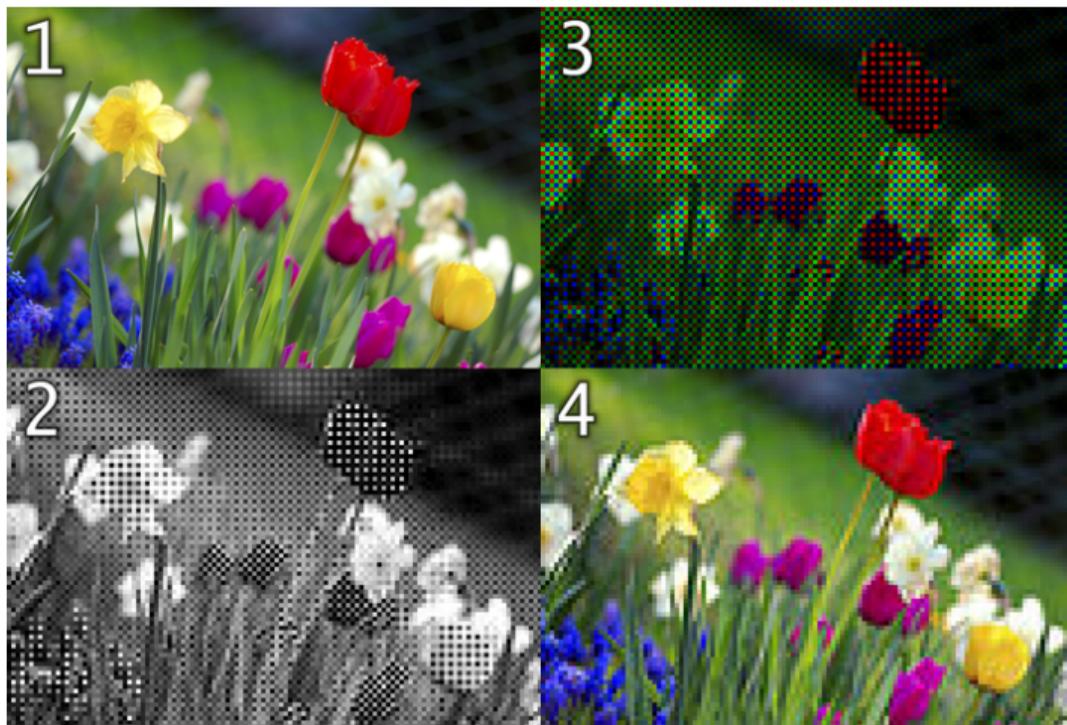
Bayer-Filter



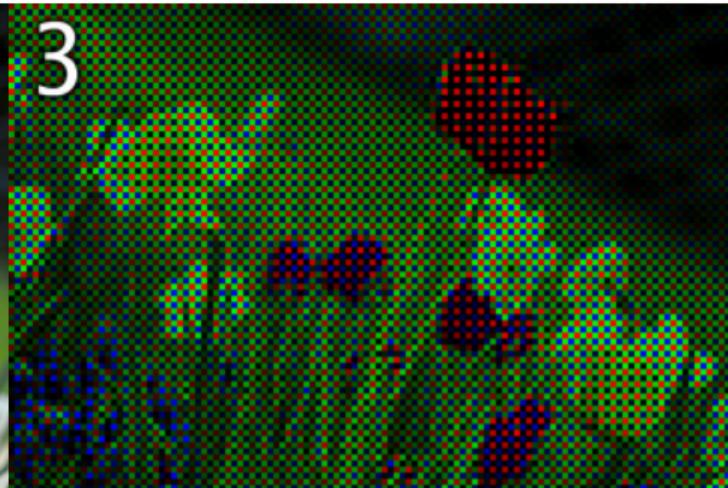
Wikipedia-User Cburnett

- Über den einzelnen lichtempfindlichen Sensoren (Pixel) liegen Farbfilter
 - Verschiedene Muster, Bayer-Filter das gebräuchlichste
- Die einzelnen Pixel enthalten jeweils nur Informationen für einen Farbkanal
- Das fertige Bild soll für jedes Pixel Informationen für alle Farben enthalten
- Lösung: Interpolation der nicht vorhandenen Farbwerte
 - Einfachster Ansatz: Interpolation aus umliegenden Pixeln
 - Komplexer: Annahmen über Bilder, z.B. Kantenerkennung
- Dieser Prozeß heißt Demosaicing und ist normalerweise Teil des Bildprozessors der Kamera, kann aber bei vorliegenden Rohdaten des Sensors (RAW-Format) im Nachhinein durchgeführt werden

