

# **Computergrafik**

**Vorlesung im Wintersemester 2014/15**

**Kapitel 1: Farbe, Bilder und Perzeption**

Prof. Dr.-Ing. Carsten Dachsbacher  
Lehrstuhl für Computergrafik  
Karlsruher Institut für Technologie



# Organisatorisches

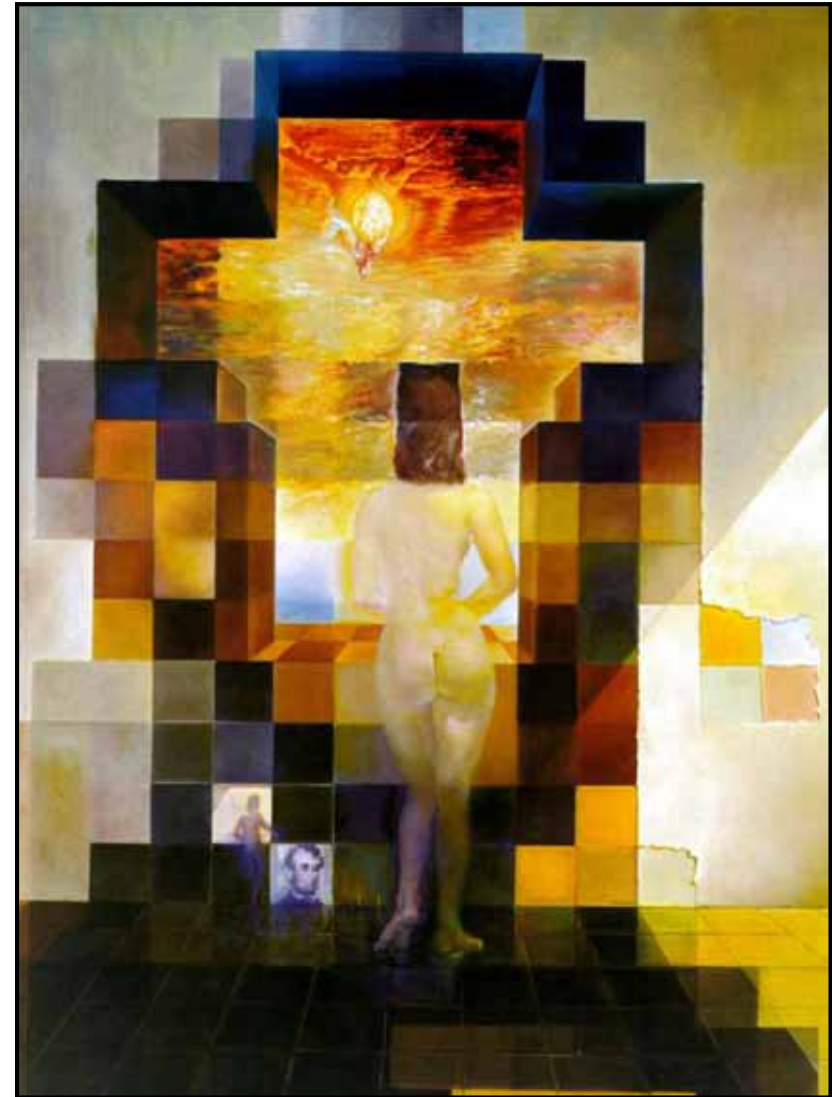


## Termine

- ▶ Donnerstag 24. 10. heute
- ▶ Montag 27. 10. 1. Übung: VM, Organisatorisches, C++, ...
  - ▶ Anmeldung mit ...@student.kit.edu
- ▶ Dienstag 28. 10. Vorlesung
- ▶ Donnerstag 30. 10. keine Vorlesung
- ▶ Montag 3. 11. Übung
- ▶ Dienstag 4. 11. Vorlesung
- ▶ Donnerstag 6. 11. Vorlesung
- ▶ ...

# Inhalt

- ▶ Bilder, Darstellung, Frame Buffer
- ▶ Licht, Sehen und Wahrnehmung
  - ▶ Farbsehen, Darstellung von Farben und Farbräume
  - ▶ Simultankontrast, Weber-Fechner-Gesetz
- ▶ Rasterbilder
  - ▶ Abtastung
  - ▶ einfache Operationen auf Bildern



**Salvador Dalí**

*"Gala Contemplating the Mediterranean Sea, which at 20 meters becomes the portrait of Abraham Lincoln", 1976 (Dalí Museum, St. Petersburg, Florida)*

# Inhalt



- ▶ Bilder, Darstellung, Frame Buffer
- ▶ Licht, Sehen und Wahrnehmung
  - ▶ Farbsehen, Darstellung von Farben und Farbräume
  - ▶ Simultankontrast, Weber-Fechner-Gesetz
- ▶ Rasterbilder
  - ▶ Abtastung
  - ▶ einfache Operationen auf Bildern



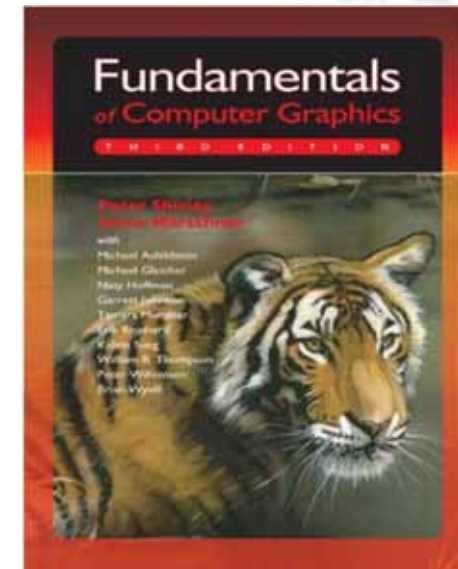
**Salvador Dali**

*"Gala Contemplating the Mediterranean Sea, which at 20 meters becomes the portrait of Abraham Lincoln", 1976 (Dalí Museum, St. Petersburg, Florida)*

# Literatur

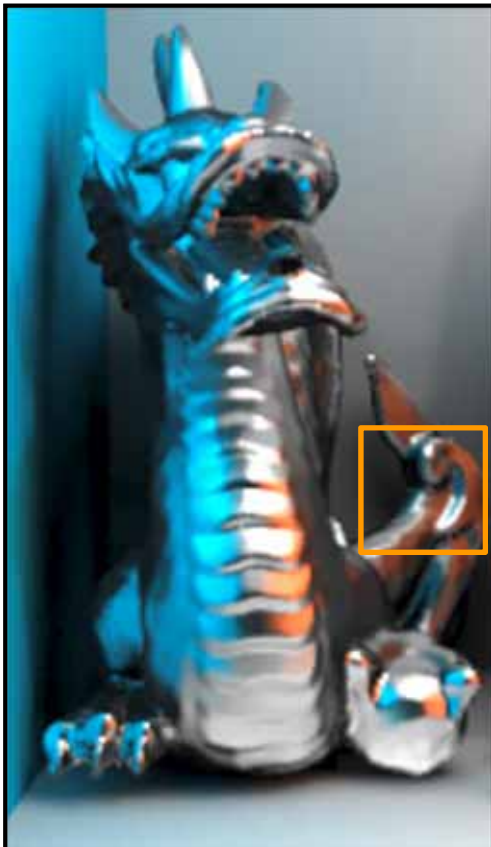


- ▶ **Fundamentals of Computer Graphics,**  
P. Shirley, S. Marschner, 3rd Edition, AK Peters  
→ Kapitel 3 (Raster Images)



# Computergrafik und Farbbilder

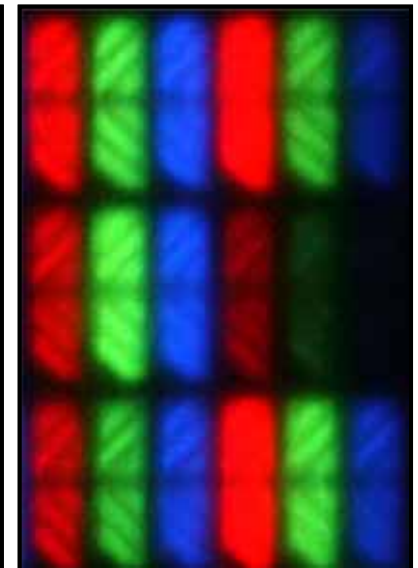
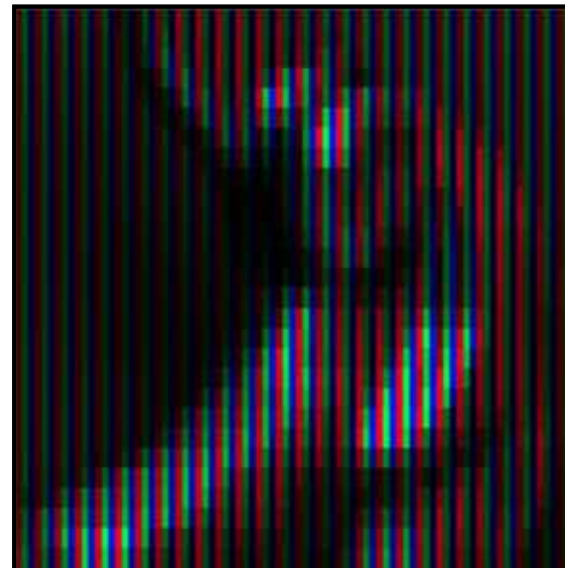
- ▶ CG: Erzeugung und Manipulation von Bildern
  - ▶ Bilder sind – in aller Regel – sogenannte Rasterbilder:  
2D Arrays aus farbigen Pixeln (Picture Elements)
  - ▶ aber: welche Konsequenzen hat das? Was ist Licht? Farbe?



# Raster Displays und Bilder

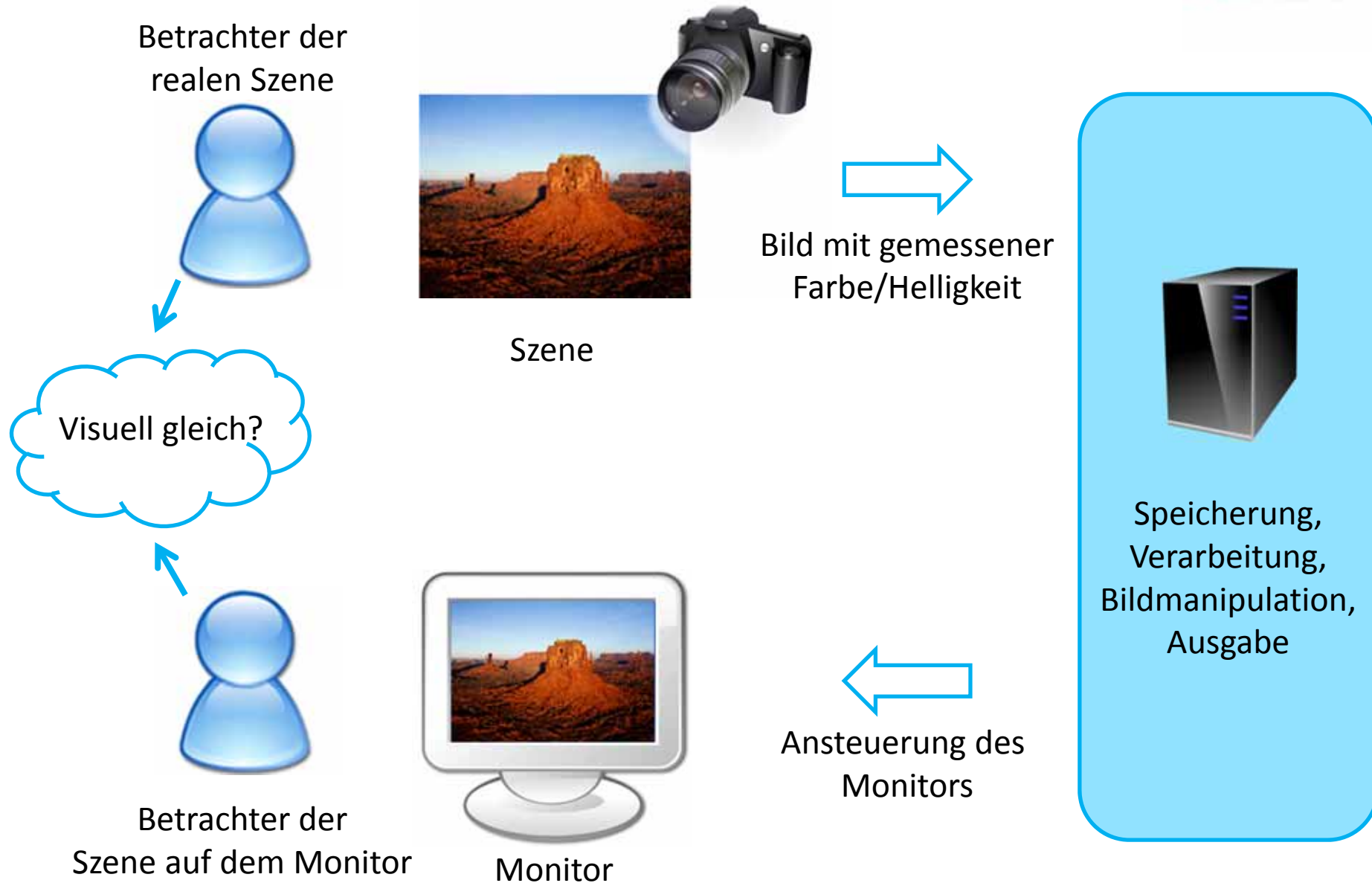


- ▶ Geräte zur Darstellung und Aufnahme von Bildern, z.B.
  - ▶ Monitor: Bildpunkte, Farben durch Mischung aus rot, grün und blau
  - ▶ Digitalkamera: Sensor = 2D Gitter aus lichtempfindlichen Bildpunkten

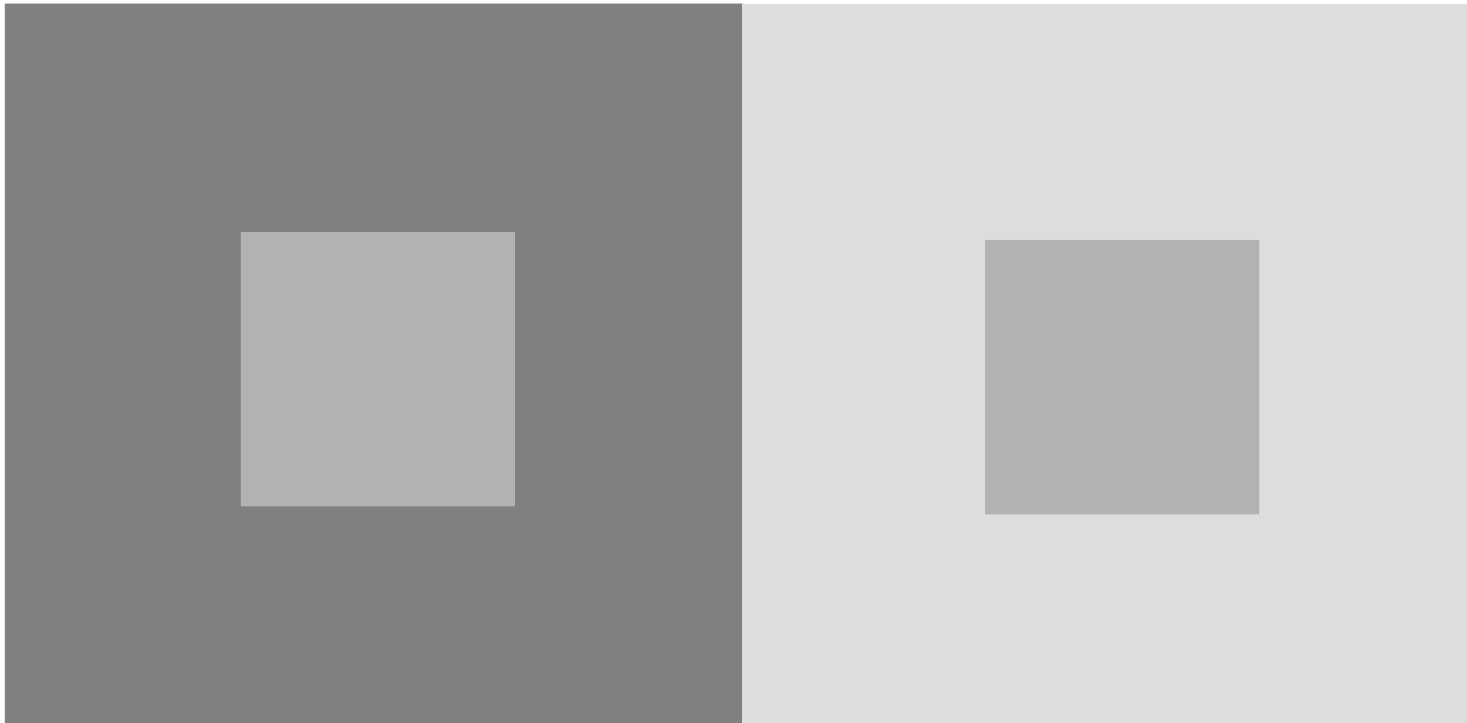




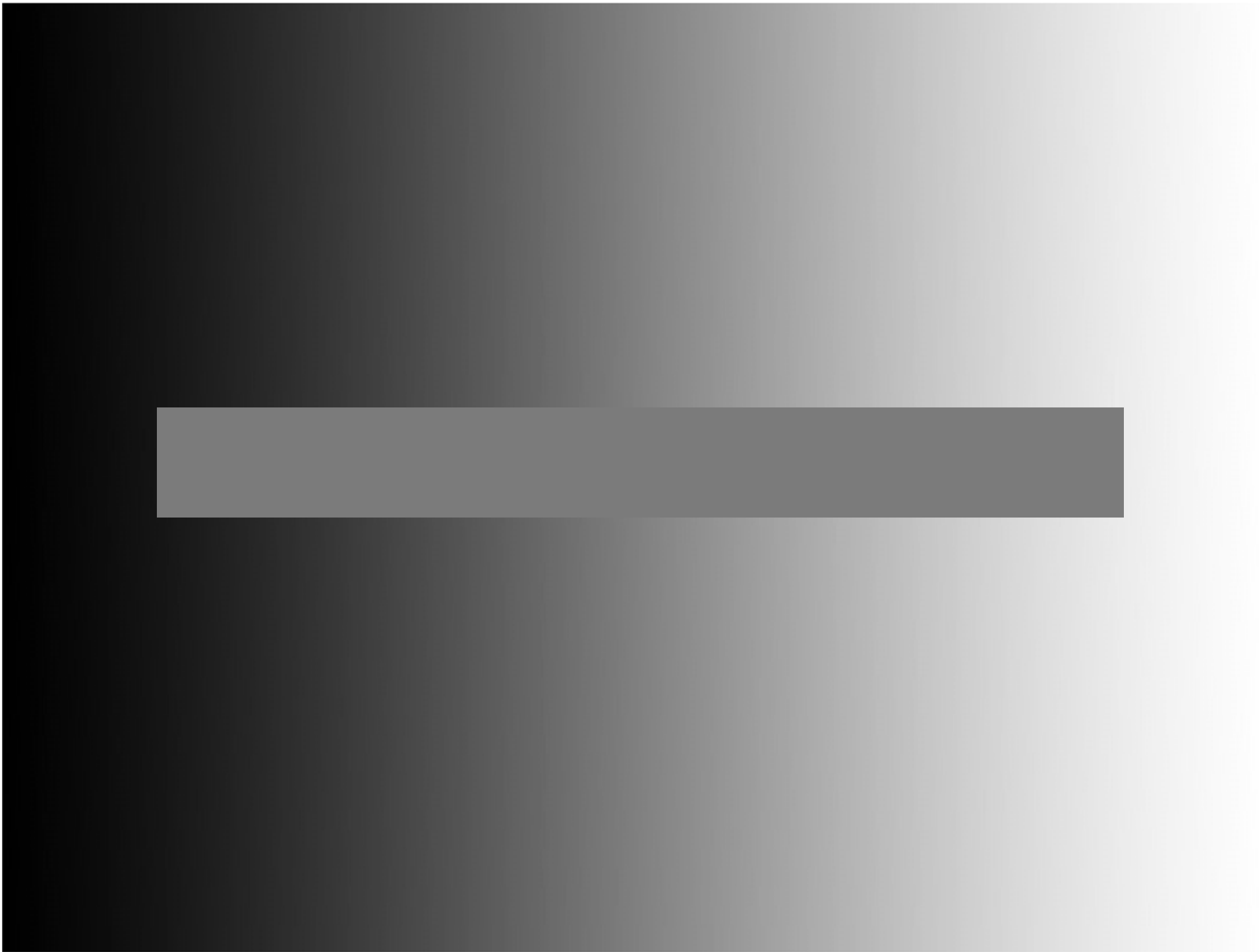
# Aufnahme und Wiedergabe von Bildern





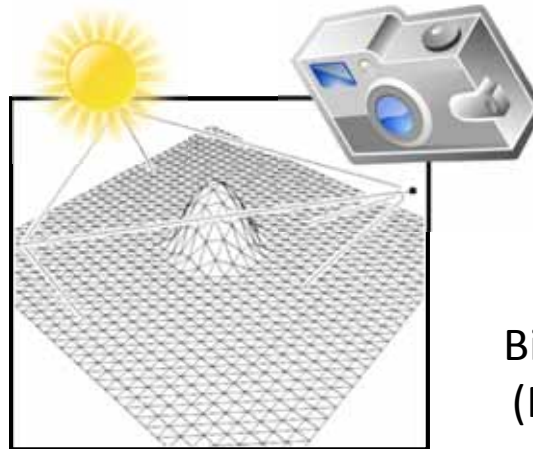








# Erzeugung und Darstellung



→  
Bildsynthese  
(Rendering)

Virtuelle Szene

(Geometrie, Material, Kamera, Lichtquellen, ...)



Betrachter der  
Szene auf dem Monitor



Monitor

←  
Ansteuerung des  
Monitors



Speicherung,  
Verarbeitung,  
Bildmanipulation,  
Ausgabe

# Bsp. physikalisch-basiertes Rendering

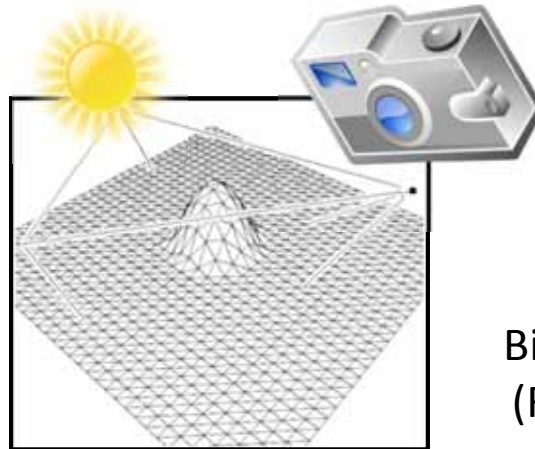


- ▶ fotorealistische Bilder erzeugt man durch Simulation des Lichttransports



Bild: Gianni Melis, berechnet mit „fryrender“

# Erzeugung und Darstellung



➔  
Bildsynthese  
(Rendering)

Virtuelle Szene  
(Geometrie, Material, Kamera, Lichtquellen, ...)

... ergänzt durch reale Daten  
(Texturen, Environment Maps, 3D Scanner, ...)



Speicherung,  
Verarbeitung,  
Bildmanipulation,  
Ausgabe



## Bsp. Augmented Reality

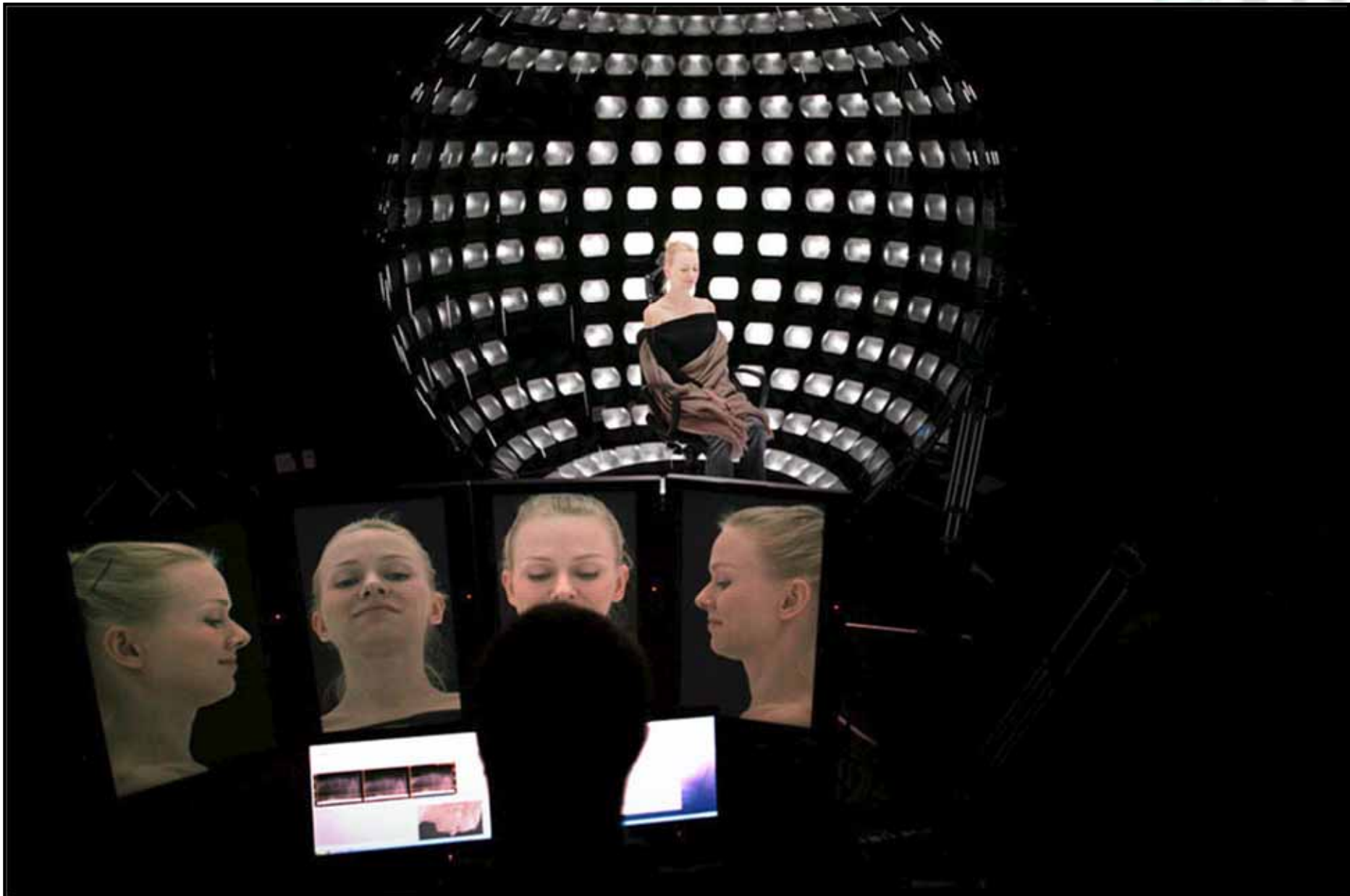


Bild: t3n.de (InsideAR)



Bild: layar.com 16

# Bsp. synthetische Beleuchtung realer Personen



# Vektormonitor (nur als Überblick)

- ▶ im Prinzip ein Oszilloskop
  - ▶ Ablenkspulen (1), Glühkathode (2), Elektronenstrahl (3), Bündelungsspule (4), Phosphorbeschichtung an der Innenseite des Schirms (5)
  - ▶ Elektronen auf einer Phosphorschicht verursachen
    - ▶ Fluoreszenz (Dauer ca.  $22\mu s = 22 \cdot 10^{-6}s$ , verwendet bei Monitoren) und
    - ▶ Phosphoreszenz (ca.  $210ms$ )
    - ▶ Anm. phosphoros griech. lichttragend, keine Phosphorverbindungen
- ▶ Darstellung eines Bildes
  - ▶ Objekte (Linien) kontinuierlich zeichnen
  - ▶ ein Bild wiederholt darstellen
  - ▶ hohe Bildwiederholrate notwendig

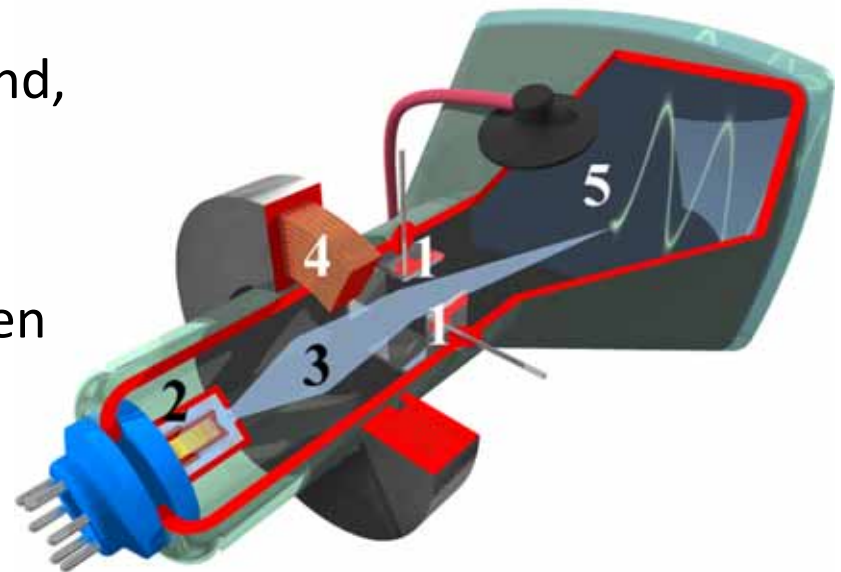


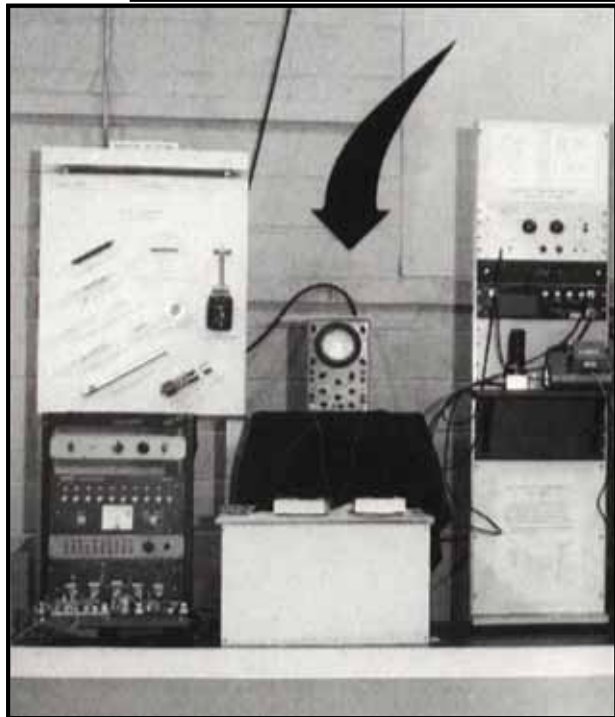
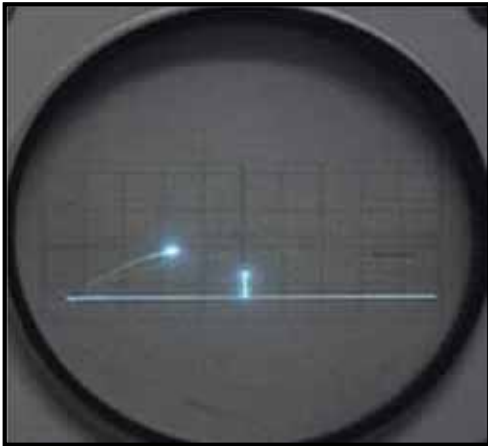
Bild: <http://en.wikipedia.org/wiki/Oscilloscope>



# Vektormonitor (nur als Überblick)



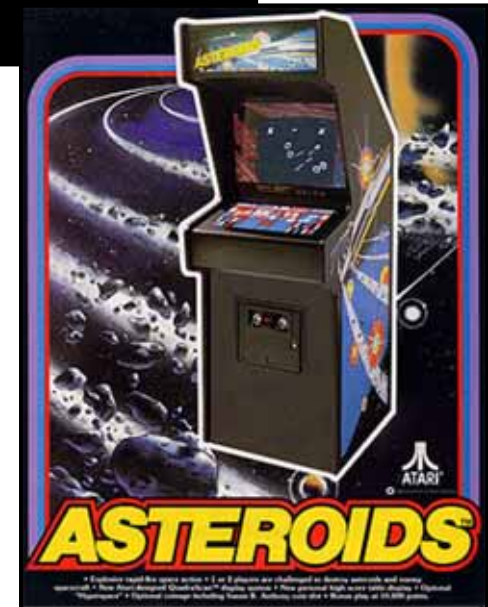
- Darstellung des Bildes: Objekte (Linien) kontinuierlich zeichnen



[www.gamersquarter.com/tennisfortwo/](http://www.gamersquarter.com/tennisfortwo/), William Higinbotham 1958



Asteroids, Atari 1979

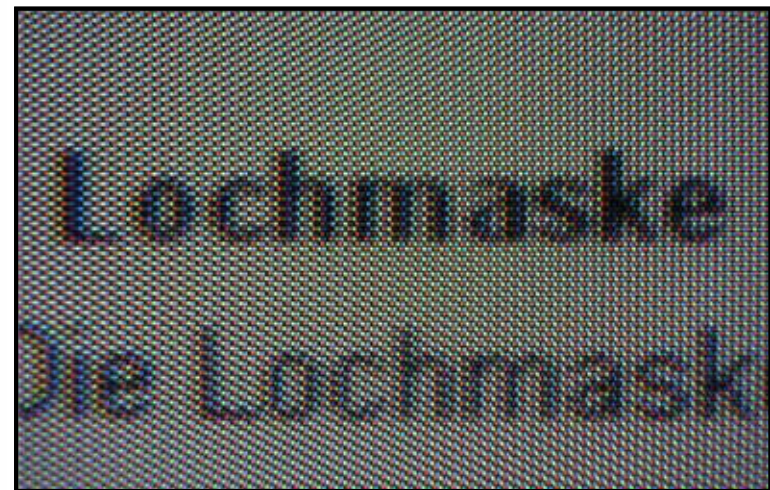
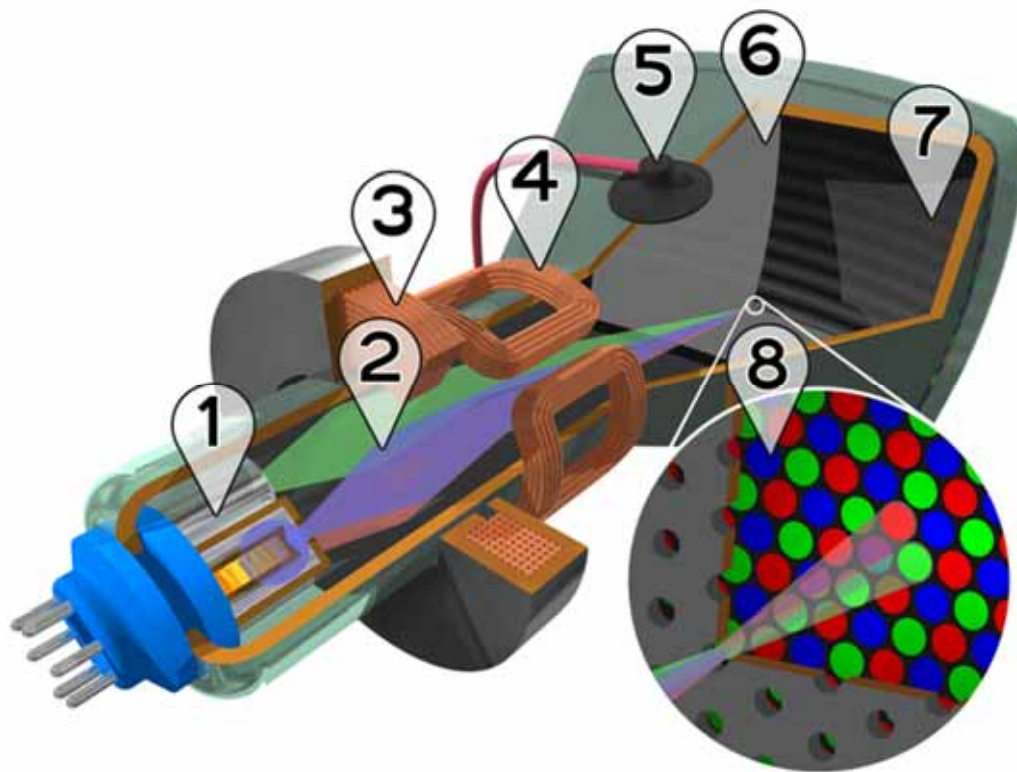