Bayer-Filter: Beispiel



👉 Wikipedia-User Anita Martinz & Cmglee



Video 7.2: Bayer-Filter

Licht

Wahrnehmen

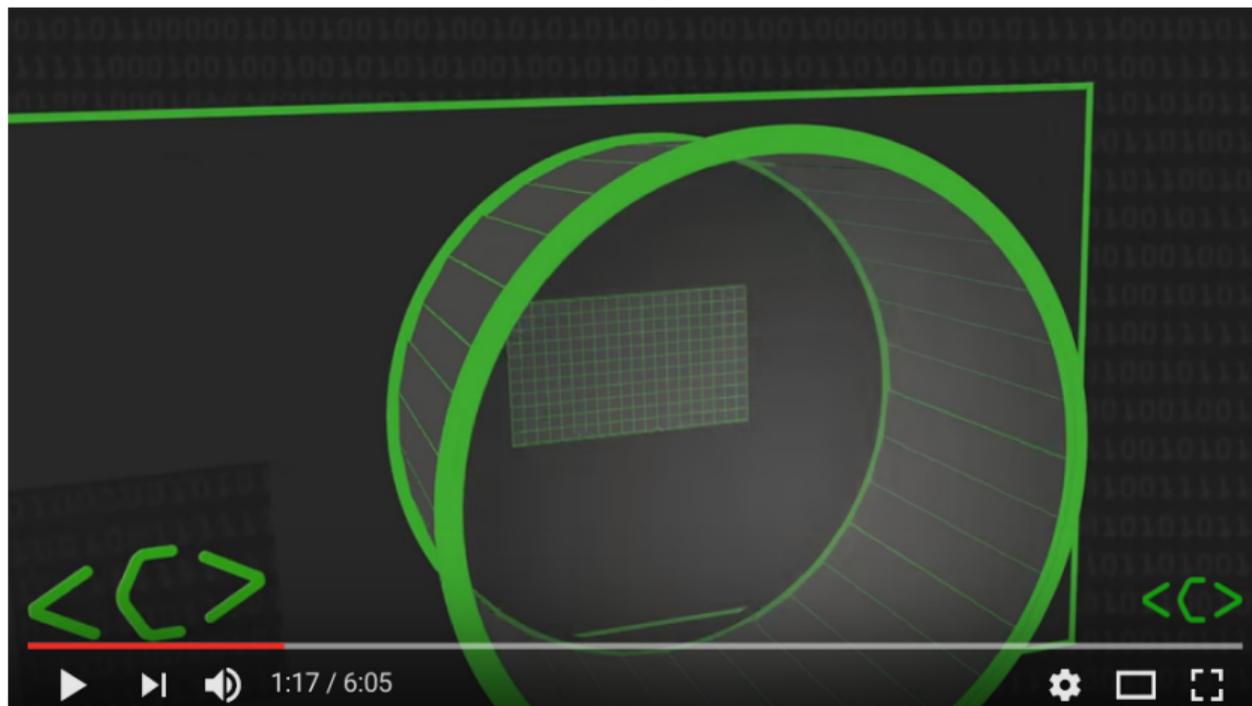
Farbräume

Digitalisierung

Kompression

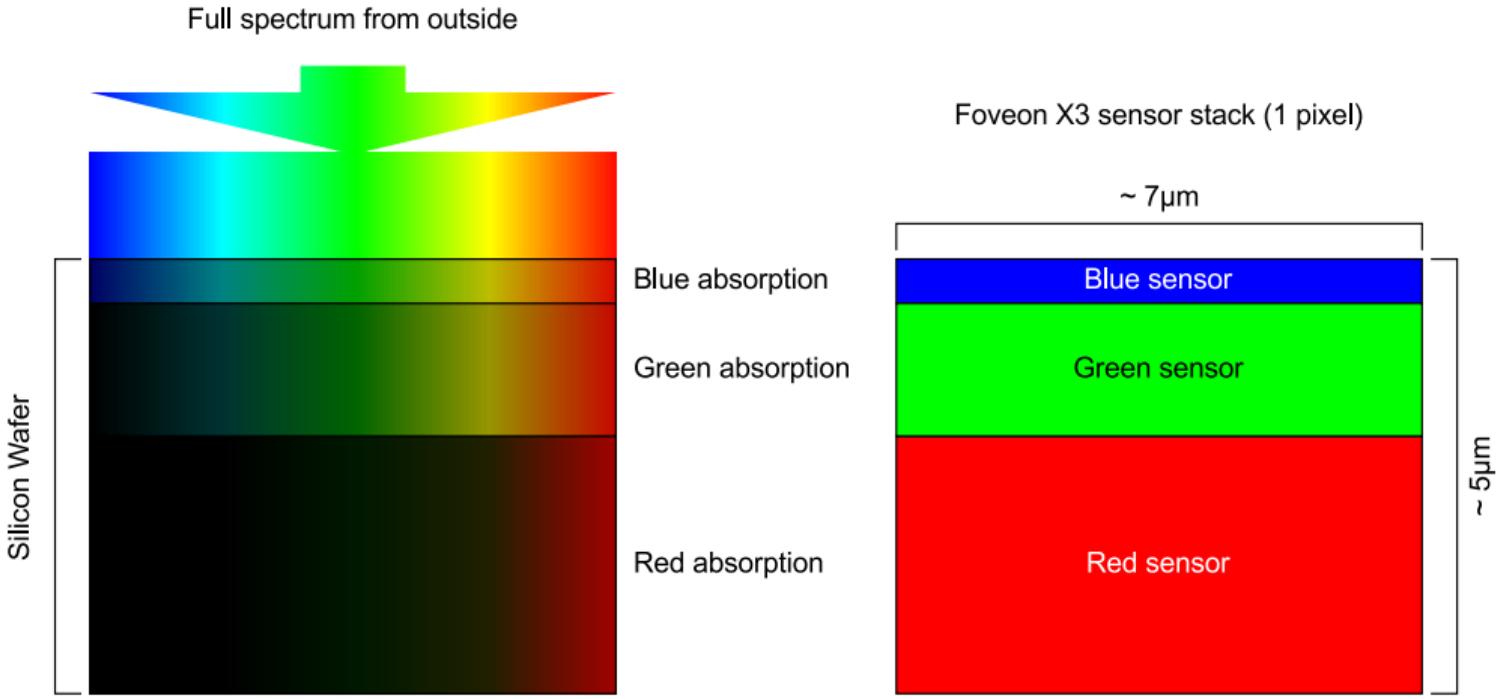
Bearbeitung

Literatur

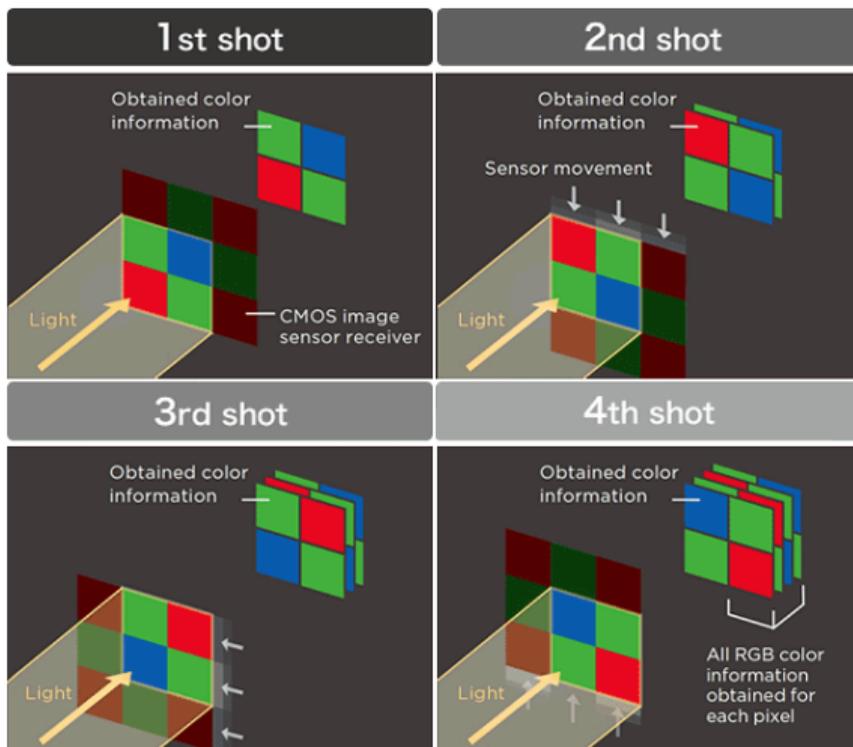


👉 Bayer Filter – Computerphile (6:05)

Foveon-Sensor



👉 Wikipedia-User wdwd



👉 Imaging Resource

Dithering

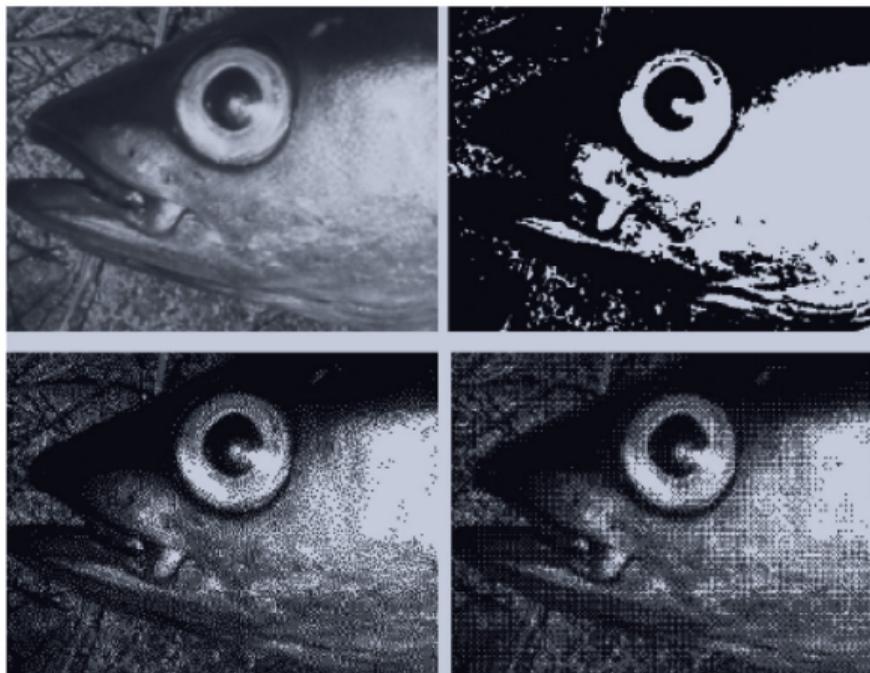
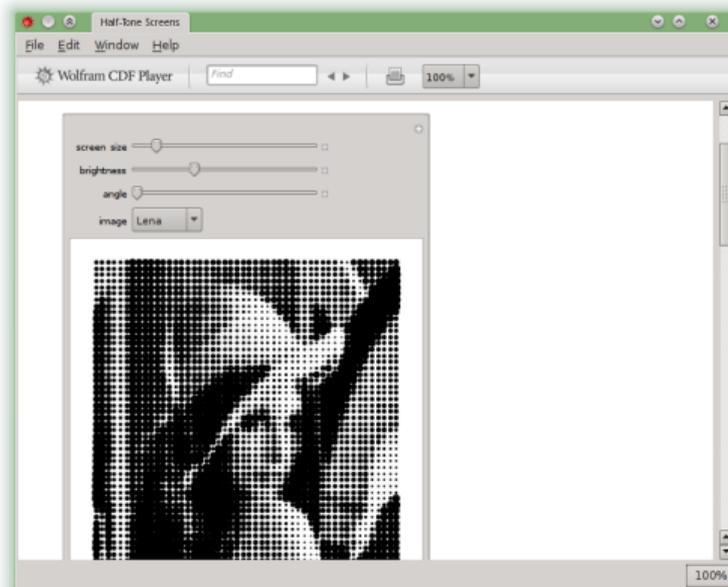


Abbildung 3.7: Dithering. Links oben: Originalbild mit 256 Grautönen. Rechts oben: Schwarzweißbild ohne Dithering. Link unten: Dithering mit Floyd-Steinberg-Verfahren. Rechts unten: Dithering mit festem Muster. Alle Bilder außer dem Originalbild haben 1 Bit Farbtiefe (Schwarz/Weiß).

Dithering: Beispiel



demonstrations.wolfram.com/HalfToneScreens/

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur

Kompression

- Wirklich hohe Raten erst bei verlustbehafteten Verfahren
- GIF nicht verlustfrei, da reduzierte Farben
- Datenmenge abhängig von
 - Abtasthäufigkeit (Diskretisierung, Samplingrate, Auflösung)
 - Abtastgenauigkeit (Quantisierung, Farbtiefe)
- verlustbehaftete Verfahren setzen (eine) diese(r) beiden Größen herab, aber da, wo es weniger auffällt
- Ausnutzen lokaler Eigenschaften des Bildes
 - Globale Reduktion der Abtasthäufigkeit wäre eine Verkleinerung der "Auflösung" in Pixeln
 - Globale Reduktion der Abtastgenauigkeit wäre eine Reduzierung der möglichen Farben pro Pixel

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

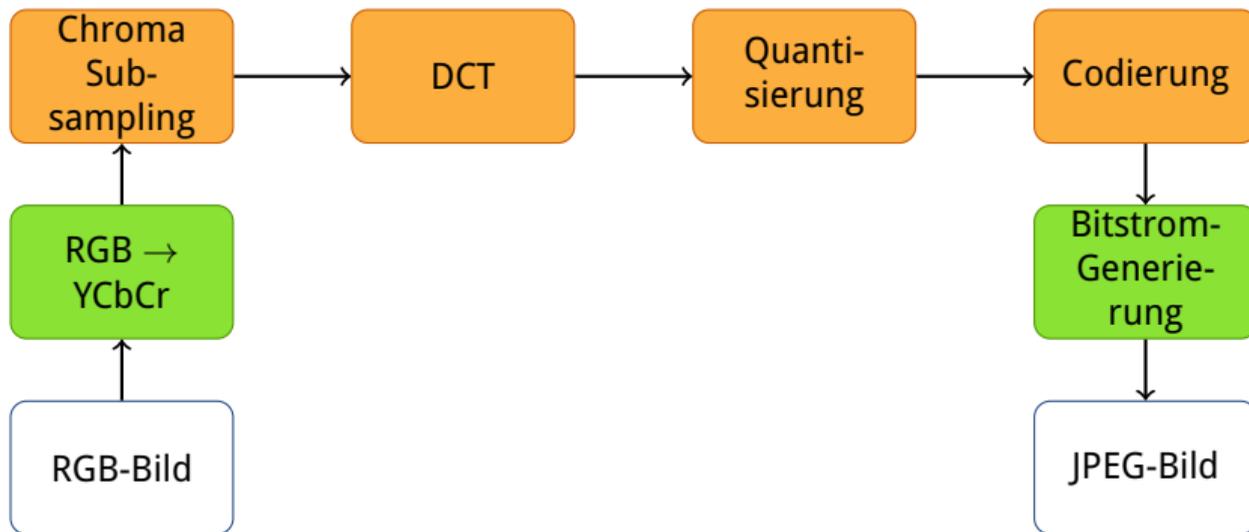
Bearbeitung

Literatur

JPEG Verfahren

- Joint Photographic Expert Group (ISO + ITU)
- Schritte:
 - (Transformation RGB nach YCbCr)
 - Chroma-Subsampling
 - Umcodierung in den Frequenzraum
 - Quantisierung
 - Codierung mit weiterer Kompression
 - (Bitstrom-Generierung)

Prinzipschaltbild



Vereinfachtes Prinzipschaltbild

Transformation nach YCbCr

Rekapitulation

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur

$$f_{YCbCr} = \begin{pmatrix} f_Y \\ f_{Cb} \\ f_{Cr} \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.168736 & -0.331264 & 0.5 \\ 0.5 & -0.418688 & -0.081312 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_R \\ f_G \\ f_B \end{pmatrix}$$

Chroma-Subsampling

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur

- Verlustbehafteter Kompressionsschritt
- Abtastrate eines Teils des Bildes wird reduziert
- Idee: Flächigkeit der Farben im YCbCr
- Verschiedene Varianten
 - Block aus 4 Pixeln zusammenfassen
 - Zwei benachbarte Pixel zusammenfassen (horizontal oder vertikal)
- Reduziert Cr und Cb auf die Hälfte/ein Viertel
- Y-Kanal unverändert
- Subsampling nur auf den Farbkanälen
- Auswählbar: Gar nicht/Halbierung/Viertelung

Detail Chroma-Subsampling

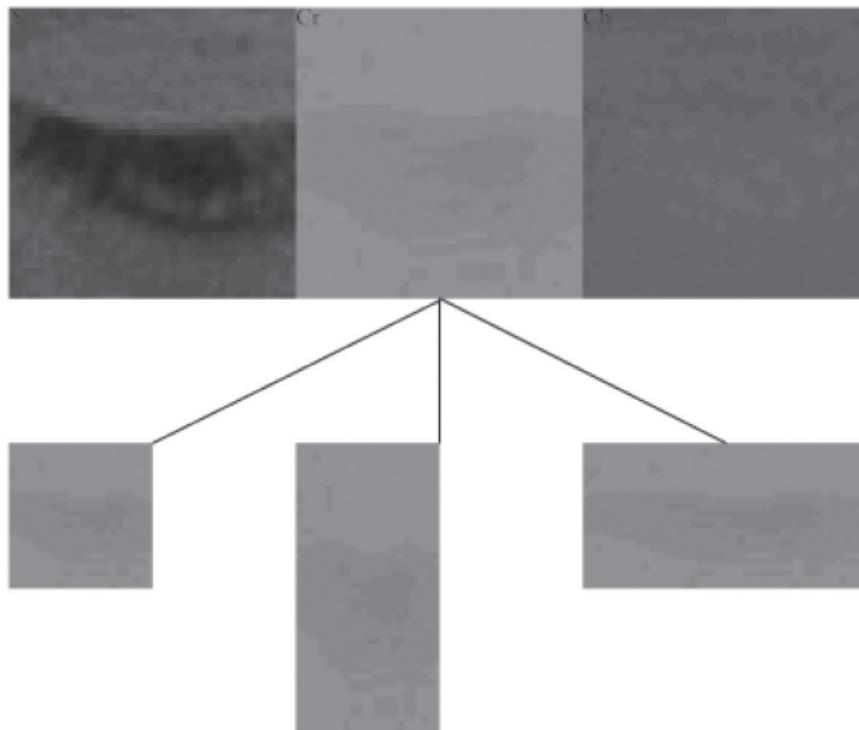


Abbildung 3.8: Vergrößerung aus ►Abbildung 3.6, Y-, Cr-, Cb-Kanal, jeweils 48x48 Pixel und Chroma-Subsampling für den Cr-Kanal auf 24x48, 48x24 und 24x24 Pixel (zweite Zeile)