# Röhrenmonitor (CRT, Cathode Ray Tube)



## ▶ Kathodenstrahlröhrenbildschirm

- ▶ Glühkathoden (1), Elektronenstrahlen (2), Bündelungsspulen (3), Ablenkspulen (4), Anodenanschluss (5), Lochmaske (6), Fluoreszenzschicht mit roten, grünen und blauen Bildpunkten (7,8)



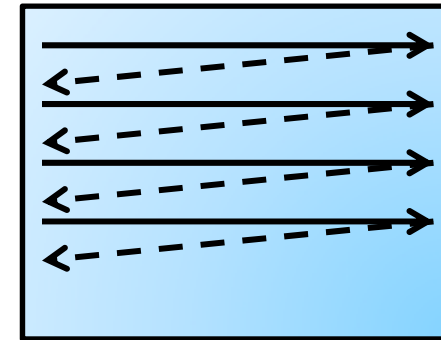
<http://de.wikipedia.org/wiki/Kathodenstrahlröhre>

# Röhrenmonitor (CRT, Cathode Ray Tube)



## ▶ Prinzip der Darstellung

- ▶ das Bild wird zeilenweise aufgebaut (links→rechts, oben→unten)
- ▶ flimmerfreie Darstellung erfordert hohe Geschwindigkeit ( $>50\text{Hz}$ )
- ▶ die Intensität der Elektronenstrahlen (zu dem Zeitpunkt, an dem ein Bildpunkt getroffen wird) bestimmt die Helligkeit der Bildpunkte

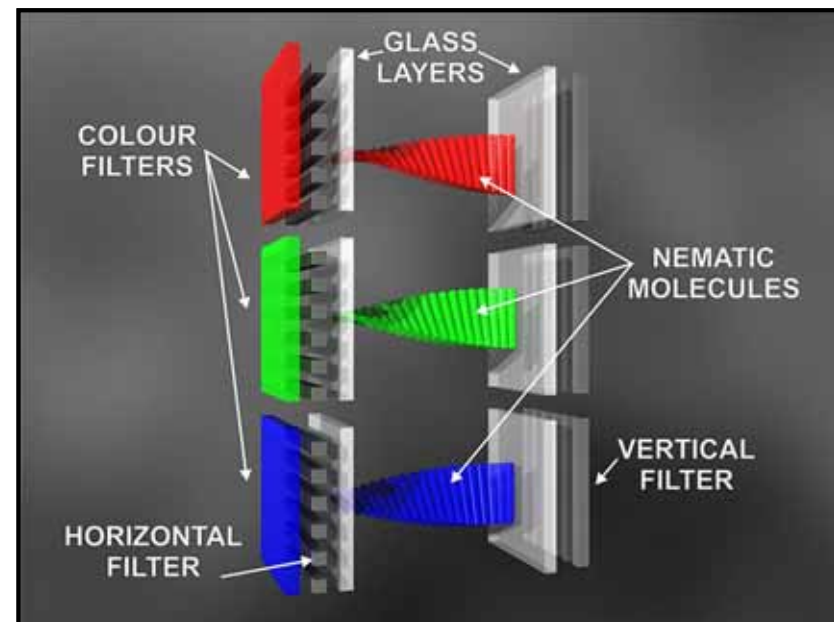
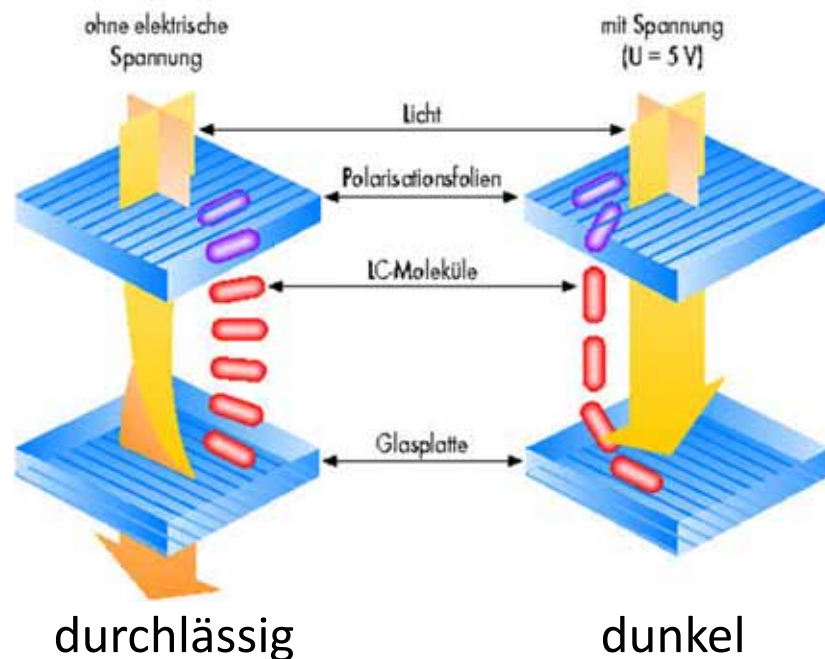
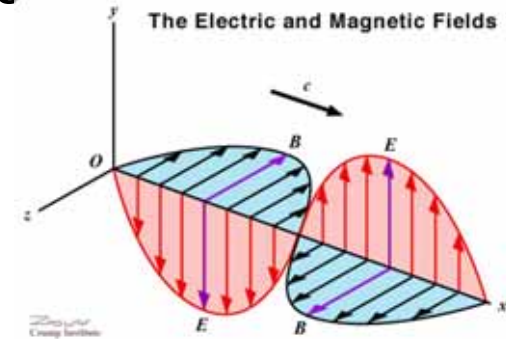


## ▶ hierzu muss das Bild vorliegen

- ▶ naheliegend: speichere Bilder als 2D Array aus Pixeln (Picture Element)
- ▶ für jeden Pixel speichere die Farbe mit 3 Werten für rot/grün/blau
- ▶ **Frame Buffer**: Speicher in dem das Bild für die Darstellung abgelegt ist
- ▶ entscheidender Vorteil gegenüber Vektormonitoren: ist das Bild erst einmal im Frame Buffer, dann ist die Darstellung unabhängig von dessen Berechnungsaufwand

# Flüssigkristallbildschirm (liquid crystal display, LCD)

- ▶ Innenseiten zweier Glasplatten sind mit transparenter Elektrodschicht überzogen; dazwischen befinden sich Flüssigkristalle
- ▶ Polarisationsfilter: 90° zueinander verdreht
- ▶ Anordnung der Flüssigkristalle
  - ▶ ohne Spannung: erreicht durch Beschichtung
  - ▶ mit Spannung: nach dem elektrischen Feld
  - ▶ Flüssigkristalle verändern die Polarisation des Lichts

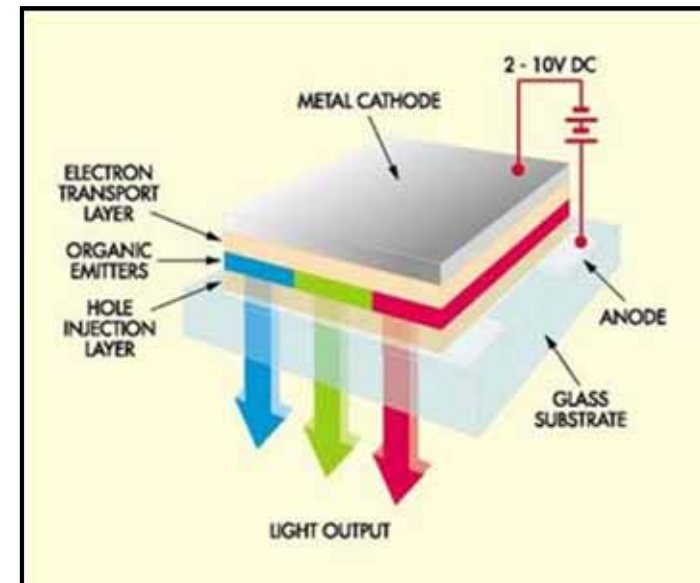




# Weitere Displays



- ▶ weitere lichtemittierende Bildschirme
  - ▶ Plasma
  - ▶ LED (Light Emitting Diode):  
(anorganische) Halbleiter
  - ▶ OLED (organic light emitting diode)
    - ▶ dünnfilmige Displays aus organischen, halbleitenden Materialien
    - ▶ leuchten bei Anlegen einer elektrischen Spannung
- ▶ Beamer / Videoprojektoren
  - ▶ LCD, DLP/DMD, D-ILA, ...
- ▶ elektronisches Papier, E-Paper



## Vektor-Displays

- ▶ Bildaufbau schwierig bei komplexen Szenen
- ▶ Linien und Drahtgittermodelle
- ▶ hohe Auflösung

## Vektor-Grafik (z.B. SVG)

- ▶ wichtig für auflösungs-unabhängige Darstellung

## Rastergrafik

- ▶ wiederholter Bildaufbau ist unabhängig von der Komplexität der Szene
- ▶ typischerweise ausgefüllte, schattierte Flächen
- ▶ endliche Anzahl Pixel: „Aliasing“-Effekte und Moiré Effekte

**wir sprechen zunächst nur über Rasterbilder und Rastergrafik**

# Frame Buffer



- ▶ Stellen Sie sich den Frame Buffer wie folgt vor...

```
#define WIDTH  1024
#define HEIGHT 768

// Array: RGB-Frame Buffer
unsigned char buffer[ WIDTH * HEIGHT * 3 ];

for ( y = 0; y < HEIGHT; y++ ) {
    for ( x = 0; x < WIDTH; x++ ) {
        // Werte zw. 0 und 255 (niedrigste und höchste Intensität)
        buffer[ ( x + y * WIDTH ) * 3 + 0 ] = „Rot-Wert“;
        buffer[ ( x + y * WIDTH ) * 3 + 1 ] = „Grün-Wert“;
        buffer[ ( x + y * WIDTH ) * 3 + 2 ] = „Blau-Wert“;
    }
}





CopyImageToScreen( buffer );
```

- ▶ Darstellung am Bildschirm über API-Funktionen

# Rasterbilder: diskrete Repräsentation eines Bildes



- ▶ Bild  $I$  ist rechteckiges Gitter von Pixeln („Bildpunkten“)
- ▶ Auflösung: Breite  $\times$  Höhe = Anzahl der Pixel
  - ▶ z.B.  $640 \times 480$ ,  $1280 \times 1024$ ,  $1920 \times 1080$  (FullHD),  $3840 \times 2160$  (4K), ...
- ▶ Farbtiefe: Anzahl Bits pro Pixel

Typ	Farbe	Farbtiefe
binär, schwarz/weiß	$I: \mathbb{N}^2 \rightarrow [0,1]$ 	1 Bit/Pixel
Graustufen, Intensität	$I: \mathbb{N}^2 \rightarrow [0,255]$ 	8 Bit/Pixel (12 Bit/Pixel medizinische Anwend.)
Farbe mit Farbtabelle (lookup table)	$I: \mathbb{N}^2 \rightarrow LUT([0,255])$ 	8 Bit/Pixel $\rightarrow$ 256 Einträge 24 Bit/LUT Eintrag
True Color	$I: \mathbb{N}^2 \rightarrow [0,255]^3$ 	24 Bit/Pixel
High Dynamic Range	$I: \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{R}_+^3$ (zur Darstellung i.d.R. auf 8 Bit abgebildet)	3 $\times$ 32 Bit Floating Point/Pixel

# Vorschau: Auflösung und Aliasing



512 × 512



64 × 64



32 × 32



# Displays, Frame Buffer und Darstellung



- ▶ typische Werte für Frame Buffers
  - ▶ Auflösung  $1920 \times 1080 \approx 2$  Mio. Pixel, Farbtiefe: 24 Bit (je 8 Bit RGB)
  - ▶ ca. 6 MB Daten  $\rightarrow$  ca. 356MB/s Bandbreite bei 60Hz Darstellung
  - ▶ früher: 16-Bit Framebuffer (5 Bit rot, 6 Bit grün, 5 Bit blau „HiColor“)





# Frame Buffer (historisches)



- ▶ 8 Bit Frame Buffer (256 frei wählbare Farben aus  $2^{24}$ )
  - ▶  $I: \mathbb{N}^2 \rightarrow LUT([0,255])$
  - ▶ u.a. VGA-Grafikkarten, GIF-Dateiformat





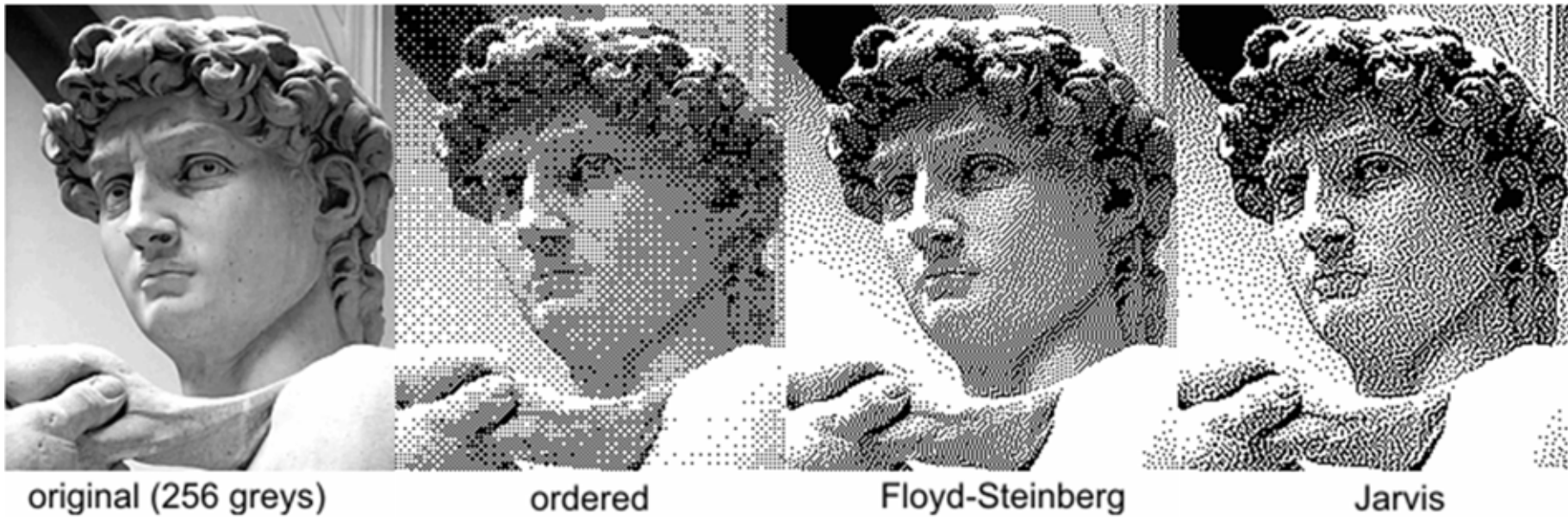
# Frame Buffer (historisches)



- ▶ 8 Bit Frame Buffer (256 frei wählbare Farben aus  $2^{24}$ )
- ▶ Fehlerdiffusion (Dithering): fehlende Farben durch bestimmte Anordnung der verfügbaren Farben nachbilden
- ▶ Wahrnehmung als Mischfarben



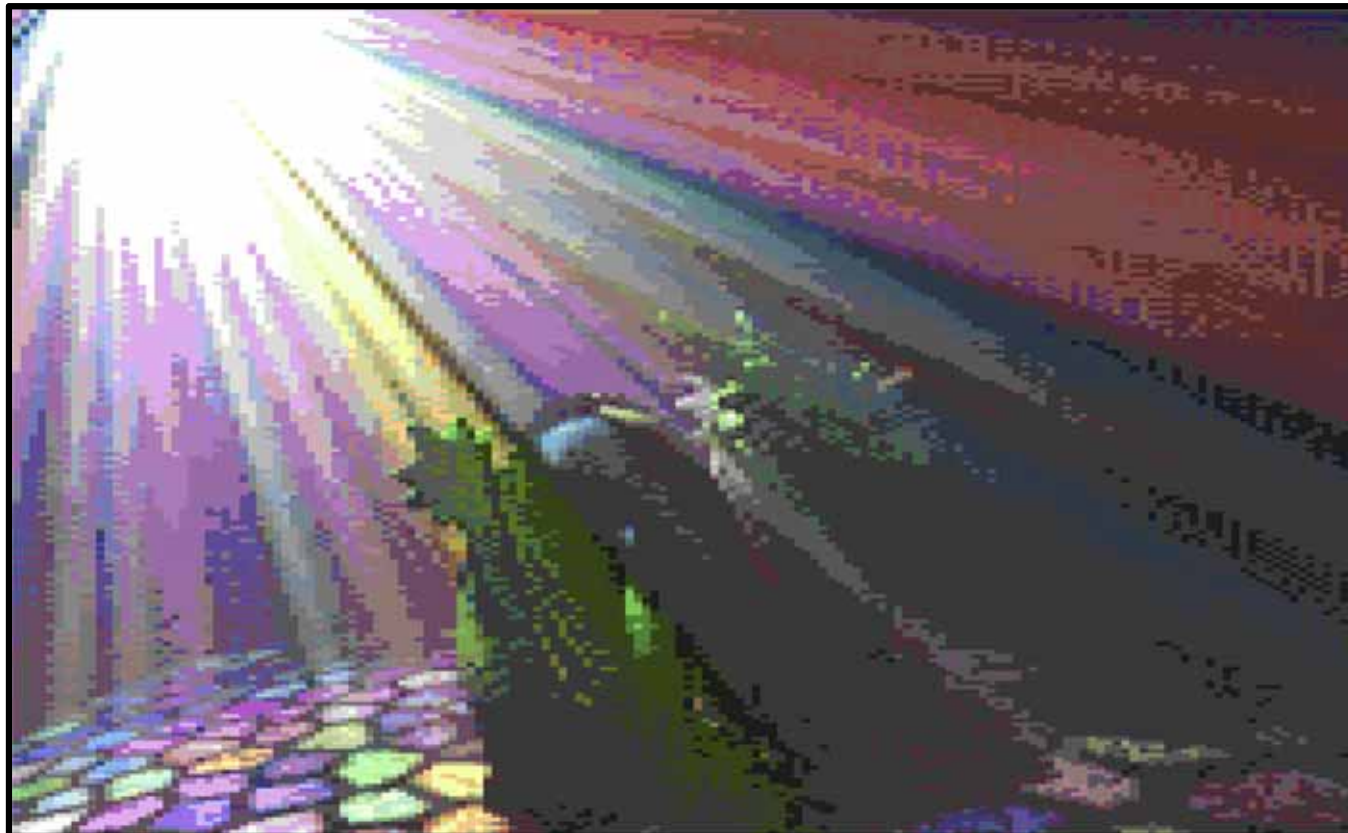
# Bsp. Dithering



# Frame Buffer (nostalgisches...)



- ▶ Commodore C64 (1982)
  - ▶ 160 × 200 Pixel, je 4 Farben (aus 16) pro 4 × 8 Block



# Darstellung der Bilder

- ▶ höhere RGB-Werte bedeuten hellere Farben
  - ▶ aber was genau passiert mit diesen Werten?  
wie hell werden sie dargestellt/erscheinen sie?
- ▶ Beschreibung der Abbildung Wert  $\rightarrow$  Helligkeit durch eine Transferfunktion  $f$  (mit Werten  $[0, N]$ )

$$f: [0, N] \rightarrow [I_{min}, I_{max}]$$

- ▶ diese Transferfunktion ist bestimmt durch
  - ▶ (physikalische) Eigenschaften des Displays
  - ▶ gewünschte Darstellungscharakteristika

# Transferfunktion



## Einschränkungen

- ▶ maximale Displayhelligkeit  $I_{max}$ 
  - ▶ wie hell kann ein Pixel sein?
  - ▶ LCD: typ. <10% (!) der Helligkeit der Hintergrundbeleuchtung
  - ▶ Projektor: Leistung der Lampe, Filter, Optik
- ▶ minimale Displayhelligkeit  $I_{min}$ 
  - ▶ wie viel Licht emittiert das Display für schwarze Pixel?
  - ▶ Streuung von Elektronen bei CRTs, Polarisierungsqualität bei LCDs, ...
- ▶ am Display reflektiertes Umgebungslicht  $k$ 
  - ▶ in der Praxis großer Einfluss auf den Kontrast (daher große Anstrengungen Displays mit gutem Schwarzwerten zu konstruieren)
  - ▶ ein typischer Wert: 5% von  $I_{max}$  (in einem Büro)
  - ▶ daher: dunkle Wände/Decken in Kinos!



# Transferfunktion



## Dynamikumfang

- ▶ ... beschreibt den erreichbaren Kontrast:  $R_d = \frac{I_{max}+k}{I_{min}+k}$
- ▶ Beispiele (Werte nur zur Orientierung):
  - ▶ LCD Bildschirm unter schlechten/guten Bedingungen 20:1 bis 100:1
  - ▶ (Foto-)Druck 30:1 bis 80:1
  - ▶ Film (Negative direkt betrachtet) 1000:1
  - ▶ High Dynamic Range Display 10000:1
- ▶ Hinweis: Abschätzungen auf den nächsten Folien nehmen  $k = 0$  an und betrachten monochrome Bilder bzw. eine Primärfarbe

$I_{max}$  ↓

Clamping/  
Abschneiden



andere  
Skalierung





$I_{min} \uparrow$

Clamping/  
Abschneiden



andere  
Skalierung



$I_{min} \uparrow$  und  $I_{max} \downarrow$



# Transferfunktion

## Wie hätten wir die Transferfunktion gerne?

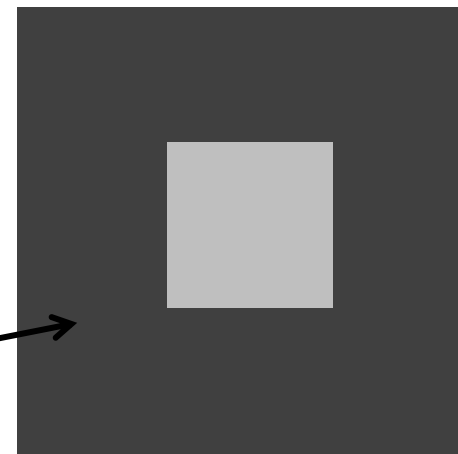
- ▶ aufeinander folgende Pixelwerte sollen keinen sichtbaren Helligkeitsunterschied verursachen – sonst würde man in glatten Bildbereichen Bänder erkennen (so wie rechts im Bild)
- ▶ Experimente zeigen: wir nehmen einen Helligkeitsunterschied von ca. 2% wahr
  - ▶ d.h. in dunklen Bereichen benötigen wir (absolut) kleinere Schritte



Just Noticeable  
Difference (JND)

$$\frac{\Delta L_{JND}}{L} = \text{const} \approx 1\% \text{ bis } 2\%$$

Hintergrundhelligkeit



# Transferfunktion



## Bestimmen der Transferfunktion

- ▶ ~2% Helligkeitsunterschied führt zu einer Exponentialfunktion:  
 $0 \mapsto I_{min}; \quad 1 \mapsto 1.02 \cdot I_{min}; \quad 2 \mapsto (1.02)^2 \cdot I_{min}; \quad 3 \mapsto \dots$
- ▶  $\log 1.02 \approx \frac{1}{120}$ , d.h. wir benötigen 120 Schritte für eine Dekade  
Dynamikumfang (240 für LCDs mit 100:1, 360 für Film mit 1000:1, 480 für HDR-Displays mit 10000:1)
- ▶ 8-Bit sind also gerade genug für LCDs!
- ▶ wie sähe es mit linearer Quantisierung aus?  
(linear bedeutet: gleich große Helligkeitsschritte)
  - ▶ ein Schritt muss  $< 2\%$  von  $I_{min}$  sein
  - ▶ wir müssen Helligkeiten bis  $I_{max}$  darstellen
  - ▶ wir benötigen also  $\frac{I_{max}-I_{min}}{0.02 \cdot I_{min}} \approx 50 \cdot R_d$  Schritte
    - ▶ mit Dynamikumfang  $R_d = \frac{I_{max}+k}{I_{min}+k}$  und Annahme  $k = 0$
  - ▶ 5000 für LCDs ( $R_d = 100:1$ ), 500000 für HDR-Displays, ...

## Quantisierung in der Praxis

- ▶ Option 1: lineare Quantisierung mit  $I(n) = (n/N)I_{max}$ 
  - ▶ einfach und praktisch, Arithmetik mit Pixel-Werten
  - ▶ viele Quantisierungsschritte (→ höherer Speicherbedarf)
  - ▶ verwendet bei der Berechnung von Bildern
- ▶ Option 2: potenzfunktionsbasierte Quantisierung  $I(n) = (n/N)^{\gamma} I_{max}$ 
  - ▶ kommt der idealen Exponentialfunktion nahe
  - ▶ aber welcher Exponent? muss mit angegeben werden!
  - ▶ meist genügen 8 Bit, 12 Bit für anspruchsvolle Anwendungen
  - ▶ Umwandlung in lineare Werte vor Berechnungen
  - ▶ oft verwendet bei der Speicherung von Bildern
- ▶ **Achtung:** üblicherweise gleicht die Transferfunktion von Displaysystemen selbst einer potenzfunktionsbasierten Quantisierung

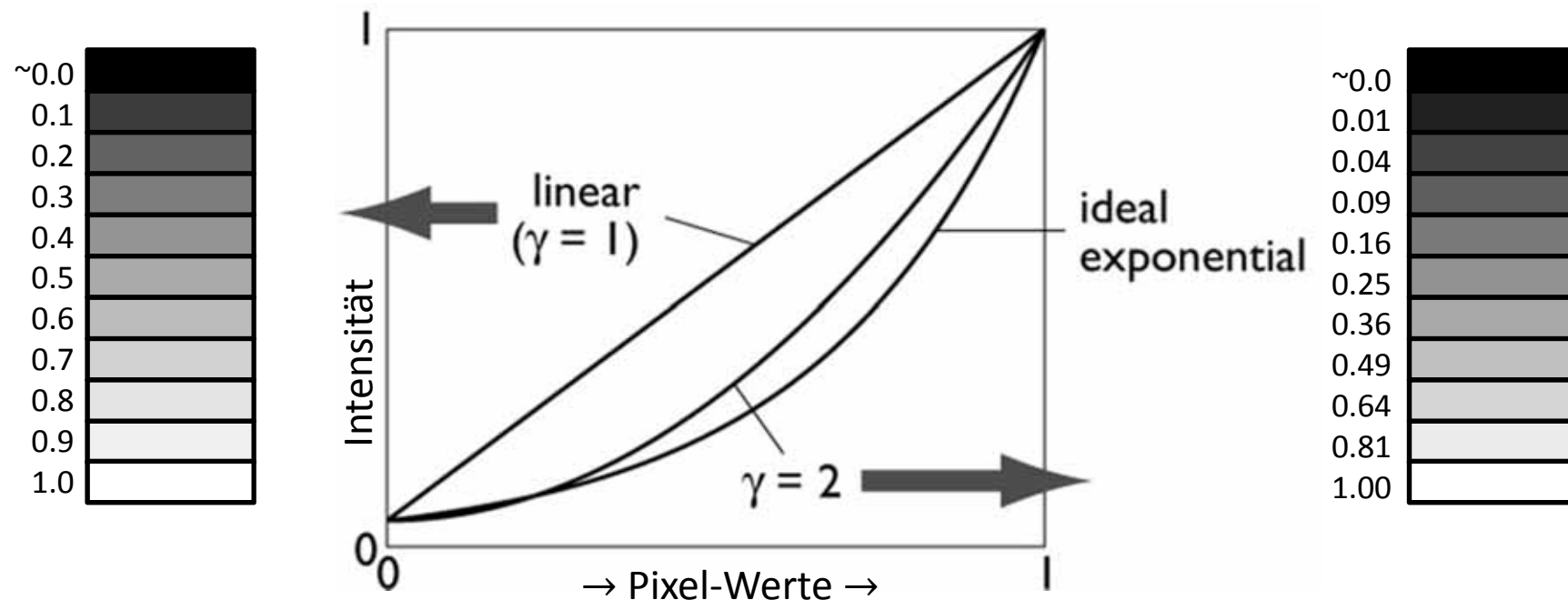


# Transferfunktion



## Simulierte Darstellung

- ▶ linearen Quantisierung (links)
- ▶ potenzfunktionsbasierte Quantisierung (rechts) ist sinnvoll, weil
  - ▶ nahe an der perzeptuell idealen Quantisierung
  - ▶ erlaubt akzeptable Qualität mit 8-Bit Quantisierung
  - ▶ **Achtung Verwechslungsgefahr** – CRTs/Displaysysteme verhalten sich auch so: Helligkeit  $\propto (\text{Volt})^2$



# Gamma-Korrektur



- ▶ aus technischen Gründen bildet ein idealer Monitor ( $I_{min} = k = 0$ ,  $I_{max} = 1$ ) einen Pixel-Wert  $n$  mit  $N$  Schritten (z.B.  $N = 255$  bei 8 Bit) auf die Intensität  $I(n)$  ab:

$$I(n) \propto (n/N)^\gamma$$

- ▶ Gamma-Wert  $\gamma$  charakterisiert das Display
- ▶ üblicherweise berechnen wir (in der Computergrafik) Pixel-Werte  $a$  in einem linearen Raum mit ausreichend hoher Genauigkeit
  - ▶ ... und möchten bei der Darstellung ein lineares Verhalten („doppelter Wert, doppelt so hell“)
- ▶ Pixel-Werte werden daher **direkt vor der Darstellung** einer „Gamma-Korrektur“ unterzogen
  - ▶ damit  $I(n) \propto a$  gilt verwenden wir

$$n \propto a^{1/\gamma}$$

- ▶ diese Korrektur wird unabhängig für jede Primärfarbe durchgeführt

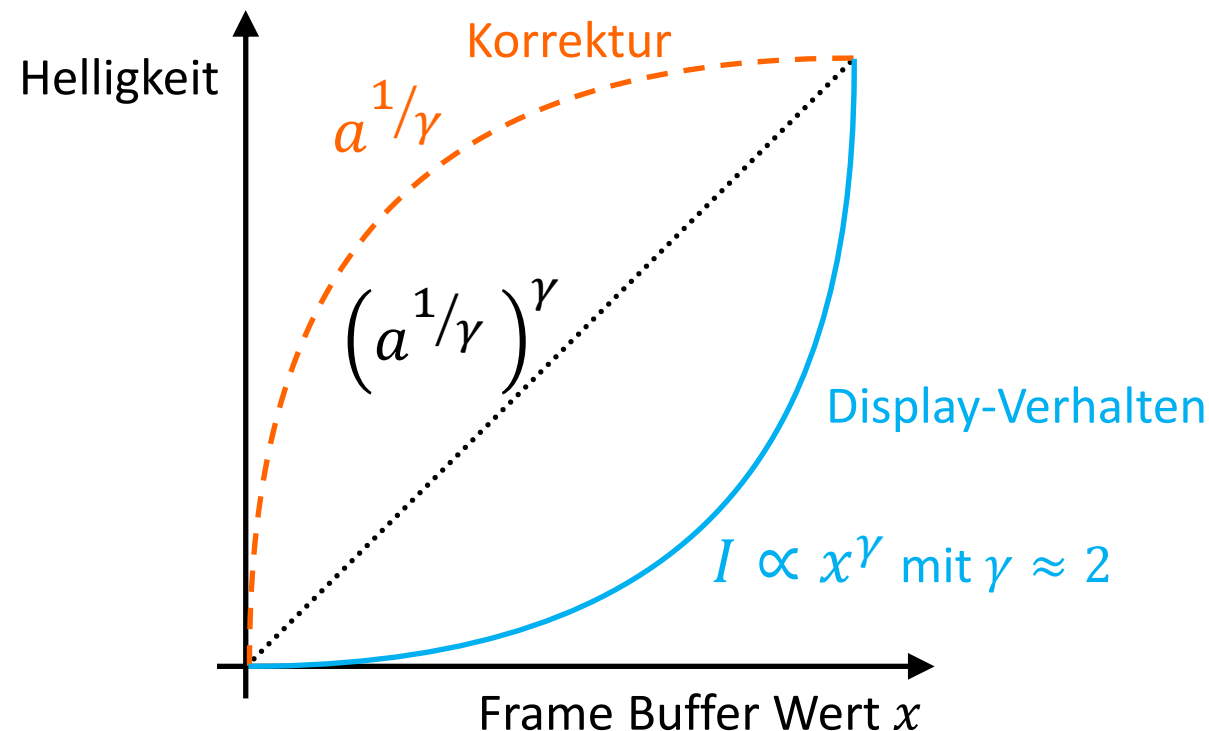


# Gamma-Korrektur



## Zusammenfassung

- ▶ aufgrund der Eigenschaften der menschlichen Wahrnehmung genügen vergleichsweise wenige Stufen nur mit exponentieller Quantisierung
- ▶ Displays weisen aus technischen Gründen ein ähnliches Verhalten auf
- ▶ wenn wir mit linearen Werten rechnen, benötigen wir Gamma-Korrektur
- ▶ Rasterbilder werden manchmal bereits Gamma-korrigiert gespeichert



# Gamma-Korrektur

## Beispiele

- ▶ ohne Gamma-Korrektur (oder mit zu kleinem  $\gamma$ ) sehen Bilder zu dunkel und übersättigt aus



korrigiert mit einem  $\gamma$  zu klein für das Display



mit korrektem  $\gamma$



korrigiert mit einem  $\gamma$  zu groß für das Display

**3 . 0**

**2 . 8**

**2 . 6**

**2 . 4**

**2 . 2**

**2 . 0**

**1 . 8**

**1 . 8**

**1 . 6**

**1 . 4**

**1 . 2**

**1 . 0**

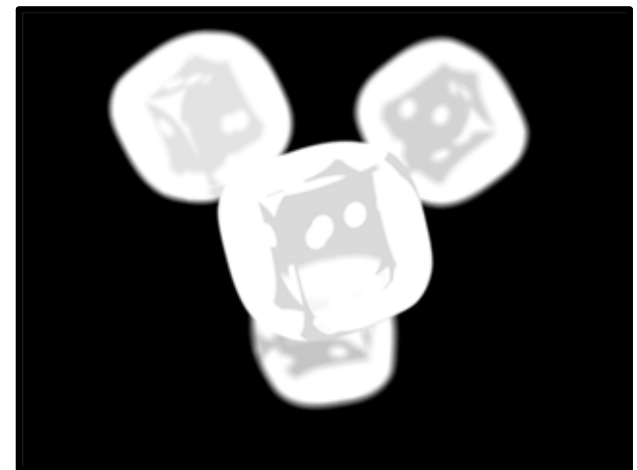
**0 . 8**

**0 . 6**

# Alpha-Kanal

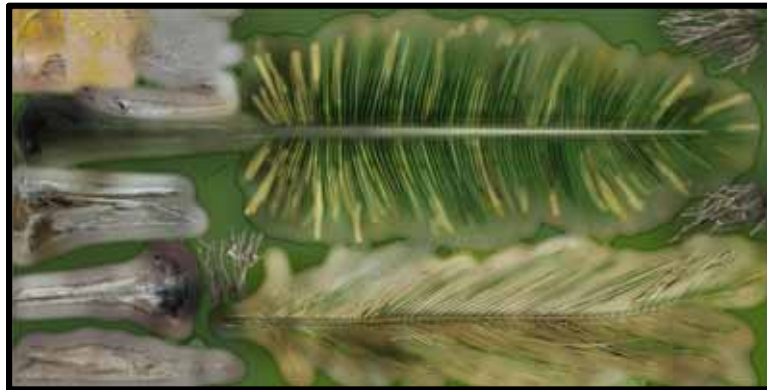
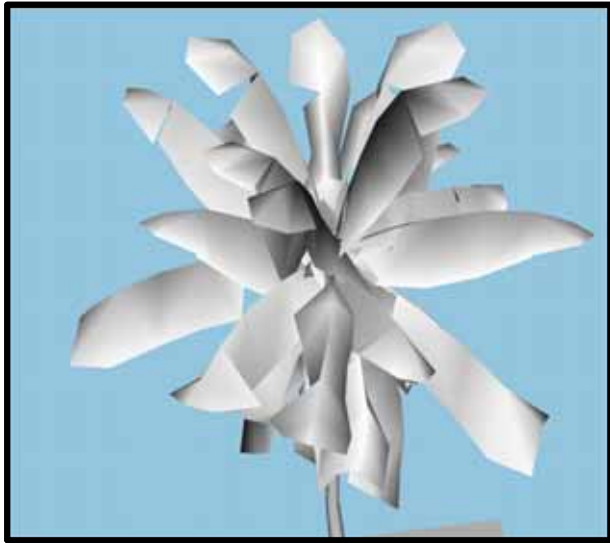


- ▶ oft werden Bilder mit 32 Bit/Pixel kodiert bzw. gespeichert
  - ▶ z.B. im sogenannten sog. RGBA Format:  
24 Bit Farbinformation und zusätzlich 8 Bit Alpha-Kanal  
( $\alpha$  = Opazität, Gegenteil von Transparenz)
  - ▶ verwendet im Frame Buffer der Grafikkarte, PNGs, Texturen, ...
- ▶ essentiell für Bildbearbeitung/Manipulation, Matting/Blue-Screen-Techniken, Texturen in der Computergrafik, ...