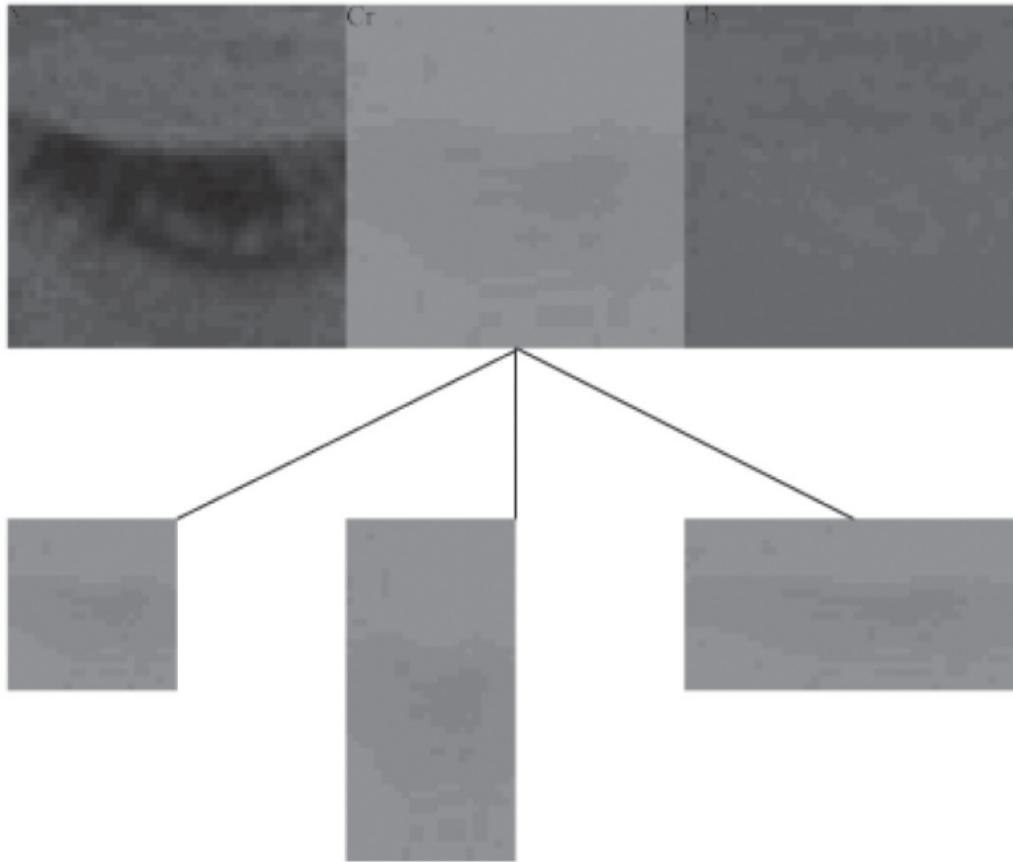


Abbildung 3.8: Vergrößerung aus ►Abbildung 3.6, Y-, Cr-, Cb-Kanal, jeweils 48x48 Pixel und Chroma-Subsampling für den Cr-Kanal auf 24x48, 48x24 und 24x24 Pixel (zweite Zeile)

Video 7.3: JPEG – Farben

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

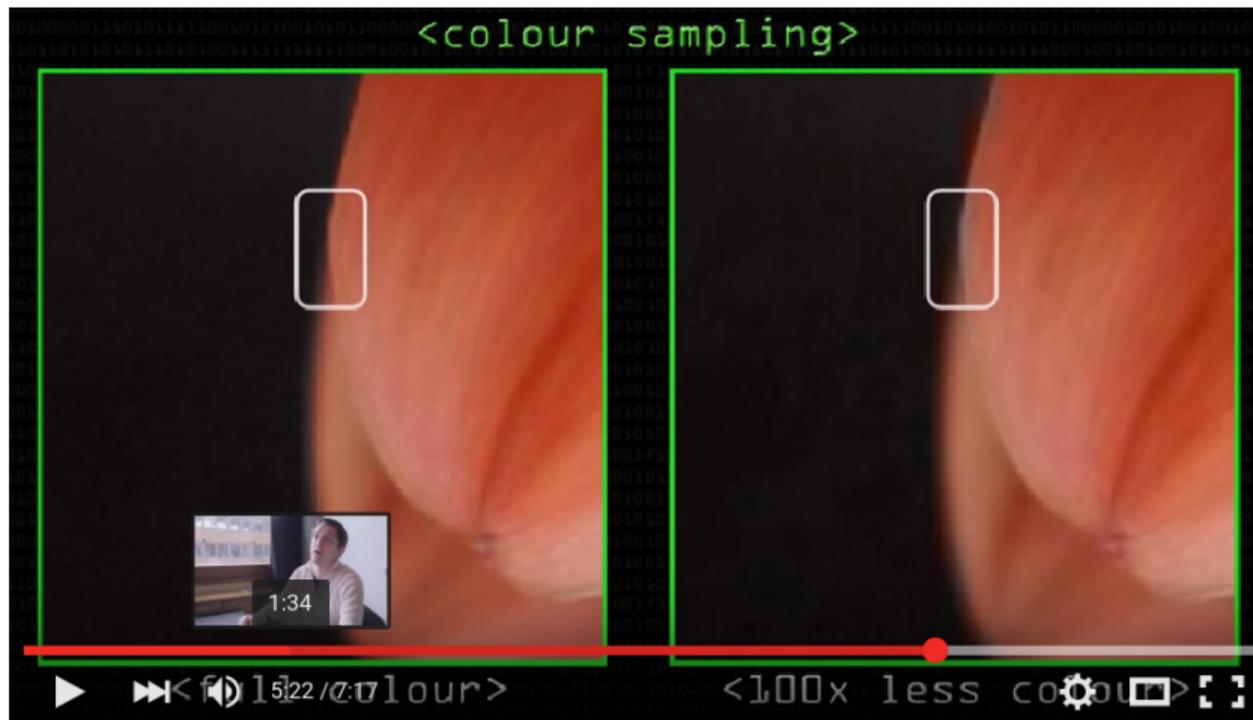
DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur



JPEG 'files' & Colour – Computerphile (7:17)

Umcodierung in den Frequenzraum

- Folgende Schritte für die drei Kanäle getrennt
- Y, Cr, Cb unabhängig voneinander untersucht und komprimiert
- Grauwertbilder, jeweils ein Byte pro Pixel (255 Stufen)
- Umcodiert, um danach die Quantisierung (Genauigkeit der Abtastung) zu vergrößern
- Im Frequenzraum, um die in einem Bild vorkommenden Frequenzen zu betrachten

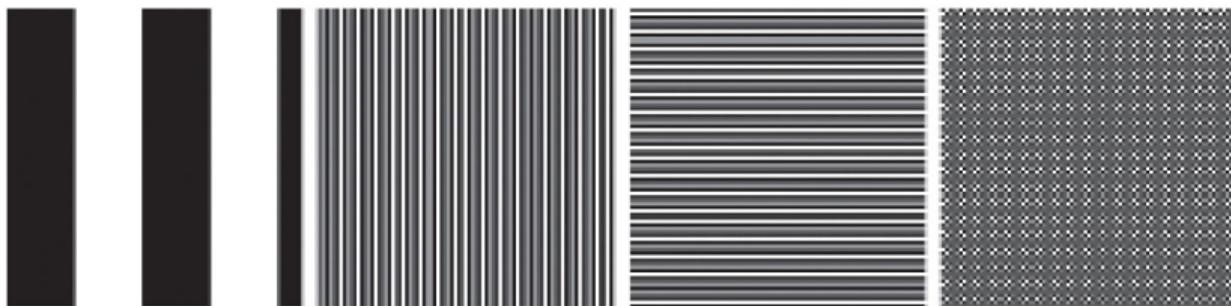


Abbildung 3.9: Bilder mit unterschiedlichen horizontalen und vertikalen Frequenzanteilen, von links nach rechts:
 (1) niedrige horizontale Frequenzen, (2) nur hohe horizontale Frequenzen,
 (3) nur hohe vertikale Frequenzen,
 (4) Mischung hoher horizontaler und vertikaler Frequenzen

Frequenzraum bei Bildern

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur

- Ähnlich wie Audiosignale, die als Überlagerung einfacher Schwingungen betrachtet werden können, lassen sich auch Bilder aus einfachen Bildern (Mustern) zusammensetzen
- Insbesondere aus einer Grundmenge von nur horizontalen/vertikalen Frequenzen lassen sich alle möglichen Bilder zusammensetzen
- Jedes Pixel hat nur eine endliche Anzahl möglicher Grauwerte, und es gibt eine endliche Anzahl von Pixeln

Umkodierung durch DCT

- Transformation mit Hilfe der diskreten Cosinustransformation (DCT)
- Bei JPEG für 8x8 Pixel große Teilblöcke
 - Prinzipiell auch andere Blockgrößen möglich, JPEG beschränkt sich auf 8x8
- jeder 8x8 Block enthält 64 Werte
- Mit Hilfe der DCT werden diese in 64 neue Werte, die DCT-Koeffizienten $F(u, v)$, umgerechnet
 - Bildraum: $f(x, y)$ gibt für das Pixel an Stelle (x, y) innerhalb des betrachteten Blocks den Grauwert an
 - Frequenzraum: Die Koeffizienten geben an, mit welchem Anteil das entsprechende Basismuster zum Block beiträgt