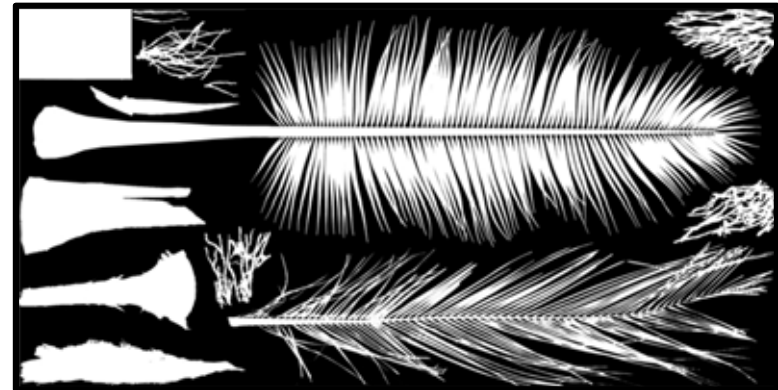


<http://de.wikipedia.org/wiki/Alphakanal>

# Alpha-Kanal



24 Bit Farbinformation



8 Bit Alpha-Kanal  
schwarz = transparent

# Fragestellungen



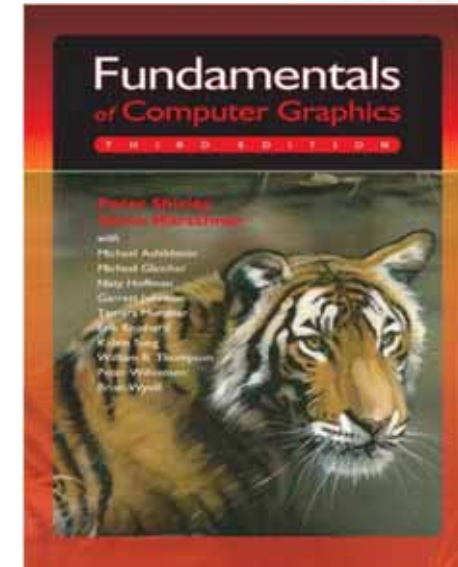
- ▶ nachdem wir nun Bilder darstellen (und nach der ersten Übung auch erzeugen) können beschäftigt uns...
- ▶ ... wie funktioniert die Wahrnehmung (von Farben) beim Menschen?
  - ▶ was können wir überhaupt darstellen?
  - ▶ worauf müssen wir bei der Darstellung noch achten?
- ▶ Rasterbilder
  - ▶ Vorteile von Rasterbildern kennen wir – was sind die Nachteile? (Abtastung und damit verbundene Schwierigkeiten → später!)
  - ▶ einfache Operationen auf Bildern



# Literatur

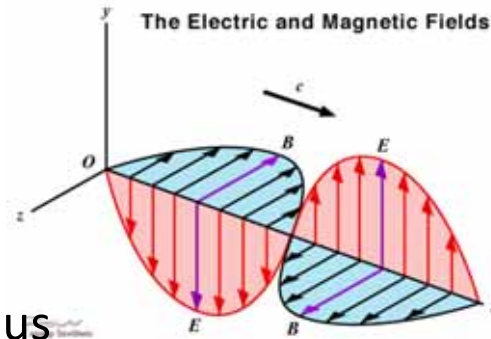


- ▶ **Fundamentals of Computer Graphics,**  
P. Shirley, S. Marschner, 3rd Edition, AK Peters  
→ Kapitel 21 (Color)  
→ Kapitel 22 (Visual Perception)



# Was ist Licht?

- ▶ elektromagnetische Strahlung
  - ▶ ausbreitende Schwingungen eines elektromagnetischen Feldes
  - ▶ Wellenlänge
  - ▶ Intensität
  - ▶ Polarisation

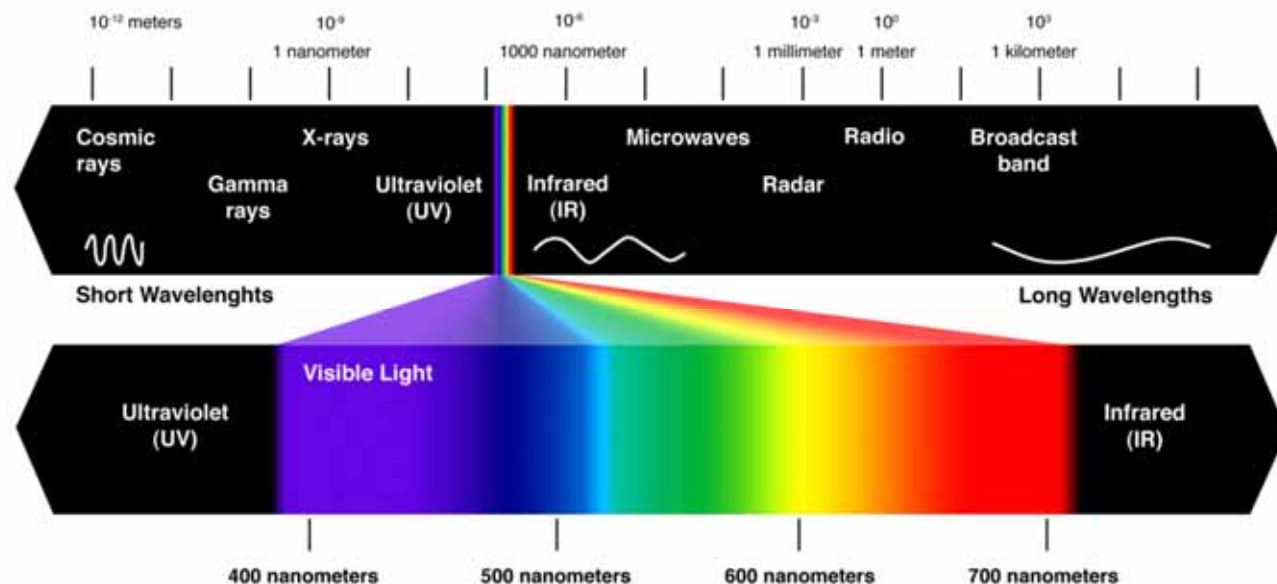


- ▶ Welle-Teilchen-Dualismus
  - ▶ Wellenoptik: Beugung, Interferenz (Maxwell, 1865)
  - ▶ Teilchencharakter Lichtquanten / Photonen (Albert Einstein, 1905)
    - ▶ Frequenz  $\nu$ , Wellenlänge  $\lambda = c/\nu$ ,  $c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
    - ▶ Energie eines Photons:  $E = h\nu$  [eV] oder [J]
    - ▶ Plancksches Wirkungsquantum  $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
  - ▶ Strahlenoptik: geometrische Optik als Standard in CG
- ▶ Radiometrie: Strahlungslehre, Messung der elektromagnetischen Strahlung
- ▶ Photometrie: Einbeziehen der Empfindlichkeit des Betrachters

# Radiometrische Größen



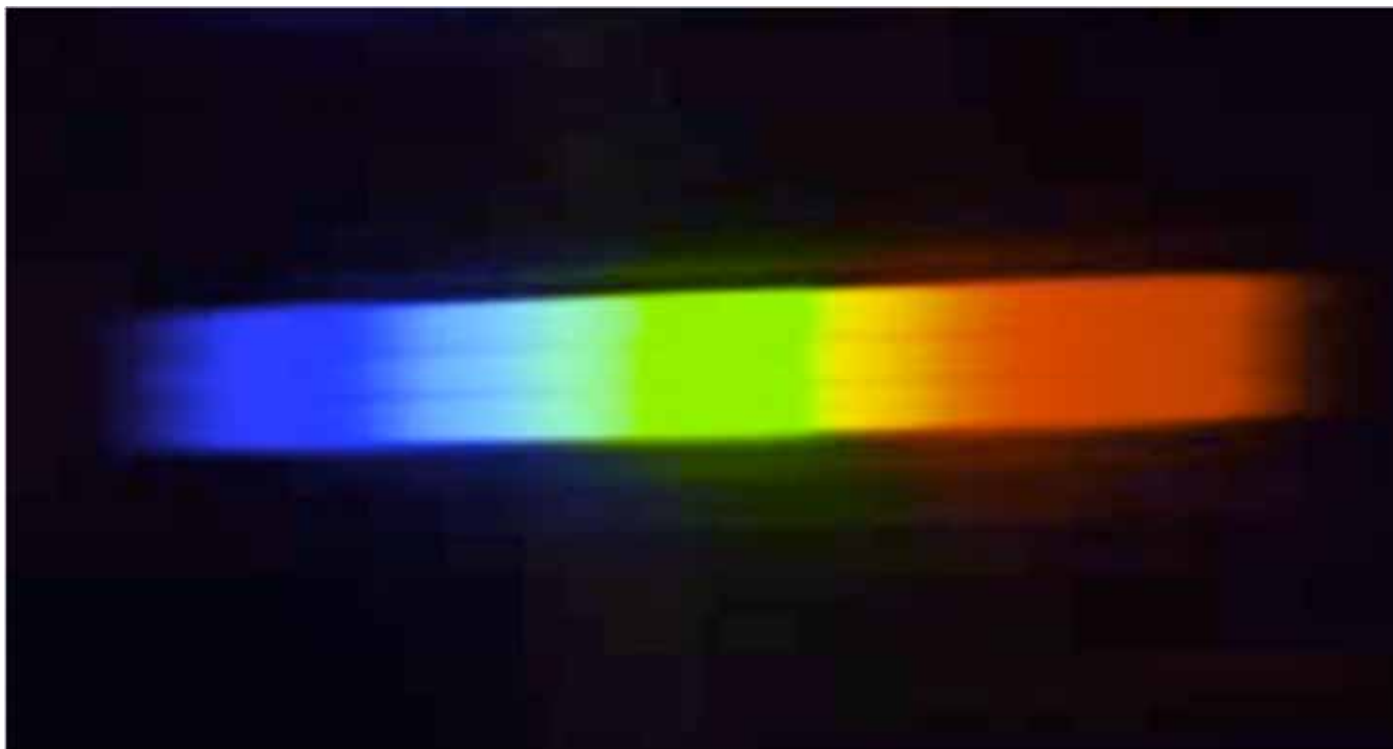
- ▶ Wellenlänge ( $\lambda$ )
  - ▶ gemessen in Metern (m)
  - ▶ jede Wellenlänge repräsentiert eine Spektralfarbe
  - ▶ Frequenz  $\nu = c/\lambda$  [Hz]
- ▶ sichtbares Licht nimmt nur einen sehr kleinen Bereich der elektromagnetischen Strahlung ein: etwa  $380\text{nm} - 700\text{nm}$



# Spektralfarben



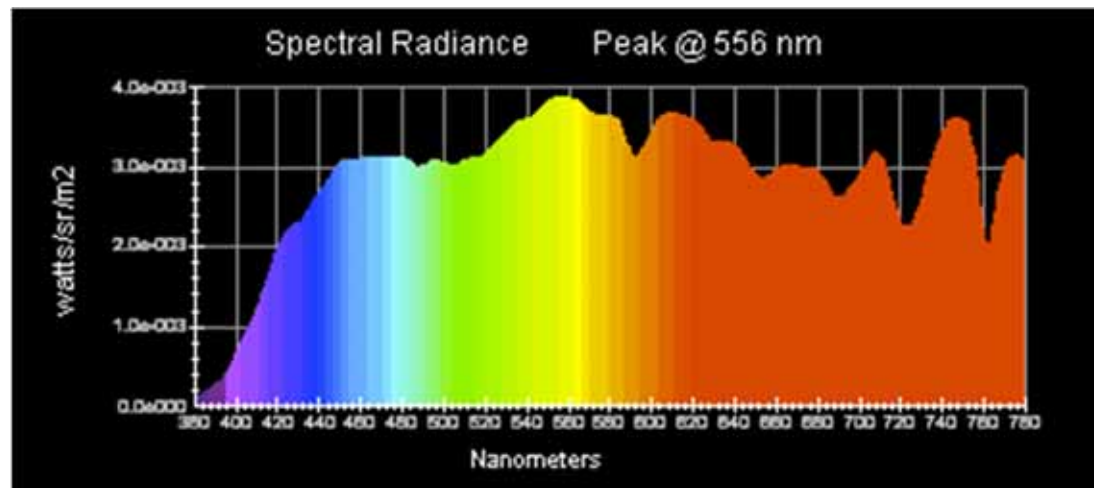
- ▶ monochromatisches Licht (nur eine bestimmte Wellenlänge) erscheint als helle und reine Farbe
- ▶ Achtung: was Sie hier sehen ist nur eine Reproduktion, keine Spektralfarben!



# Beleuchtung



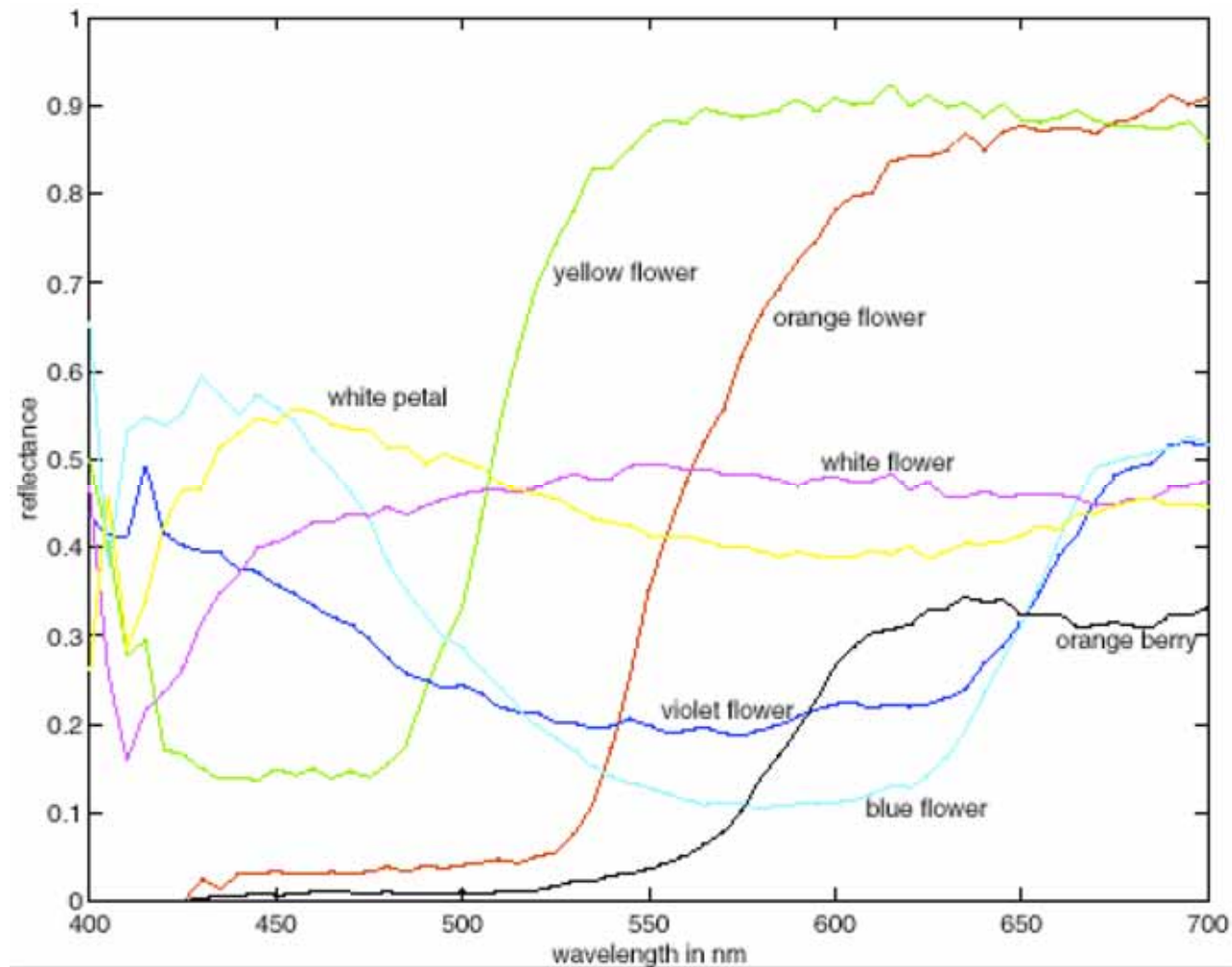
- ▶ spektrale Zusammensetzung von Licht
  - ▶ Stimulus i.d.R. zusammengesetzt aus vielen Wellenlängen
  - ▶ jede Wellenlänge mit einer bestimmten Intensität
  - ▶  $P(\lambda)$  ist die Strahlungsleistung der Wellenlänge  $\lambda$
- ▶ Beispiel: Tageslicht



- ▶ die Wahrnehmung dieser Verteilungen als Farbe ist ein Produkt des **visuellen Systems des Menschen** (Human Visual System, HVS)

# Andere Farben

- ▶ die meisten Farben sind eine Mischung aus (vielen) Wellenlängen

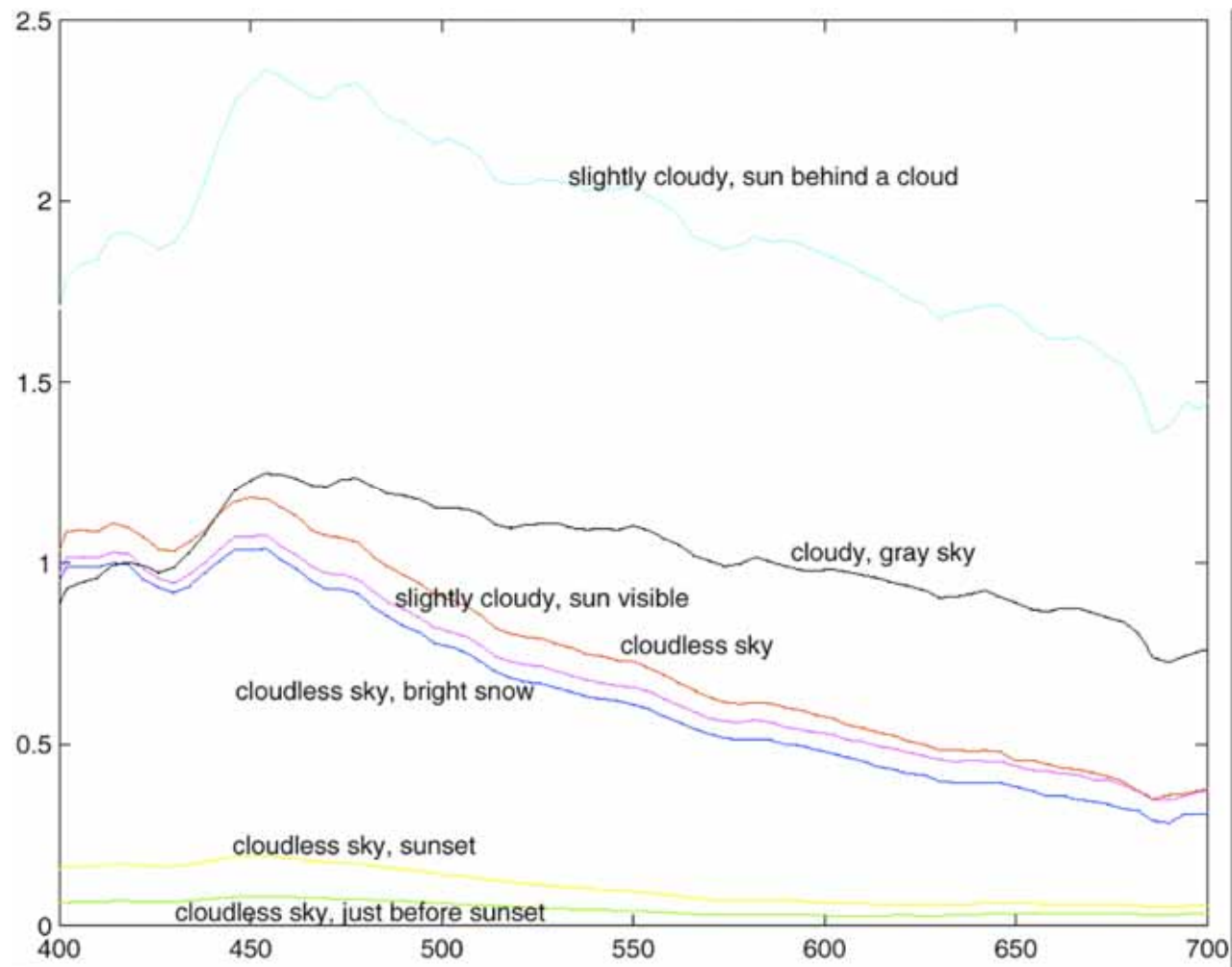




# Andere Farben



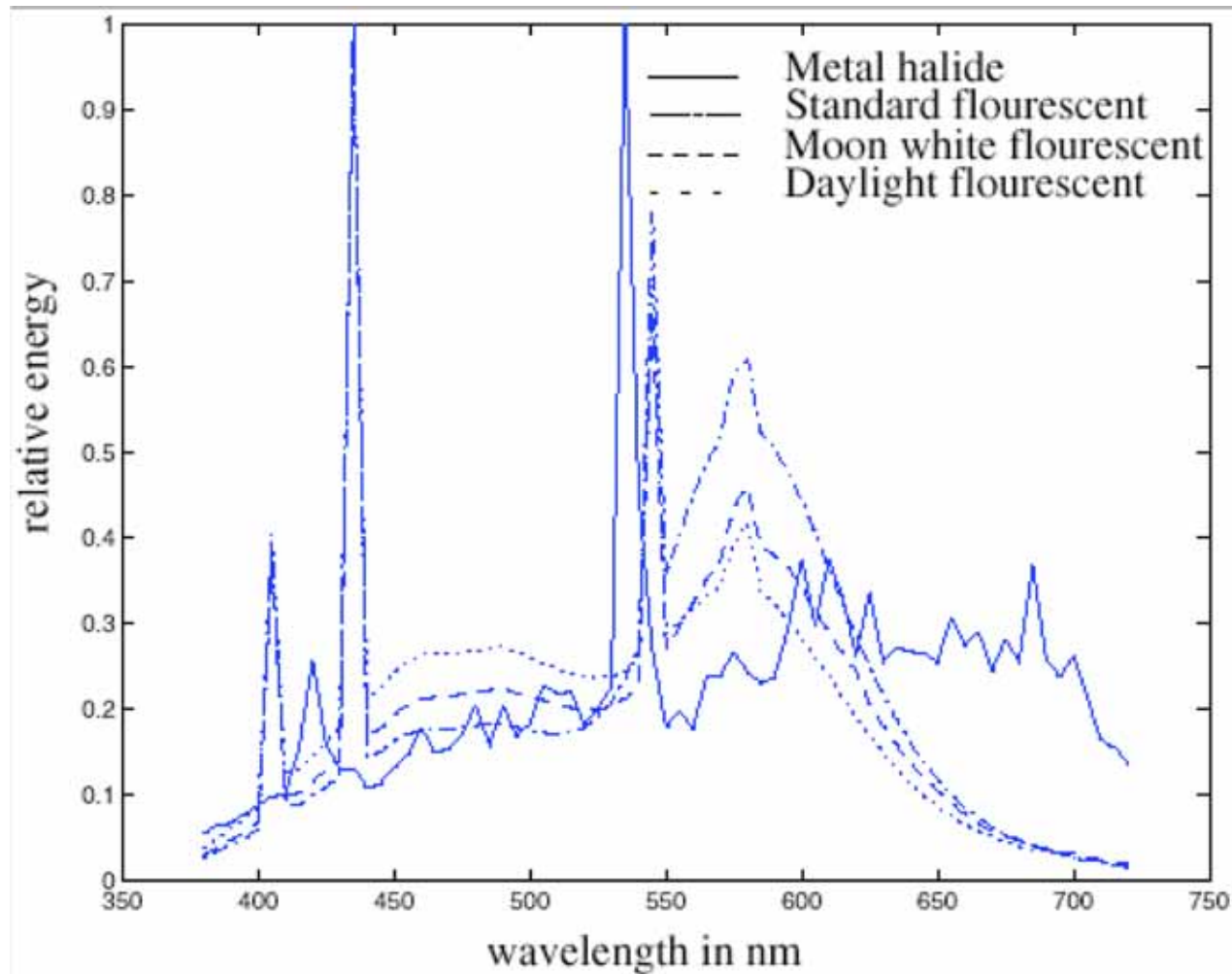
- ▶ die meisten Farben sind eine Mischung aus (vielen) Wellenlängen



# Andere Farben



- ▶ die meisten Farben sind eine Mischung aus (vielen) Wellenlängen



# Perzeption vs. Messung

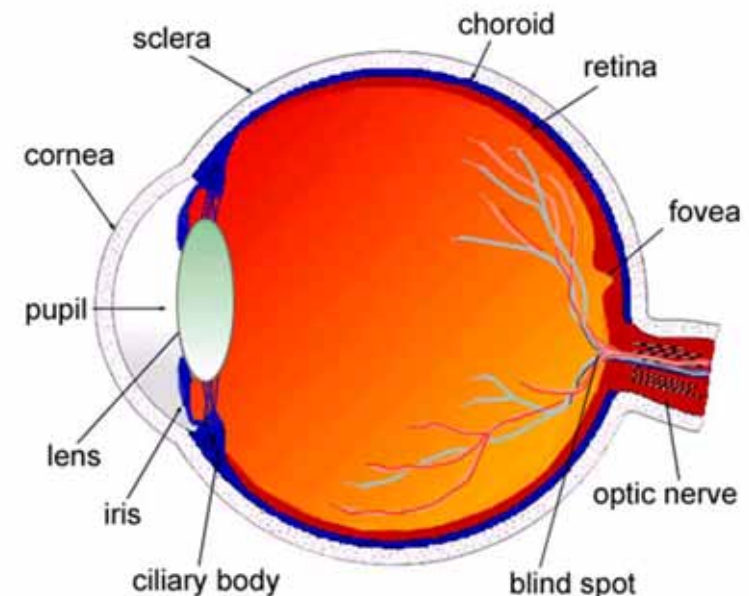


- ▶ visuelles System des Menschen
  - ▶ das menschliche Auge kann die spektrale Zusammensetzung von Licht nicht erfassen
  - ▶ das Auge macht eingeschränkte Messungen
  - ▶ das Auge passt sich (physikalisch) den äußeren Umständen an
  - ▶ ... das Gehirn in vielfältiger Weise ebenso...
- ▶ **Wahrnehmungsphysiologie:** Untersuchung der Funktionsweise der sinnlichen Wahrnehmung
  - ▶ Sinnesrezeptoren, Signalübertragung, ... bis hin zur Verarbeitung der Reizinformation im Zentralnervensystem
  - ▶ der Wahrnehmungsprozess ist in seiner Gesamtheit (noch) nicht vollständig verstanden!

# Das menschliche Auge



- ▶ Hornhaut (cornea) und Linse
  - ▶ fokussieren des einfallenden Lichts auf die Netzhaut
- ▶ Pupille
  - ▶ reguliert den Lichteinfall durch pigmentierte Regenbogenhaut (Iris)
- ▶ Ziliarmuskel: streckt Linse, kontrolliert Brennweite
- ▶ Retina (Netzhaut)
  - ▶ enthält Millionen lichtempfindlicher Zellen
  - ▶ chemische Reaktion, Signalerzeugung
  - ▶ Fovea centralis (gelber Fleck):  
Bereich des schärfsten Sehens  
(~1.5mm Durchmesser, 50-60  
Tausend lichtempfindliche Zellen)
  - ▶ blinder Fleck



# Rezeptoren im menschlichen Auge

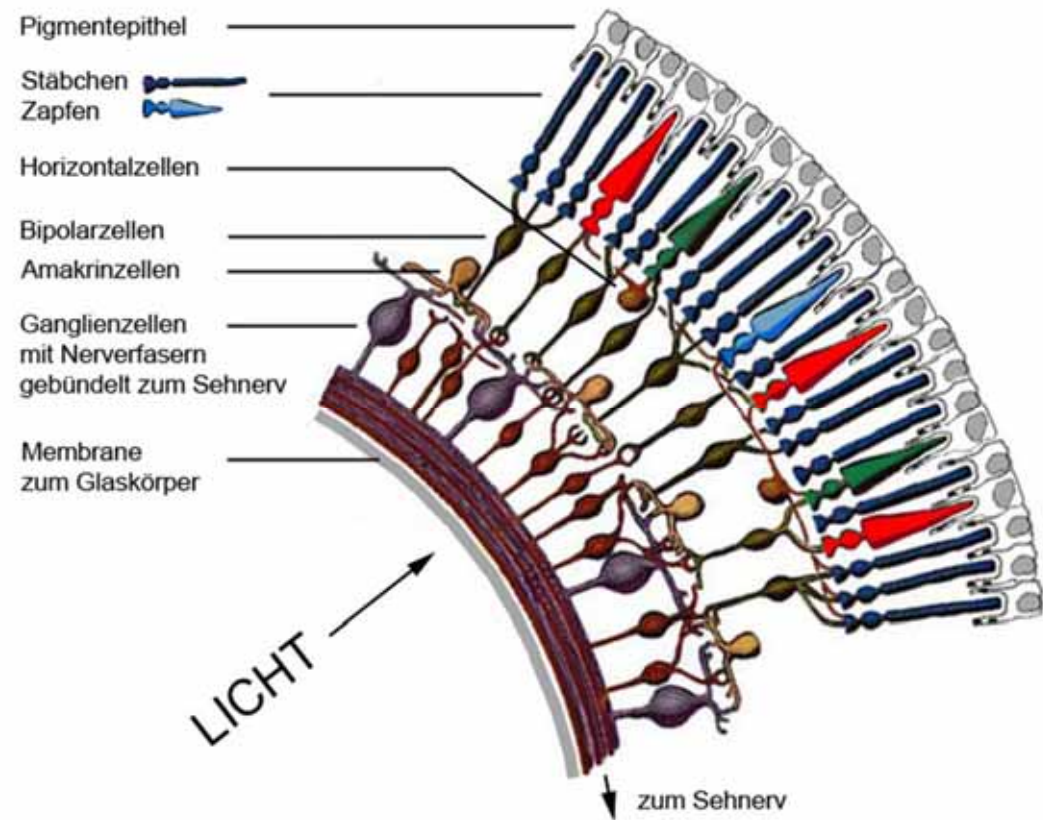
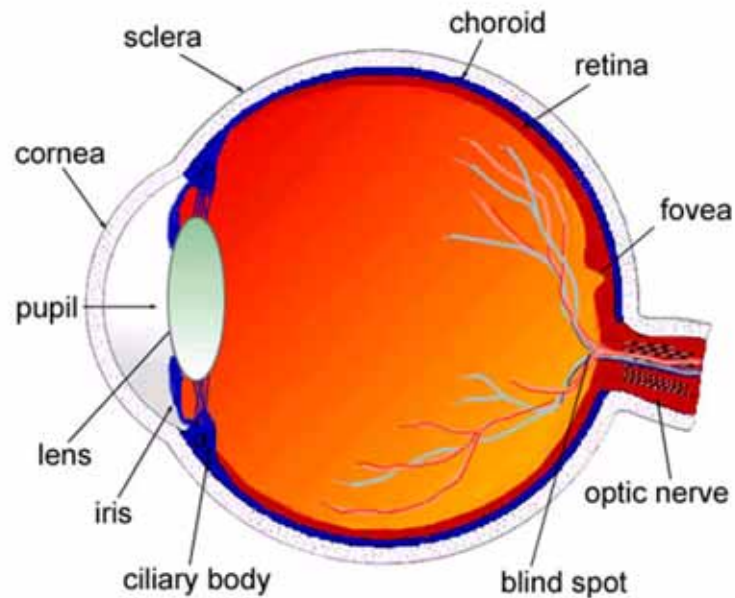


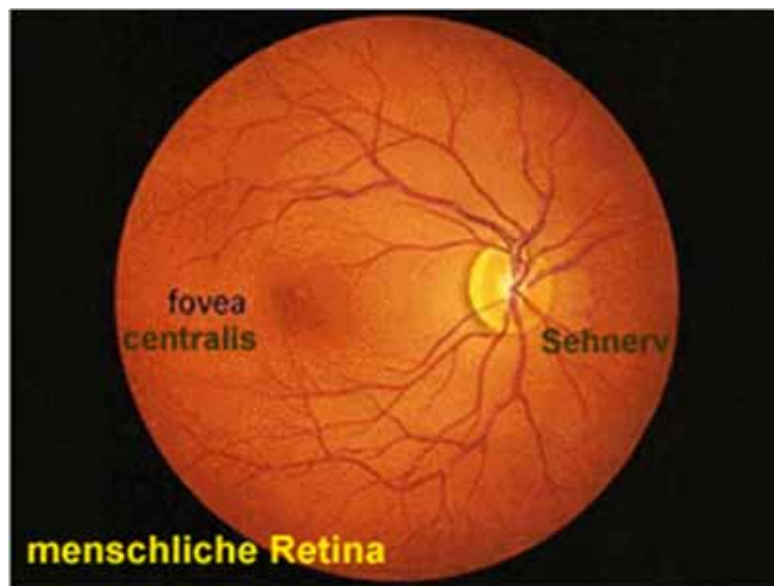
Bild: [www.dma.ufg.ac.at](http://www.dma.ufg.ac.at)