Umkodierung: Basismuster

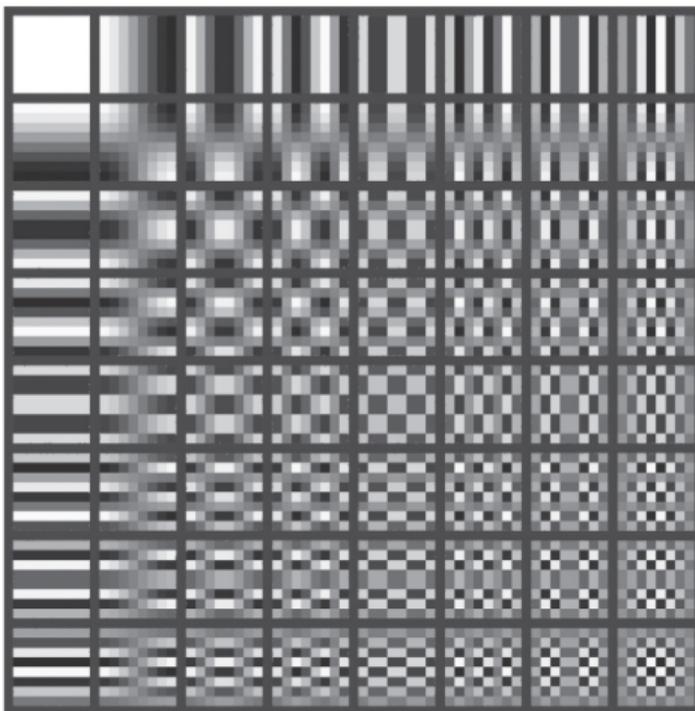
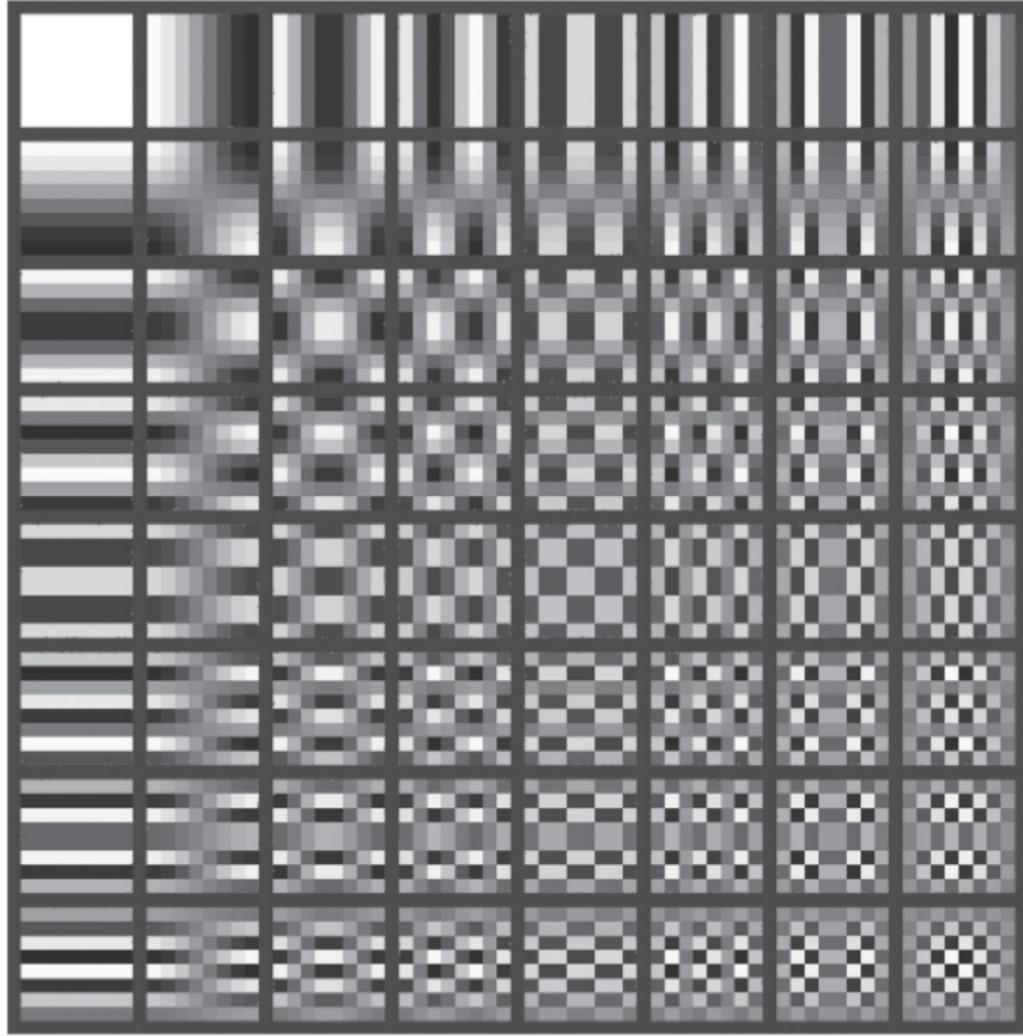


Abbildung 3.10: 64 Basismuster für die DCT, jedes Basismuster besteht aus 8×8 Werten, die unterschiedliche Frequenzanteile des Bildes repräsentieren. Ganz oben links ist die DC-Komponente. Die Muster weiter rechts entsprechen höheren horizontalen, die weiter unten höher werdenden vertikalen Frequenzen.



Umkodierung: DCT Koeffizienten

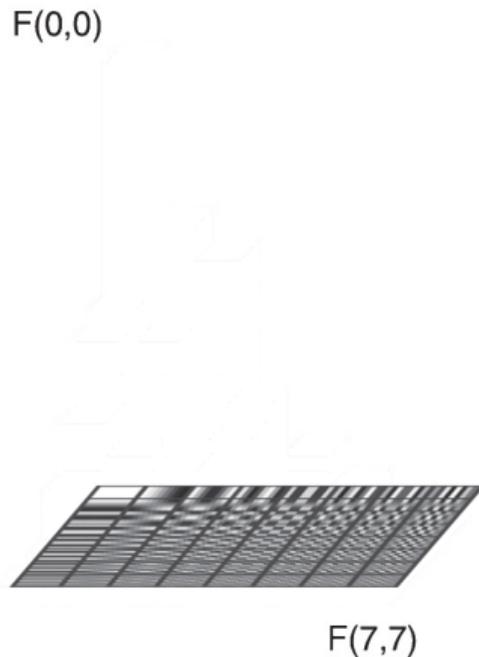


Abbildung 3.11: DCT-Koeffizienten. Links: typische Werteverteilung bei Bildern. Der DC-Anteil $F(0,0)$ ist hoch. Hohe Frequenzanteile (vorn und rechts) sind niedrig und oft null. Rechts: Zick-Zack-Scan zum Auslesen der AC-Koeffizienten.

Umkodierung: DCT Koeffizienten

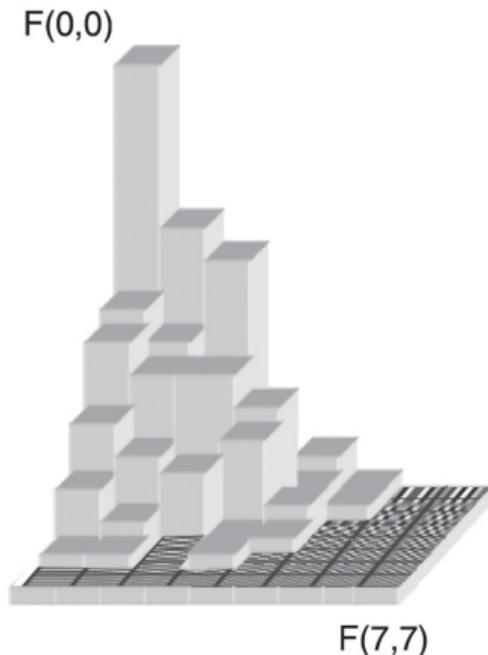


Abbildung 3.11: DCT-Koeffizienten. Links: typische Werteverteilung bei Bildern. Der DC-Anteil $F(0,0)$ ist hoch. Hohe Frequenzanteile (vorn und rechts) sind niedrig und oft null. Rechts: Zick-Zack-Scan zum Auslesen der AC-Koeffizienten.

Umkodierung: DCT AC/DC-Komponenten

- DCT-Koeffizient $F(0, 0)$ berechnet den Mittelwert aller Pixel innerhalb des Teilbildes
 - Bei einfarbigen Bildern ist dies der einzige Anteil, der nicht Null ist
- Dieser Koeffizient wird DC-Komponente genannt, die anderen AC-Komponenten
- DCT reduziert den Speicherbedarf noch nicht (64 Koeffizienten statt 64 Pixel)
- DCT plus inverse verlustfrei (modulo Rundungsfehler)
- Warum die DCT trotzdem bei der Komprimierung hilft läßt sich nachvollziehen, wenn man die typischen Werte der Koeffizienten betrachtet

Umkodierung: DCT Koeffizienten

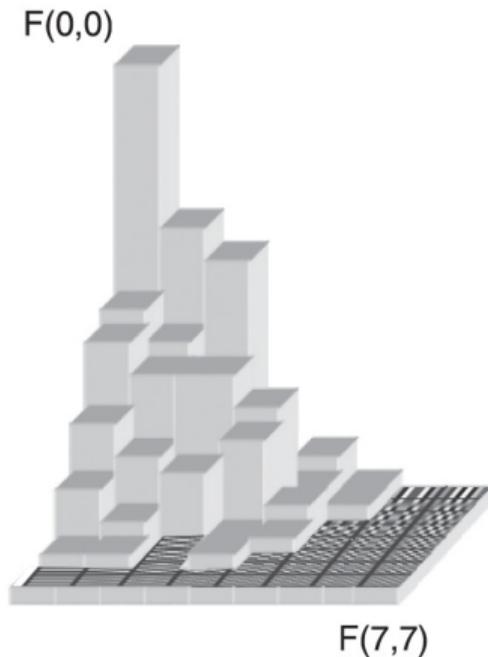


Abbildung 3.11: DCT-Koeffizienten. Links: typische Werteverteilung bei Bildern. Der DC-Anteil $F(0,0)$ ist hoch. Hohe Frequenzanteile (vorn und rechts) sind niedrig und oft null. Rechts: Zick-Zack-Scan zum Auslesen der AC-Koeffizienten.

■ Annahmen

- 1 Bei vielen Bildern sind hohe Frequenzanteile seltener als niedrige
- 2 Änderungen bei hohen Frequenzanteilen fallen bei der Wahrnehmung weniger ins Gewicht

■ Vorgehen

- Werte nahe Null auf Null setzen
- Höhere Frequenzen mit weniger Bits kodieren (Auflösung reduzieren)
 - Quantisierung (Auflösung) wird vergrößert
 - Nur auf weniger gut wahrgenommenen (hohen) Frequenzanteilen
- Daher Transformation in den Frequenzraum

Re-Quantisierung

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur

- Die neue Quantisierung der DCT-Koeffizienten wird mit einer Quantisierungsmatrix durchgeführt
- Dabei gibt es für jeden der 8x8 DCT-Koeffizienten einen Wert $Q(u, v)$, durch den dieser geteilt wird

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

- Rundung reduziert Wertebereich für Koeffizient $F(u, v)$
- Wesentlicher Schritt, der auch die Güte bestimmt
 - Werte $Q(u, v)$ bestimmen, wie viele Informationen verloren gehen

Quantisierungsmatrix

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

$$Q = \begin{pmatrix} 10 & 20 & 40 \\ 20 & 30 & 50 \\ 40 & 50 & 60 \end{pmatrix} \quad F = \begin{pmatrix} 105 & 63 & 11 \\ 61 & 14 & 8 \\ 13 & 9 & 2 \end{pmatrix}$$

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur

Quantisierungsmatrix

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

$$Q = \begin{pmatrix} 10 & 20 & 40 \\ 20 & 30 & 50 \\ 40 & 50 & 60 \end{pmatrix} \quad F = \begin{pmatrix} 105 & 63 & 11 \\ 61 & 14 & 8 \\ 13 & 9 & 2 \end{pmatrix}$$

$$F' = \begin{pmatrix} 10 & 3 & 0 \\ 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

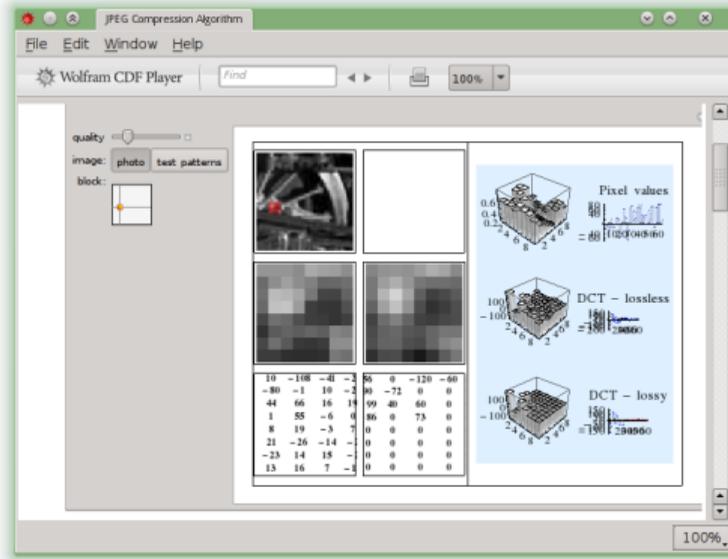
JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur

JPEG: Beispiel



demonstrations.wolfram.com/JPEGCompressionAlgorithm/

Quantisierung: Rekonstruktion

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur

- Für die Rekonstruktion muß die verwendete Quantisierungsmatrix bekannt sein:

$$\tilde{F}(u, v) = F'(u, v) \cdot Q(u, v)$$

- Es gibt vordefinierte Quantisierungsmatrizen oder selbst definierte
- Aufgrund der verlustbehafteten Rundung bei der Konstruktion von $F'(u, v)$ werden die rekonstruierten Werte nicht den originalen entsprechen
 - Erneuter Kompression mit gleicher Quantisierungsmatrix führt nicht zu weiteren Verlusten

Bitstromgenerierung/Codierung

- Subsampling und re-Quantisierung sind die verlustbehafteten Schritte
- Bei Speicherung ergänzt um verlustfreie Verfahren, DC-Komponente anders als andere
- Kodierung DC
 - Da benachbarte Blöcke oft ähnliche Grundtöne haben kann prädiktive Kodierung helfen – von einem Startwert werden nur Differenzen gespeichert
 - weniger Bits für kleinere Differenzwerte nötig – Huffman, andere entropiebasierte Codierung
 - DC-Komponenten ergeben ein vergrößertes Vorschau-Bild
- Kodierung AC
 - Zick-Zack-Scan, zuerst niedrige, dann hohe Frequenzen
 - Am Ende oft viele Nullen – Lauflängenkodierung
 - Danach Huffman (oder arithmetisch)
 - Standardverteilungen für Huffman vorhanden

Codierung: Scan der DCT Koeffizienten

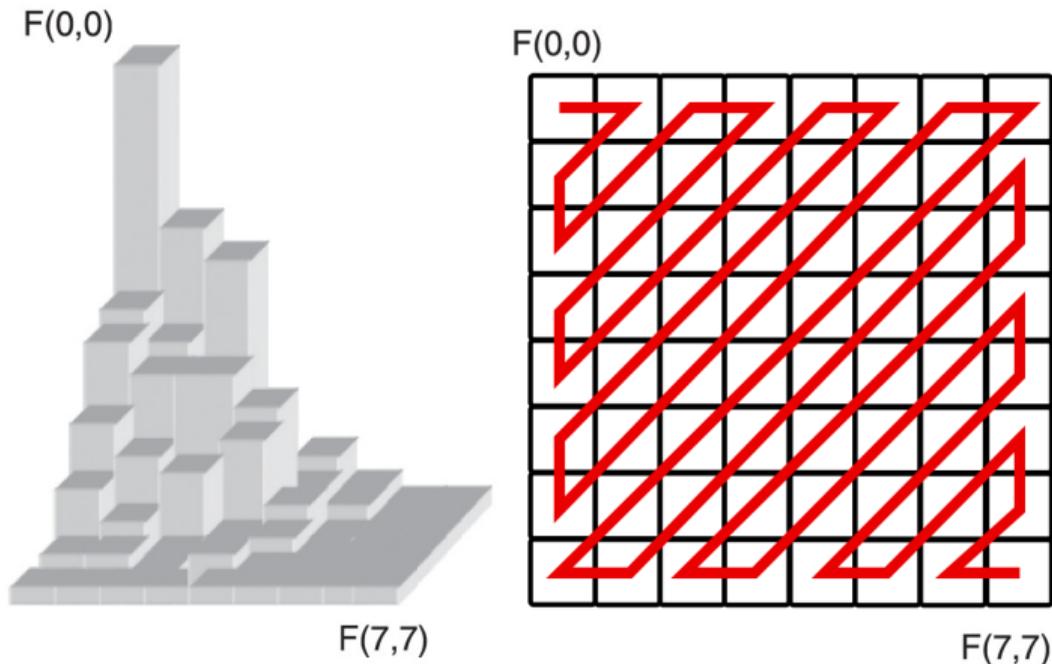


Abbildung 3.11: DCT-Koeffizienten. Links: typische Werteverteilung bei Bildern. Der DC-Anteil $F(0,0)$ ist hoch. Hohe Frequenzanteile (vorn und rechts) sind niedrig und oft null. Rechts: Zick-Zack-Scan zum Auslesen der AC-Koeffizienten.

Prinzipschaltbild

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur

RGB-Bild

JPEG-Bild

Vereinfachtes Prinzipschaltbild

Prinzipschaltbild

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur



Vorbereitung: RGB-Bild ggf. in den YCbCr-Farbraum übertragen

Vereinfachtes Prinzipschaltbild

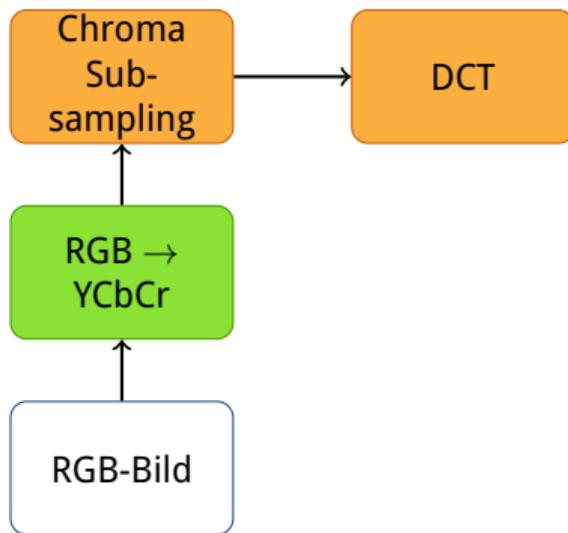
Prinzipschaltbild



Chroma-Subsampling: Ggf. Reduzierung Auflösung Cb- und Cr-Kanal (Viertelung, Halbierung Horizontal, Halbierung Vertikal)

Vereinfachtes Prinzipschaltbild

Prinzipschaltbild

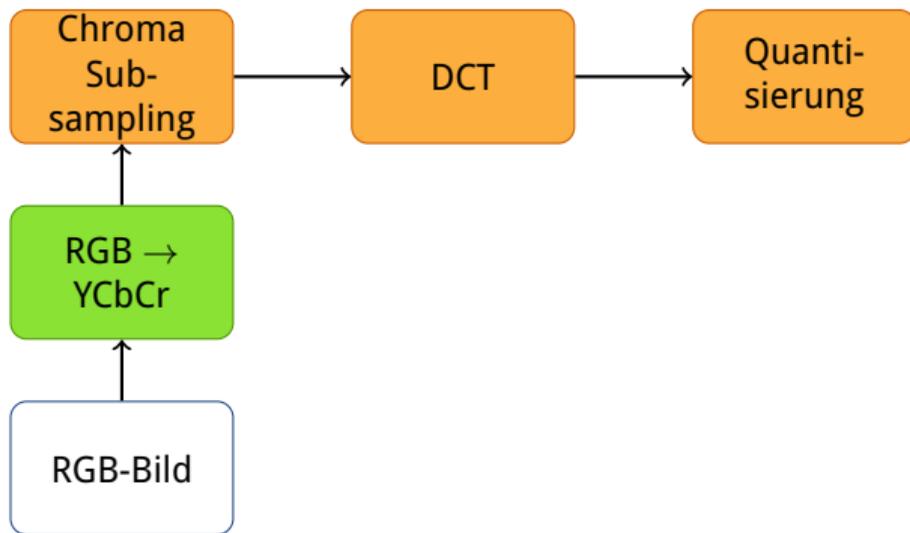


JPEG-Bild

Transformation in den Frequenzraum auf 8x8-Blöcken, Koeffizienten für 64 Basismuster statt 64 Grauwerte

Vereinfachtes Prinzipschaltbild

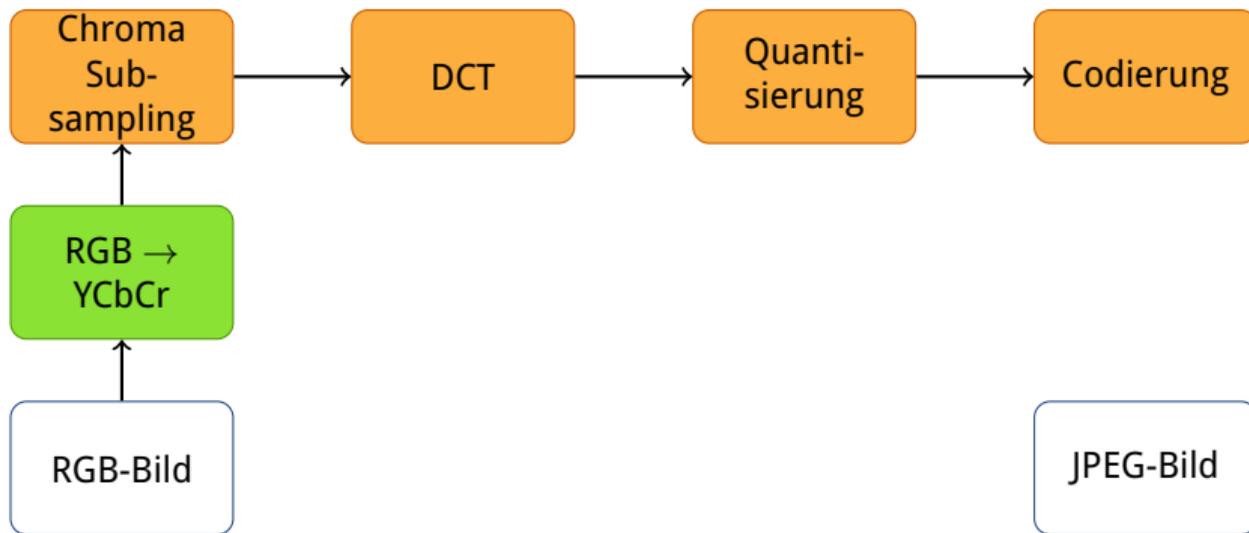
Prinzipschaltbild



Quantisierung der Koeffizienten durch geeignete Quantisierungsmatrix, Reduktion Wertebereich, hohe Frequenzanteile Null