# Das Auge als Sensor – Rezeptoren

## Lichtempfindliche Rezeptoren im menschlichen Auge

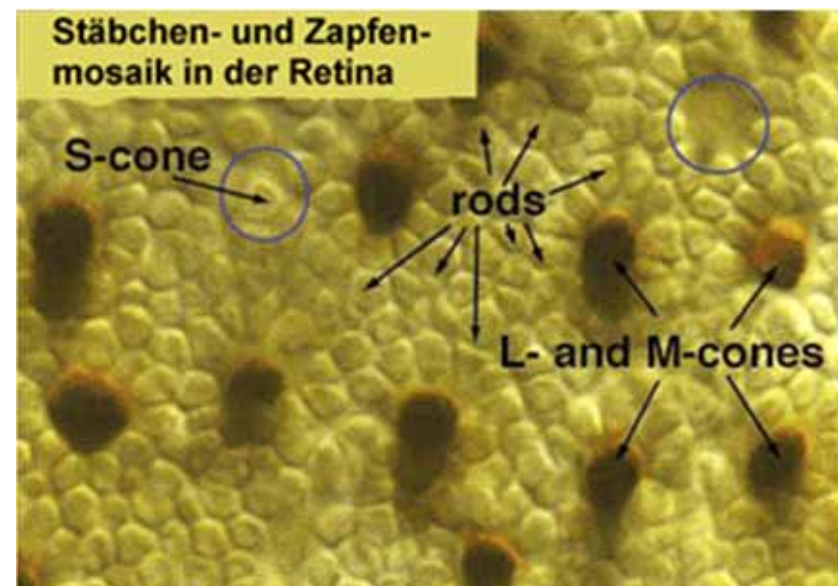
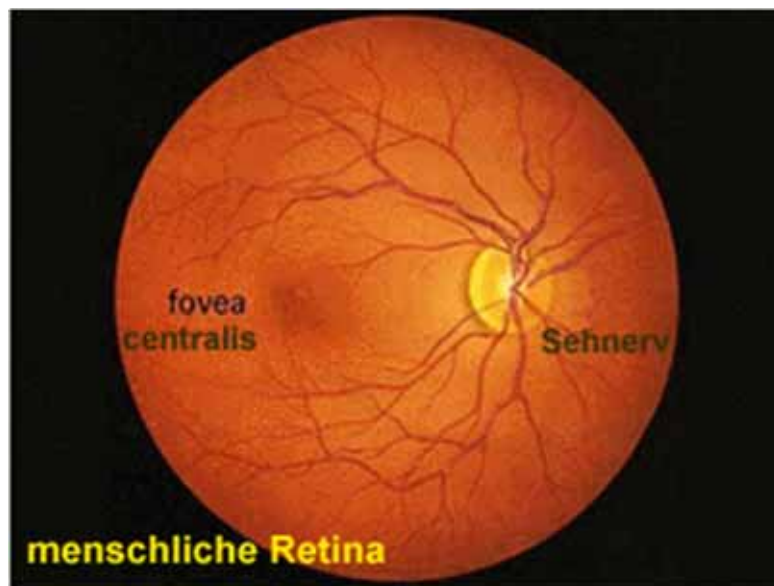
- ▶ Zapfen (Cones)
  - ▶ für photopisches Sehen (Tagsehen) und trichromatisches Farbsehen
  - ▶ 3 Arten: unterschiedliche Empfindlichkeit gegenüber Lichtspektra
    - ▶ S (7%) entsprechen **blau**
    - ▶ M (37%) entsprechen **grün** (gelb-grün)
    - ▶ L (56%) entsprechen **rot** (orange-rot) [Genetics Encyclopedia]
  - ▶ ca. 6-7 Mio. konzentriert in und um die Fovea, weniger empfindlich



# Das Auge als Sensor – Rezeptoren

## Lichtempfindliche Rezeptoren im menschlichen Auge

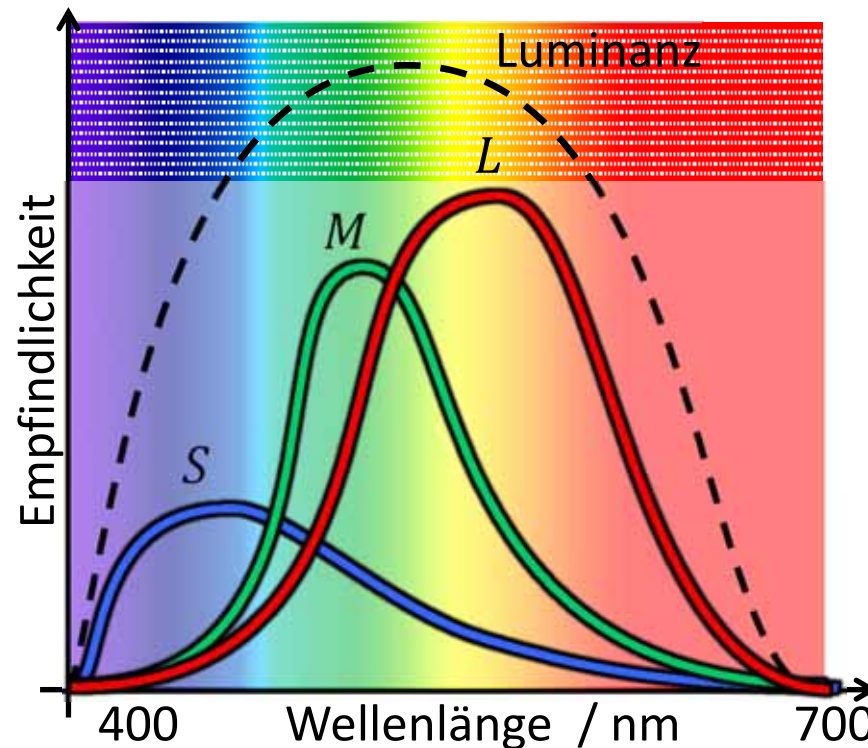
- ▶ Stäbchen (Rods)
  - ▶ für skotopisches, monochromatisches Sehen (Nachtsehen)
  - ▶ lichtempfindlicher, überall auf der Retina
  - ▶ ca. 120 Mio. Stäbchen
  - ▶ 1000× empfindlicher als Zapfen
- ▶ im mesopischen Bereich (Dämmerungssehen) sind Stäbchen und Zapfen aktiv: Übergang von Farb- zu monochromatischem Sehen



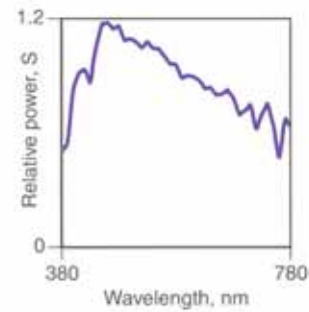
# Trichromatisches Farbsehen

- ▶ perzeptuelle Antwort auf Licht unterschiedlicher Wellenlänge:

$$s = \int S(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad m = \int M(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad l = \int L(\lambda)P(\lambda)d\lambda$$

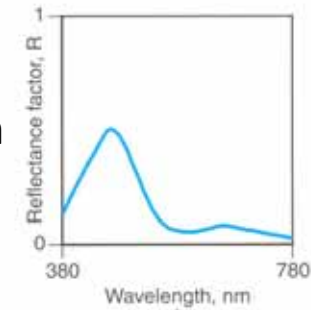


- ▶ Antwort des S-Rezeptors entspricht in etwa blauem Licht
- ▶ M- und L-Rezeptoren decken größere Wellenlängenbereiche ab
  - ▶ also nicht nur “grün” und “rot”, eher gelb-grün und orange-rot

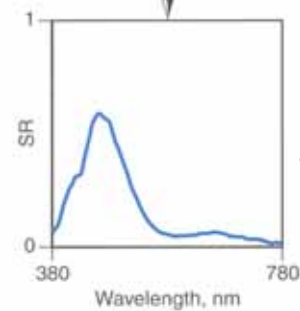


Licht

Reflexion

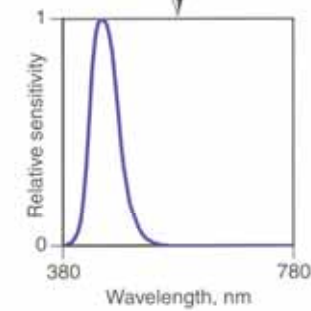
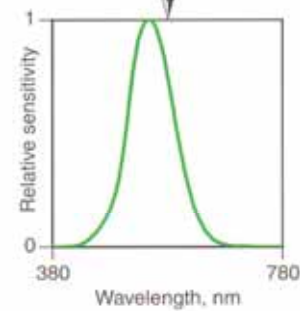
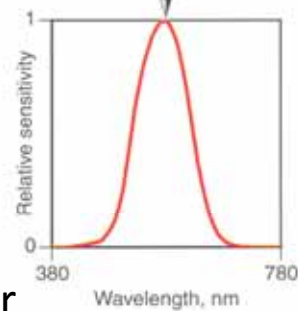


Multiplikation

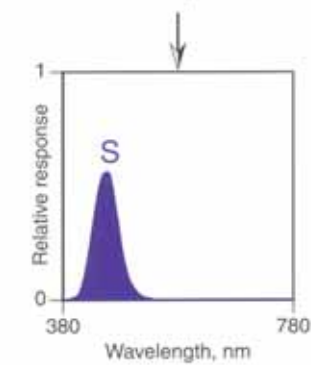
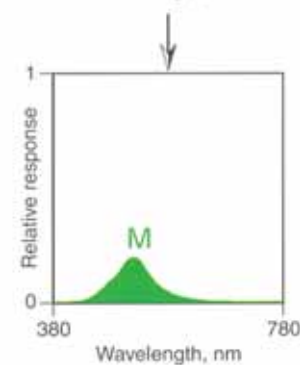
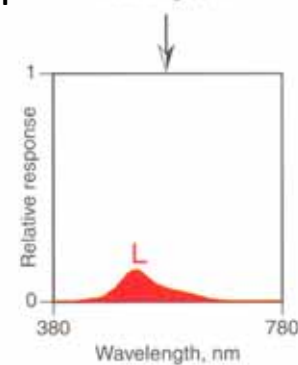


Stimulus

Empfindlichkeitskurven



Multiplikation der  
Wellenlängen



Integration

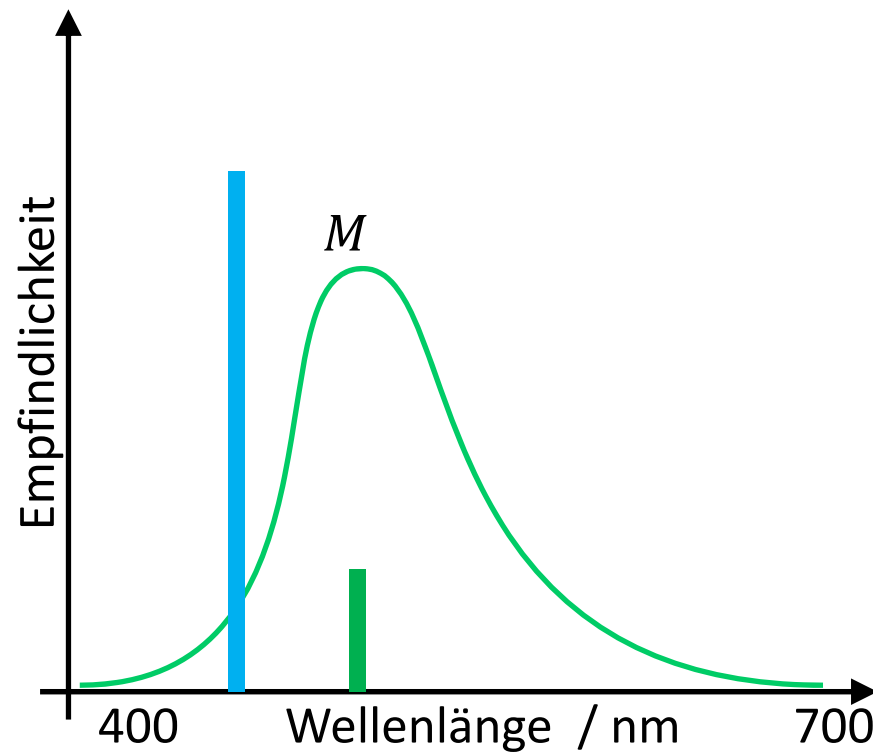
# Trichromatisches Farbsehen



- ▶ perzeptuelle Antwort auf Licht unterschiedlicher Wellenlänge:

$$s = \int S(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad m = \int M(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad l = \int L(\lambda)P(\lambda)d\lambda$$

- ▶ unterschiedliche Wellenlänge und Intensität, aber gleiche Antwort





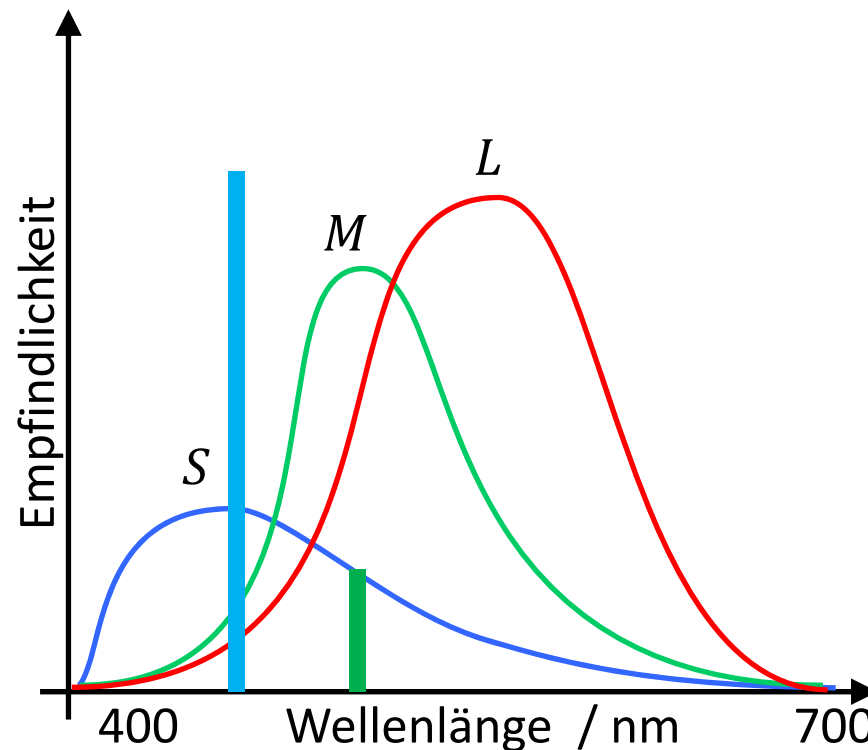
# Trichromatisches Farbsehen



- ▶ perzeptuelle Antwort auf Licht unterschiedlicher Wellenlänge:

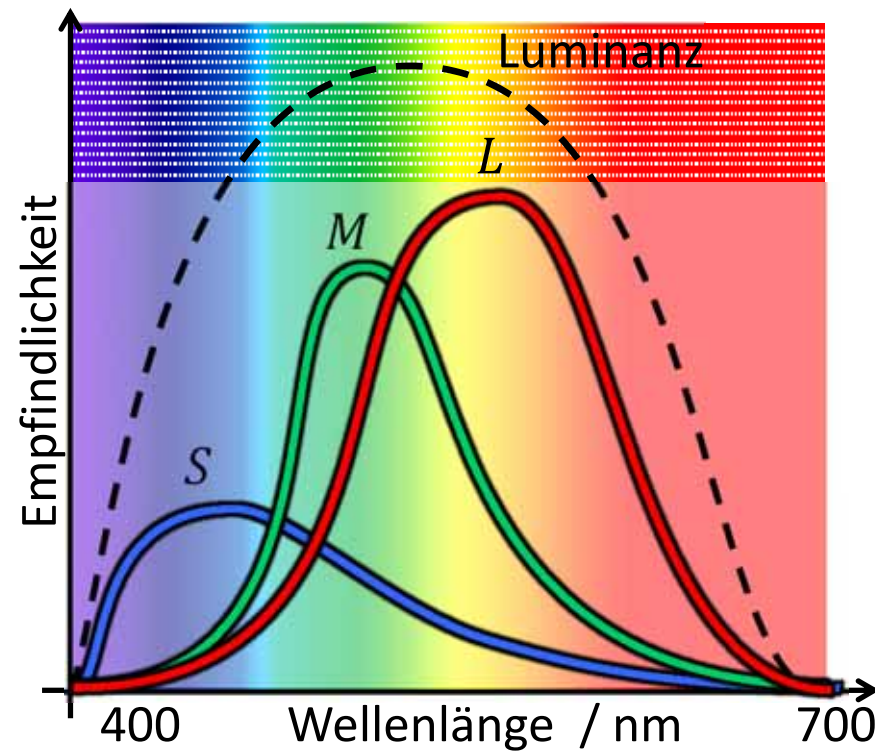
$$s = \int S(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad m = \int M(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad l = \int L(\lambda)P(\lambda)d\lambda$$

- ▶ unterschiedliche Wellenlänge und Intensität, aber unterschiedliche Antworten bei unterschiedlichen Rezeptoren!



# Farbsehen

- ▶ rot-grün Sehschwäche?
- ▶ Tetrachromaten? UV-Sehen?