Vereinfachtes Prinzipschaltbild

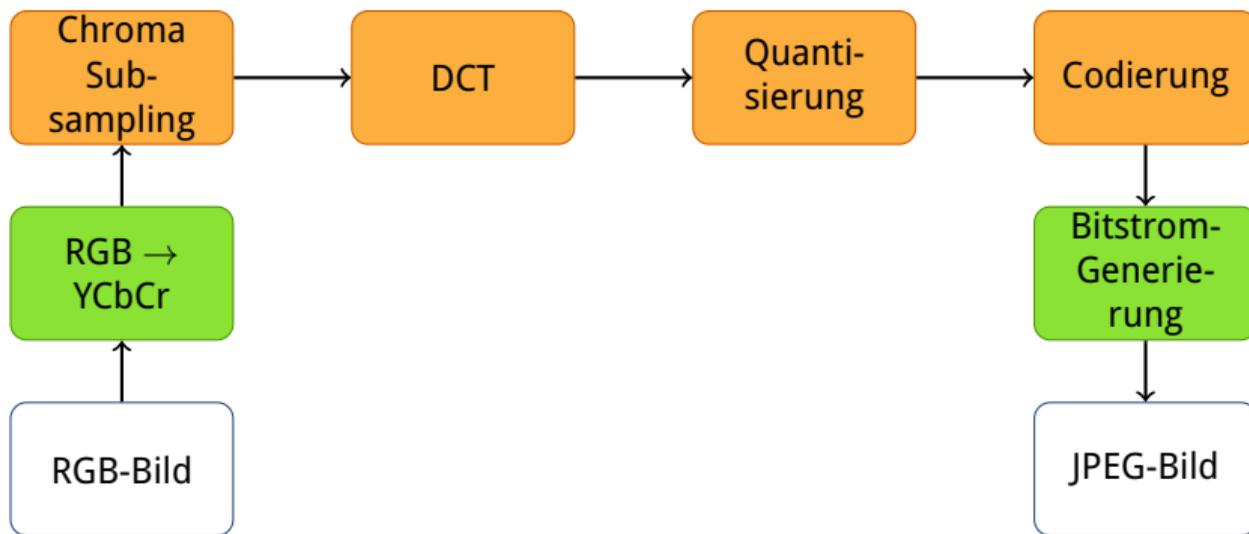
Prinzipschaltbild



Codierung der Koeffizienten mit Huffman, DC:
 prediktive Codierung, AC: Zick-Zack-Scan

Vereinfachtes Prinzipschaltbild

Prinzipschaltbild



Generierung der JPEG/JFIF-Datei mit Metadaten, Huffman-Tabellen, Quantisierungsmatrizen

Vereinfachtes Prinzipschaltbild

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur

DCT Details

DCT Details I

- Verschieben der Werte $f(x, y)$ von 0 bis 255 zu -128 bis 127

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

$$c_k = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & \text{falls } k = 0 \\ 1, & \text{sonst} \end{cases}$$

- x, y Koordinaten im 8x8 Teilbild
 u, v Indizes der 64 DCT Koeffizienten
- Leicht berechnet, da Cosinus-Werte und Werte c_k nur einmal berechnet werden müssen

- Man kann für die 64 möglichen Werte von x, y und die 64 möglichen Werte von u, v die 4096 Parameter $T(x, y, u, v)$ berechnen

$$T(x, y, u, v) = \frac{1}{4} c_u c_v \cos \frac{(2x+1)u\pi}{16} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{16}$$

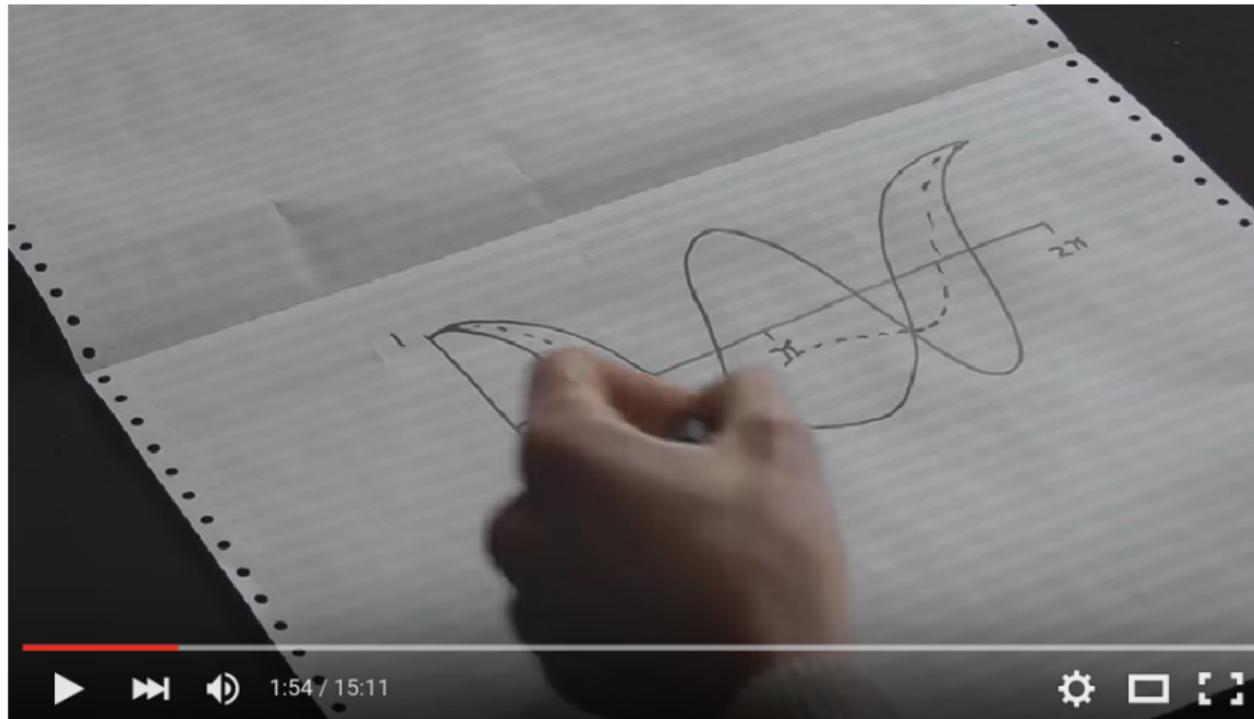
- Dadurch wird die DCT zu:

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 T(x, y, u, v) f(x, y)$$

- Ein Teilbild muß also immer nur mit einer bestimmten Matrix bzw. Basismuster multipliziert werden, um die jeweiligen DCT Koeffizienten zu berechnen
- $F(u, v)$ gibt an, wie stark das Muster aus horizontalen und vertikalen Frequenzen in diesem Teilbild vorkommt
- Zur Rekonstruktion genügt es, das Bild aus den (über die Koeffizienten gewichteten) Anteilen der Basismuster zusammensetzen

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^7 \sum_{v=0}^7 T(x, y, u, v) F(u, v)$$

Video 7.4 JPEG – DCT



👉 JPEG DCT – Computerphile (15:11)

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur

JPEG Beispiel

Beispiel JPEG-Kompression

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur

- Beispielbilder für JPEG-Kompression
- Alle Bildmanipulationen mit GIMP 2.8.2
- Skaliert von Originalgröße im Lanczos-Verfahren
- Gespeichert mit zwei Variablen:
 - "Qualitätsfaktor" von 0-100
 - Chroma-Subsampling

Beispiel JPG

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur



Vergleich losless PNG, 403K

Beispiel JPG

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur



JPEG, 100, kein Chroma-Subsampling, 348K

Beispiel JPG

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur



JPEG, 85, kein Chroma-Subsampling, 78K

Beispiel JPG

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur



JPEG, 85, Chroma geviertelt, 60K

Beispiel JPG

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur



JPEG, 15, kein Chroma-Subsampling, 23K

Beispiel JPG

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur



JPEG, 15, Chroma geviertelt, 21K

Beispiel JPG

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur



JPEG, 10, kein Chroma-Subsampling, 19K

Beispiel JPG

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur



JPEG, 10, Chroma geviertelt, 17K

Beispiel JPG

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur



JPEG, 5, kein Chroma-Subsampling, 14K

Beispiel JPG

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur



JPEG, 5, Chroma geviertelt, 12K

Beispiel JPG

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur



JPEG, 0, kein Chroma-Subsampling, 11K

Beispiel JPG

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur



JPEG, 0, Chroma geviertelt, 9K

Video 7.5: JPEG – Probleme

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur



🔊 JPEG Problems – Computerphile (5:36)

- JPEG hat diverse bekannte Nachteile
 - Block-Artefakte bei hoher Kompression
 - Artefakte, wenn hohe Frequenzanteile bedeutungstragend sind
- Nachfolgestandard: JPEG 2000
 - Bessere Leistung bei hoher Kompression (typisch weniger als 0.25 Bit pro Pixel)
 - wahlweise verlustbehaftet und verlustfrei
 - Progressiver Bildaufbau
 - Kodierung von "Regions of Interest" mit höherer Genauigkeit
 - Alphakanal
- Technisch: Diskrete Wavelet-Transformation statt DCT

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur

Verlustfrei

Verlustfrei

- JPEG erreicht die hohen Kompressionsraten dadurch, daß verlustbehaftet komprimiert wird
- Die direkte Speicherung der Samples ist sehr speicherplatzintensiv
- Ist eine verlustfreie Speicherung möglich, die effektiver in Hinblick auf den Speicherplatz ist?

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur

- JPEG erreicht die hohen Kompressionsraten dadurch, daß verlustbehaftet komprimiert wird
- Die direkte Speicherung der Samples ist sehr speicherplatzintensiv
- Ist eine verlustfreie Speicherung möglich, die effektiver in Hinblick auf den Speicherplatz ist?
- Einige der betrachteten Eigenschaften von Bildern sind unabhängig von der Wahrnehmung
 - Flächigkeit von Farben
 - Getrennte Codierung von Kanälen
- Einige dieser Eigenschaften sind bei synthetischen Bildern noch stärker ausgeprägt
 - Liniengraphiken mit einfarbigen Flächen
- Idee: Optimale Codierung jedes Pixels je nach Umfeld

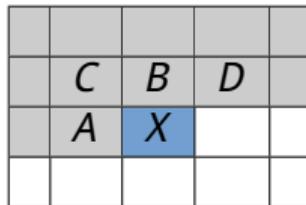
PNG: Grundsätze

- Zweistufiges Verfahren
 - Filter/Prediction
 - Kompression
- In der Regel hängt Farb-/Helligkeitswert eines Pixels von den Pixeln in der Nachbarschaft ab
- Differenz-/Deltakodierung: $[1, 2, 3, 4, 5, 6] \rightarrow [1, 1, 1, 1, 1, 1]$
- Bei PNG wird jedes Pixel in Relation zu den Pixeln links, oben und links oben bestimmt

	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>D</i>	
	<i>A</i>	<i>X</i>		

PNG: Grundsätze

- Zweistufiges Verfahren
 - Filter/Prediction
 - Kompression
- In der Regel hängt Farb-/Helligkeitswert eines Pixels von den Pixeln in der Nachbarschaft ab
- Differenz-/Deltakodierung: $[1, 2, 3, 4, 5, 6] \rightarrow [1, 1, 1, 1, 1, 1]$
- Bei PNG wird jedes Pixel in Relation zu den Pixeln links, oben und links oben bestimmt



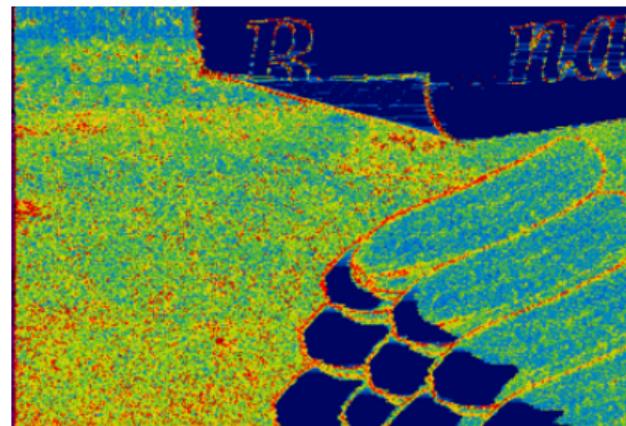
52	55	61	66	70	→	52	55	61	66	70
63	59	55	90	109		63	-4	-4	35	19

Aufwand pro Bit



en.wikipedia.org/wiki/Portable_Network_Graphics

Aufwand pro Bit



dunkel/blau: geringe Bitkosten, grün: mittlere Kosten, rot: hohe Bitkosten

👉 en.wikipedia.org/wiki/Portable_Network_Graphics

PNG Filter

- Fünf unterschiedliche Filter zur Auswahl
 - None
 - Keine Vorfilterung
 - Es wird auf den originalen Pixeldaten gearbeitet
 - Sub
 - Differenzen zu dem jeweils links benachbarten Pixel
 - Up
 - Differenzen zu dem jeweils darüber liegenden Pixel
 - Average
 - Mittelwert aus darüber liegenden und dem links benachbarten Pixel
 - Paeth
 - Es wird aus dem links benachbarten, dem darüber liegenden und dem schräg links oben benachbarten Pixel ein sogenannter Paeth-Predictor-Wert berechnet, welcher das Pixel für die Differenzbildung bestimmt
 - A , B oder C , was am nächsten $p = A + B - C$ ist
 - tie-breaker $A - B - C$
- Pro Zeile & Kanal kann der beste ausgewählt werden

PNG: Filterbeispiele I

52	55	61	66	70	→	52	55	61	66	70
63	59	55	90	109		63	59	55	90	109

None

52	55	61	66	70	→	52	55	61	66	70
63	59	55	90	109		63	-4	-4	35	19

Sub ($X - A$)

52	55	61	66	70	→	52	55	61	66	70
63	59	55	90	109		63	4	-6	24	39

Up ($X - B$)

PNG: Filterbeispiele

52	55	61	66	70	→	52	55	61	66	70
63	59	55	90	109		63	0	-5	30	29

Average $((A + B)/2)$

52	55	61	66	70	→	52	55	61	66	70
63	59	55	90	109		63	-4	-6	29	19

Paeth

PNG: Filterbeispiele

52	55	61	66	70	→	52	55	61	66	70
63	59	55	90	109		63	0	-5	30	29

Average $((A + B)/2)$

52	55	61	66	70	→	52	55	61	66	70
63	59	55	90	109		63	-4	-6	29	19

Paeth

- A, B oder C , was am nächsten $p = A + B - C$ ist
- tie-breaker $A - B - C$

C	B	...
A	X	...

PNG: Kompression & Eigenschaften

- Nach der Filterung folgt die Kompression
- Theoretisch verschiedene Verfahren möglich, bisher spezifiziert nur DEFLATE
 - Substitution + Entropie

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur

PNG: Kompression & Eigenschaften

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

JPEG Verfahren

DCT Details

JPEG Beispiel

Verlustfrei

Bearbeitung

Literatur

- Nach der Filterung folgt die Kompression
- Theoretisch verschiedene Verfahren möglich, bisher spezifiziert nur DEFLATE
 - Substitution + Entropie
- Indexed/Paletten: 1 Kanal, mit 1, 2, 4 oder 8 bit pro Pixel pro Kanal (bpc)
- Grauwerte: 1 Kanal, 1, 2, 4, 8 oder 16 bpc
- Grauwerte & Transparenz/Alphakanal: = 2 Kanäle, 8 oder 16 bpc
- Truecolor (RGB): 3 Kanäle, 8 oder 16 bpc
- Truecolor & Transparenz (RGBA): 4 Kanäle, 8 oder 16 bpc

■ LZ77

- Suche nach identischen Teilstrings
- Sliding Window mit fester Größe
- "Offset" (Distanz) und "Länge" des Teilstrings speichern
- Effiziente Lauflängenkodierung:
111111 wird zu 1, (Offset: -1, Länge:5), 121212 zu 12, (-2, 4)

■ LZ78

- Statt "Offset" und "Länge" zu speichern wird Wörterbuch angelegt und darauf verwiesen

■ LZW

- Grundidee: Initiales statt leeres Wörterbuch

■ DEFLATE

- Erst analog LZ77/LZ78, danach Huffman
- Neben PNG in gzip, zip etc.

Bearbeitung

- Auswahl möglicher Operationen
 - Skalierung
 - Aufbereitung für Druck, Web, etc.
 - Drehung, Entzerrung, Filterung
 - Schnitt, Montage, Manipulation
- Neben der Bildbearbeitung auch die Bildverarbeitung
- Tendentielle Unterteilung
 - Automatische Verarbeitungsketten, z.B. in der Robotik: Bildverarbeitung
 - Interaktive Veränderung von Bildern: Bildbearbeitung

- Bei Punkt-Operationen werden die Werte einzelner Pixel verändert, ohne Nachbapixel zu betrachten
- Beispiel: Änderung der Farbtiefe
- Grauwertbild mit 256 Werten pro Pixel in ein Schwarzweißbild

$$f'(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{falls } f(x, y) > w \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

- w beliebiger Grenzwert (Schwellwert)

Histogramm

- Häufig spielen Histogramme eine Rolle
- Geben an, welche Werte wie oft in den Pixeln vorkommen
- Bei einem Grauwertbild mit 256 möglichen Werten haben wir einen Vektor $h(w)$, $w = 0, \dots, 255$ wobei $h(w)$ die Anzahl der Pixel mit dem entsprechenden Wert angibt
- Typischerweise soll ein Bild den gesamten Bereich eines Histogramms nutzen, sonst wirkt es flach und besitzt wenig Kontrast
- Nutzt ein Grauwertbild mit 8 Bit pro Pixel nur die Grauwerte 50 bis 150, kann man die Werte so spreizen daß der niedrigste bei 0 und der höchste bei 255 liegt:

$$f'(x, y) = \frac{f(x, y) - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}} w_{\max}$$

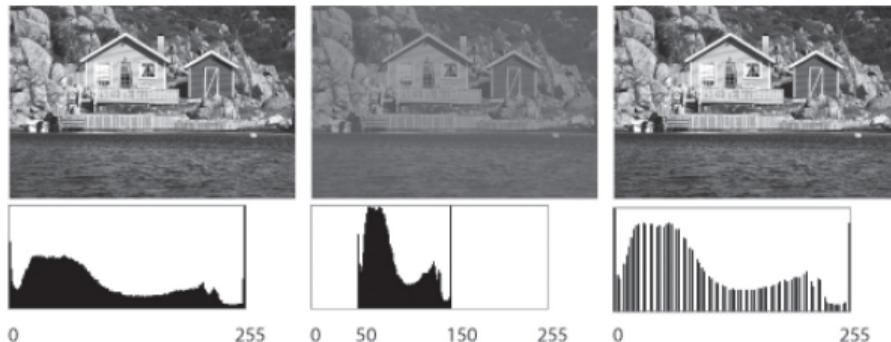
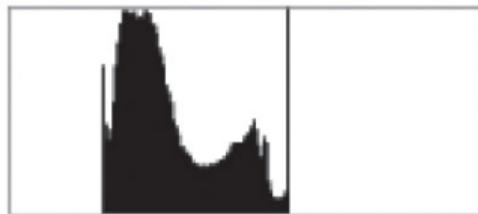


Abbildung 3.12: Grauwertbilder mit Histogrammen. Linkes Bild: Alle Grauwerte kommen vor. Mittleres Bild: Nur Grauwerte zwischen 50 und 150 kommen vor. Rechtes Bild: Spreizung der Grauwerte auf den ganzen Bereich, wobei das Ausgangsbild das mittlere Bild ist.

- Lücken im gespreizten Histogramm entstehen dadurch, daß Zwischenwerte nicht vorhanden waren
- Auch bei Farbbildern prinzipiell möglich
 - Einfach pro Kanal im RGB?
- auch nichtlineare Varianten denkbar



0 255

0 50 150 255

0 255

Abbildung 3.12: Grauwertbilder mit Histogrammen. Linkes Bild: Alle Grauwerte kommen vor. Mittleres Bild: Nur Grauwerte zwischen 50 und 150 kommen vor. Rechtes Bild: Spreizung der Grauwerte auf den ganzen Bereich, wobei das Ausgangsbild das mittlere Bild ist.

Zone	Description
0	Pure black
I	Near black, with slight tonality but no texture
II	Textured black; the darkest part of the image in which slight detail is recorded
III	Average dark materials and low values showing adequate texture
IV	Average dark foliage, dark stone, or landscape shadows
V	Middle gray: clear north sky; dark skin, average weathered wood
VI	Average Caucasian skin; light stone; shadows on snow in sunlit landscapes
VII	Very light skin; shadows in snow with acute side lighting
VIII	Lightest tone with texture: textured snow
IX	Slight tone without texture; glaring snow
X	Pure white: light sources and specular reflections

☞ Zonensystem nach Ansel Adams und Fred Archer (Wikipedia)

Zone	Description
0	Pure black
I	Near black, with slight tonality but no texture
II	Textured black; the darkest part of the image in which slight detail is recorded
III	Average dark materials and low values showing adequate texture
IV	Average dark foliage, dark stone, or landscape shadows
V	Middle gray: clear north sky; dark skin, average weathered wood
VI	Average Caucasian skin; light stone; shadows on snow in sunlit landscapes
VII	Very light skin; shadows in snow with acute side lighting
VIII	Lightest tone with texture: textured snow
IX	Slight tone without texture; glaring snow
X	Pure white: light sources and specular reflections

- Im Gegensatz zu Punkt-Operationen werden bei Filtern neue Pixel berechnet, indem Informationen mehrerer Pixel des Originals betrachtet werden
- Meist in der Nachbarschaft
- Einfach: Glättung, Weichzeichner bei dem jedes Pixel aus dem Mittelwert der Nachbarschaft besteht

$$f'(x, y) = \frac{1}{9} \sum_{i=x-1}^{x+1} \sum_{j=y-1}^{y+1} f(i, j)$$

Filter (contd.)