# Metamerismus



- ▶ perzeptuelle Antwort auf Licht unterschiedlicher Wellenlänge:

$$s = \int S(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad m = \int M(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad l = \int L(\lambda)P(\lambda)d\lambda$$

- ▶ Metamerismus: unterschiedliche Spektren können gleich aussehen
  - ▶ genau dann, wenn unterschiedliche Lichtspektren  $P(\lambda)$  dieselbe Antwort  $(s, m, l)$  hervorrufen
  - ▶ sehr hilfreich: dadurch kann ein Monitor mit drei Primärfarben denselben Eindruck vermitteln, wie ein komplexes Spektrum

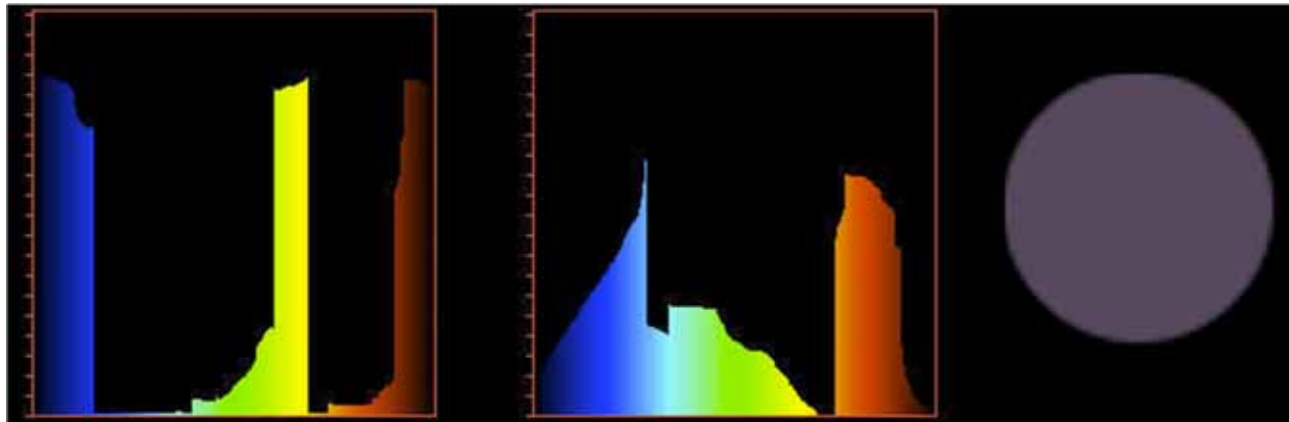


Bild: Hughes, Bell, Doppelt

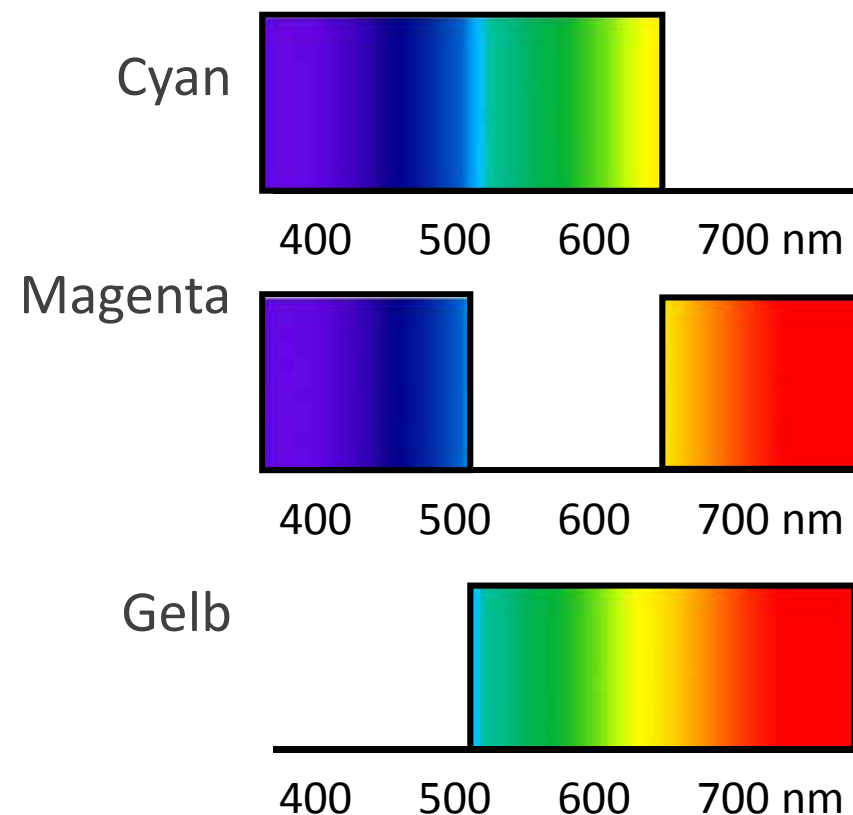
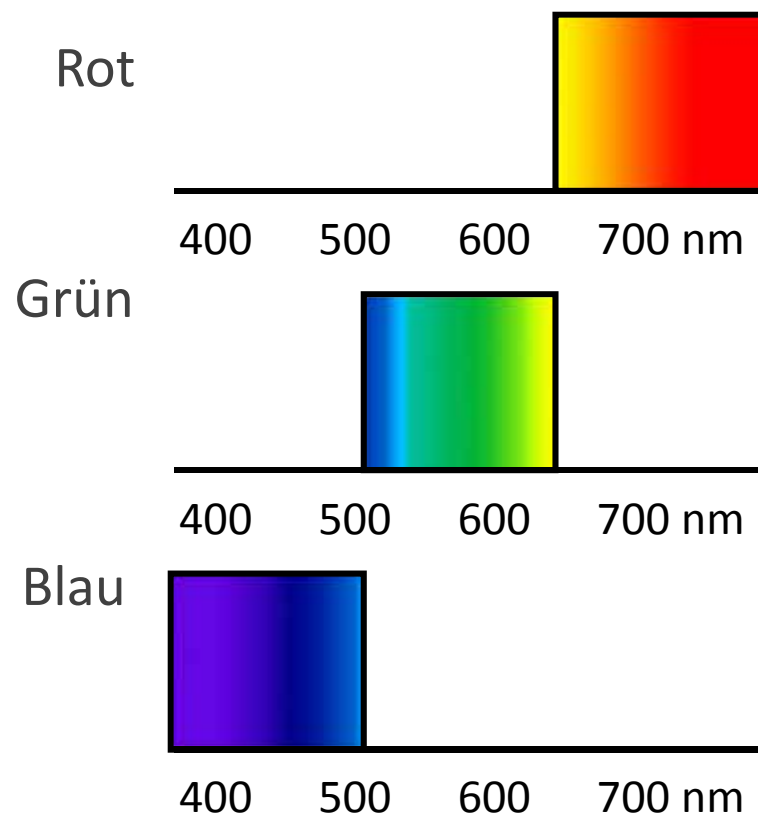
# Additive und subtraktive Farbmischung



## ▶ Grundfarben der...

▶ ...additiven Farbmischung: Rot, Grün und Blau

▶ ...subtraktiven Farbmischung: Cyan, Magenta, Gelb

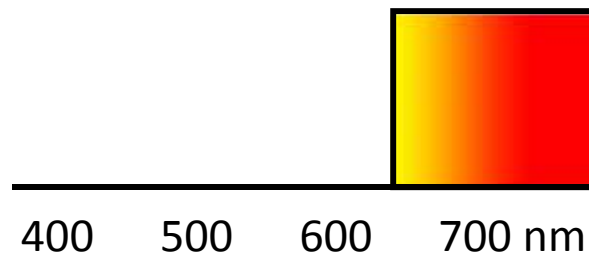


# Additive Farbmischung

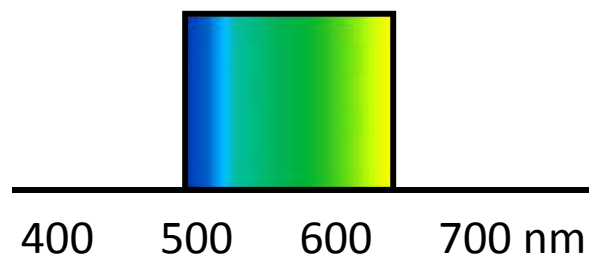


- ▶ Farbkombination durch **Addition der Spektren**
  - ▶ z.B. CRT/LCD Monitore, mehrere Projektoren auf einem Schirm

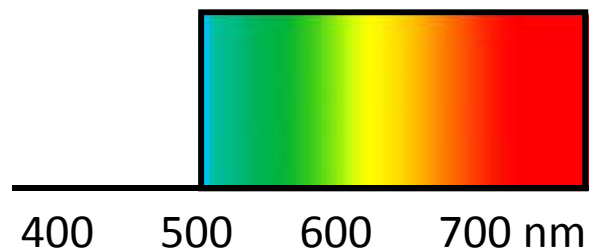
Rot



Grün



Gelb



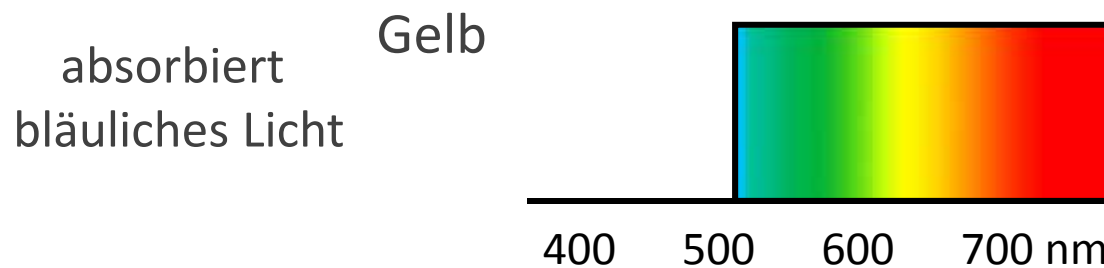
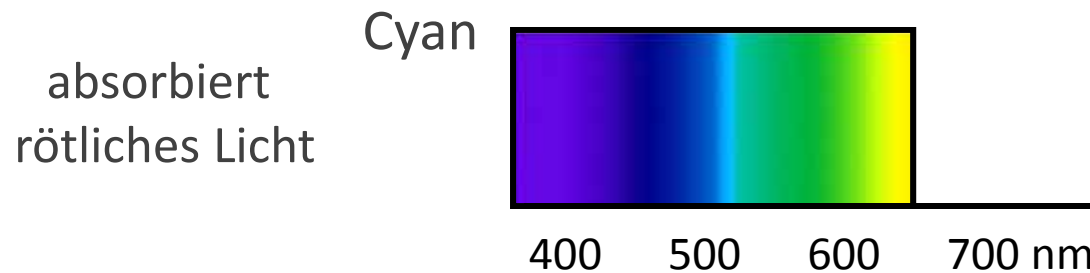
# Subtraktive Farbmischung



## ▶ Farbkombination durch **Multiplikation der Spektren**

▶ z.B. fotografischer Film, Farbstifte, Farbdrucker

▶ welche Wellenlängenbereiche werden absorbiert, welche reflektiert?





# Graßmannsche Gesetze

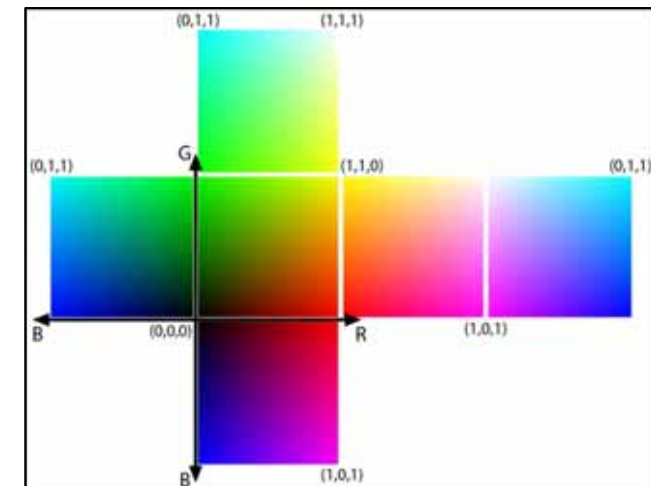
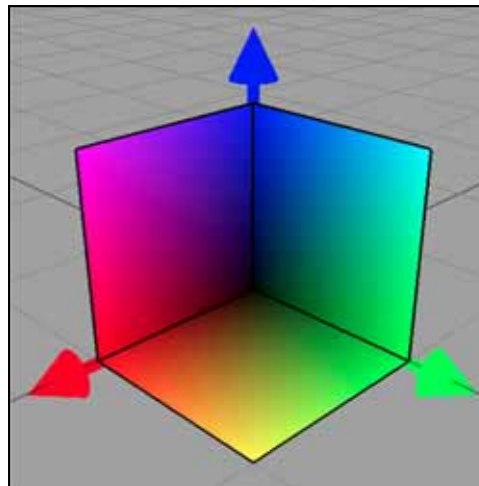
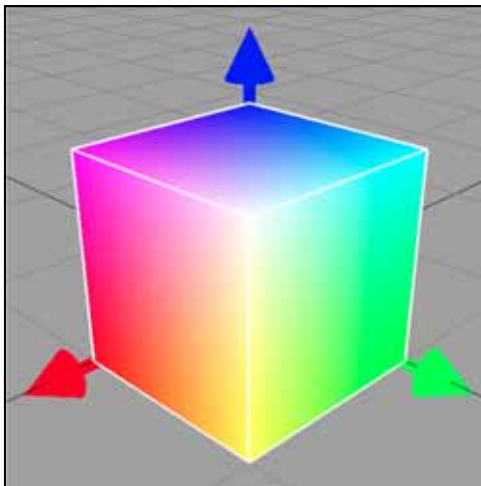


- ▶ nach Hermann Günther Graßmann (1809–1877)
- ▶ jeder Farbeindruck kann mit 3 Grundgrößen beschrieben werden
  - ▶ Farbe ist eine 3-dimensionale Größe
  - ▶ z.B. Farbton, Sättigung, Helligkeit oder rot, grün, blau oder ...
- ▶ Intensität einer *additiv gemischten Farbe* entspricht der Summe der Intensitäten der Ausgangsfarben (Superpositionsprinzip)
- ▶ der Farbton einer *additiven Mischfarbe* hängt nur vom Farbeindruck der Ausgangsfarben ab (nicht von deren genauen Spektren!)
  - ▶ d.h. keine Rückschlüsse auf spektrale Zusammensetzung möglich

# RGB Farbraum



- ▶ biologisch und technisch motivierte Farbdarstellung
  - ▶ als Basis dienen 3 Primärfarben: rot, grün, blau
    - ▶ z.B. mit  $\lambda_1 = 645nm$ ,  $\lambda_2 = 525nm$ ,  $\lambda_3 = 444nm$
  - ▶ ergibt einen 3-dimensionalen **Farbraum**:  
 $\mathbf{C} = r\mathbf{R} + g\mathbf{G} + b\mathbf{B}$  mit  $(r, g, b) \in [0,1]^3$
  - ▶ die Koeffizienten  $r, g, b$  nennt man **Tristimuluswerte**
  - ▶ die Definition der Primärfarben hängt vom jeweiligen RGB-Raum ab
  - ▶ additive Farbmischung eignet sich gut für Monitore, Beamer, ...
  - ▶ Luminanzapproximation:  $Y = 0.3r + 0.59g + 0.11b$



# CMY(K) Farbraum



- ▶ subtraktiver Farbraum (cyan, magenta, yellow)

- ▶ dualer Raum zu RGB

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{C} \\ \hline \text{M} \\ \hline \text{Y} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline 1 \\ \hline 1 \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|} \hline \text{R} \\ \hline \text{G} \\ \hline \text{B} \\ \hline \end{array}$$



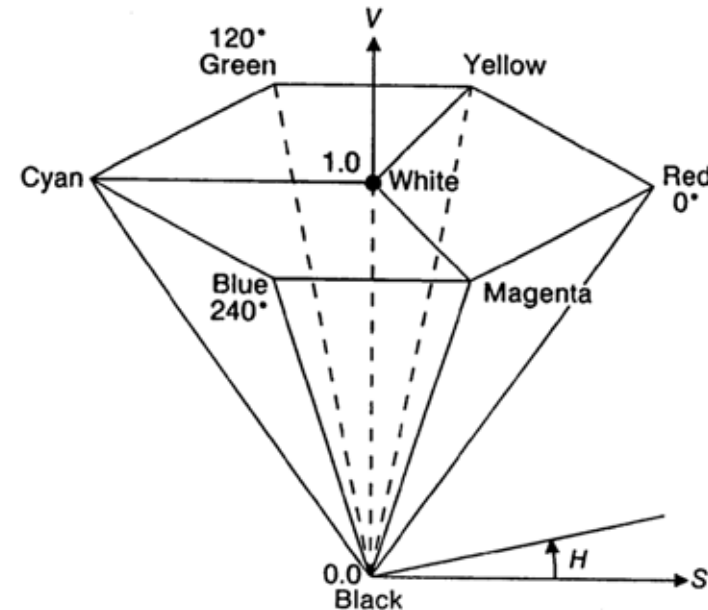
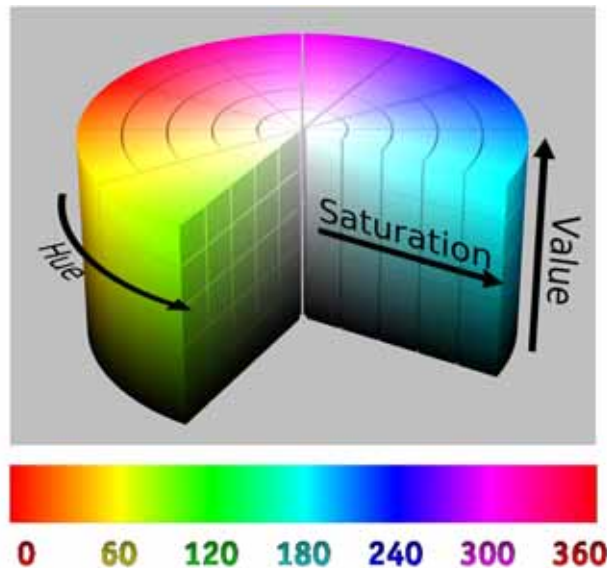
- ▶ jede Primärfarbe absorbiert einen Teil des Spektrums
- ▶ Tinte, Farbstoffe, Pigmente

## ▶ CMYK

- ▶ beim Drucken wird meist noch eine 4. „Key-Farbe“ verwendet
- ▶ als Key-Farbe verwendet man pures Schwarz
- ▶ praktische Gründe
  - ▶ Mischung von CMY ergibt typischerweise kein Schwarz
  - ▶ Tinteneinsparung
- ▶  $K = \min(C, M, Y)$ ,  $C' = C - K$ ,  $M' = \dots$  (Achtung: u.U. andere Konversion, je nach Gerät auf dem CMYK verwendet wird)

# HSV Farbraum

- ▶ Farbton (Hue), Sättigung (Saturation), Helligkeit (Value)
- ▶ Darstellung als Zylinder oder (hexagonaler) Kegel



- ▶ weder additiv noch subtraktiv
- ▶ aber: intuitiv und deshalb oft in Benutzerschnittstellen
- ▶ Konversion RGB  $\leftrightarrow$  HSV  
 $V = \max(r, g, b)$ ,  $S = (\max - \min) / \max$ ,  $H \in [0^\circ, 360^\circ]$  mit Fallunterscheidung, Farben am Rand: rot, gelb, grün, cyan, blau, violett

# Farbmodell, -raum und Stimuli



- ▶ ein **Farbmodell** ist ein mathematisches Modell mit dem Farben durch Wertetupel beschrieben werden können
  - ▶ meist 3-Tupel (z.B. RGB), Ausnahmen 4-Tupel (CMYK)
  - ▶ es müssen die entsprechenden Grundfarben angegeben werden
- ▶ ein **Farbraum** ist die Menge der Farben, die *mit einem bestimmten Modell* beschrieben werden können
- ▶ die **Tristimuluswerte** beschreiben eine Farbe in einem bestimmten Farbraum eines Farbmodells (= ohne Angabe des Farbmodells und -raums sind diese Werte nichtssagend)