- Beispiel hier mit neun Pixeln
- Dieser Filter ist linear darstellbar als Faltung der Umgebung mit einer Matrix

$$f'(x, y) = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f(x-1, y-1) & f(x, y-1) & f(x+1, y-1) \\ f(x-1, y) & f(x, y) & f(x+1, y) \\ f(x-1, y+1) & f(x, y+1) & f(x+1, y+1) \end{pmatrix}$$

- Sollen Kontraste nicht weichgezeichnet, sondern verstärkt werden, würde ein einfacher Boost-Filter dabei helfen:

$$f'(x, y) = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f(x-1, y-1) & f(x, y-1) & f(x+1, y-1) \\ f(x-1, y) & f(x, y) & f(x+1, y) \\ f(x-1, y+1) & f(x, y+1) & f(x+1, y+1) \end{pmatrix}$$

Beispiele

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

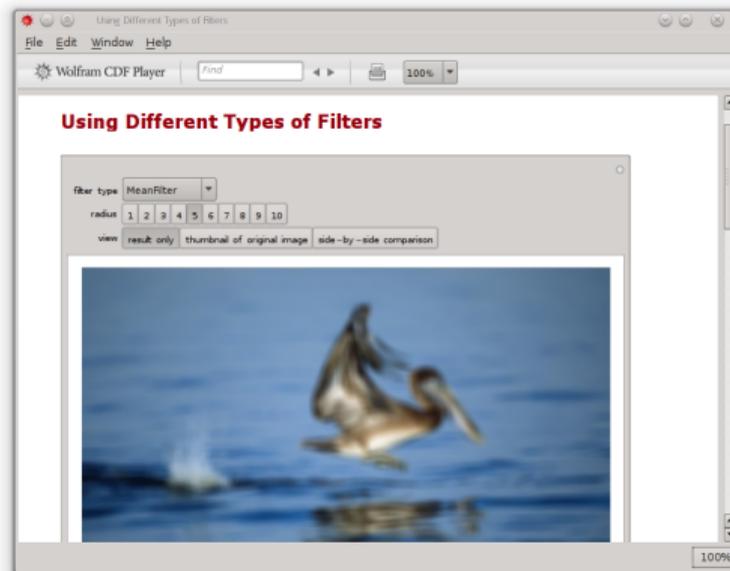
Literatur



Abbildung 3.13: Linkes Bild: Original, Mitte: einfacher Weichzeichner, rechts: einfacher Scharfzeichner (Boost-Filter)

- Neben den gezeigten einfachen Filtern sind auch andere denkbar
 - Wahl der Funktion, mit der die Nachbarpixel einbezogen werden

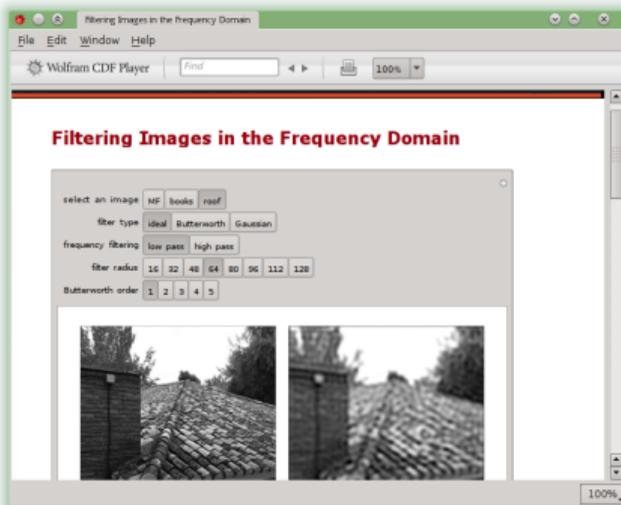
Filter: Beispiel



demonstrations.wolfram.com/UsingDifferentTypesOfFilters/

Filterung im Frequenzraum

- Filter können auch im Frequenzraum angewandt werden
 - Filtern hoher Frequenzen ergibt weichgezeichnete Bilder



☞ demonstrations.wolfram.com/FilteringImagesInTheFrequencyDomain/

Filterung im Frequenzraum: Vor-und Nachteile

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur

■ Vorteile

- Multiplikation statt Matrizenoperation (Faltung)
- Weichzeichnung unabhängig von Größe des Filters

■ Nachteile

- Rechenaufwand der Transformation
- Nicht alle Filter durchführbar (Beispiel: Medianfilter)
- Einige Operationen aufwendiger (Beispiel: Punktoperatoren zur Helligkeitsänderung)
- Ergebnis erst nach inverser Transformation sichtbar

- Auswahl möglicher Operationen
 - Verschiebung
 - Streckung (Verkleinerung, Vergrößerung)
 - Drehung
 - Scherung
- Problem: Sowohl Ausgangsbild wie Zielbild mit festen Rastern

Geometrische Operationen (contd)

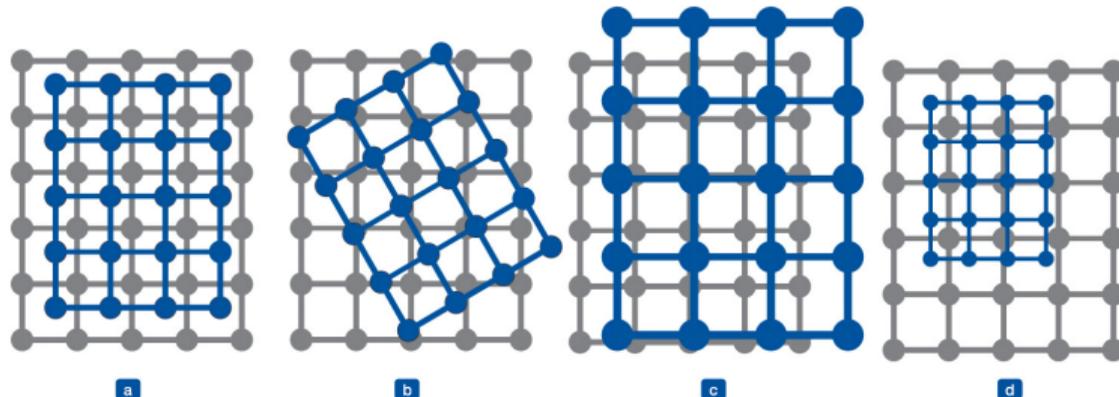


Abbildung 3.14: Probleme bei geometrischen Operationen. Blaues Raster: transformiertes Pixelraster des Originalbildes; graues Raster: Pixelraster des Zielbildes bei (a) Verschiebung, (b) Drehung, (c) Vergrößerung, (d) Verkleinerung

- Wenn man bei der Verkleinerung einem Zielpixel mehrere Ausgangsbild-Werte zuordnen muß kann dies durch Mittelwertbildung erreicht werden
- Problem: Unterabtastung, möglicher Moiré-Effekt

Beispiel: Verkleinerung







Beispiel: Vergrößerung

- Im umgekehrten Fall, ein Pixel auf mehrere, sollte der Wert nicht einfach kopiert werden
- Resultat wäre "verpixelt"
- Einfache Gegenmaßnahme: Weichzeichner als Anti-Aliasing

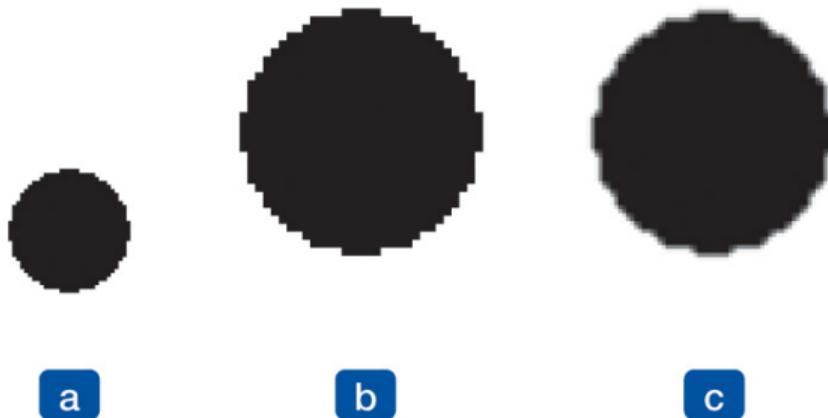


Abbildung 3.16: Alias-Effekt beim Vergrößern. (a) Originalbild, (b) Vergrößerung mit Zoom 200% ohne Antialiasing, (c) mit Antialiasing

Größenänderung allgemein

Licht

Wahrnehmen

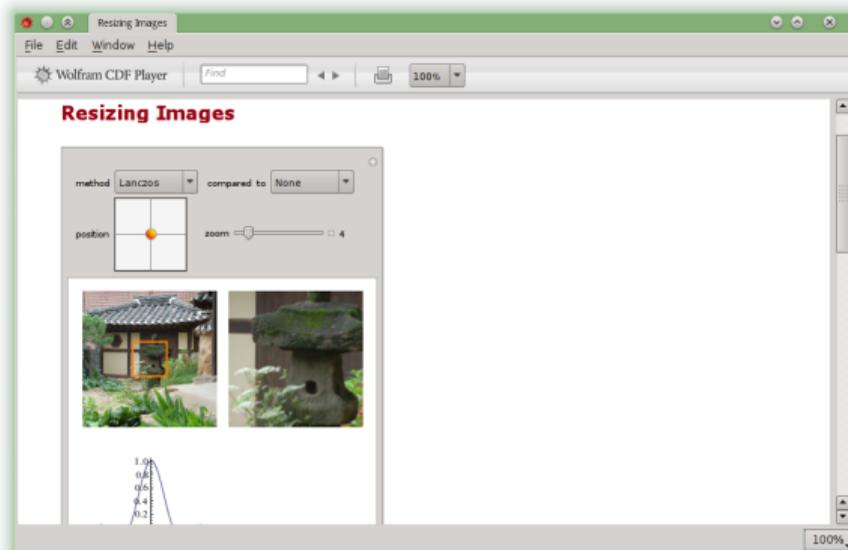
Farbräume

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur



[☞ demonstrations.wolfram.com/ResizingImages/](https://demonstrations.wolfram.com/ResizingImages/)

- Welches Format für welchen Zweck?
- Aufnahme
 - Maximale Auflösung
 - Maximale Farbtiefe
 - RAW; keine Kompression
- Archiv – RAW
- Web und Anwendungen
 - JPEG: digitale Fotos, für das Web stark komprimiert
 - GIF: deprecated, außer für Loops
 - PNG: Moderner und flexibler für Graphiken, mit echtem Alphakanal
- Bilder und Strichzeichnungen
 - Bilder: JPEG
 - Strichzeichnungen: PNG

Video 7.6: Enhance

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur



👉 Enhance (1:40)

Bilder

Jörg Cassens

Institut für Mathematik und Angewandte Informatik

Medieninformatik
WS 2019/2020



medieninformatik

IMAI – Institut für
Mathematik und
Angewandte Informatik

Alle Abbildungen, wenn nicht anders angegeben, aus Malaka et al. [2009].

References I

Licht

Wahrnehmen

Farbräume

Digitalisierung

Kompression

Bearbeitung

Literatur

Rainer Malaka, Andreas Butz, and Heinrich Hussmann. *Medieninformatik – Eine Einführung*. Pearson Studium, Munich, 2009.

Jacques Ninio and Kent A Stevens. Variations on the hermann grid: An extinction illusion. *Perception*, 29(10):1209–1217, 2000. doi: 10.1068/p2985. URL <https://doi.org/10.1068/p2985>. PMID: 11220212.

Dale Purves, George J Augustine, David Fitzpatrick, Lawrence C Katz, Anthony-Samuel LaMantia, James O McNamara, and S Mark Williams., editors. *Neuroscience, 2nd Edition*. Sinauer Associates, Sunderland (MA), 2001.