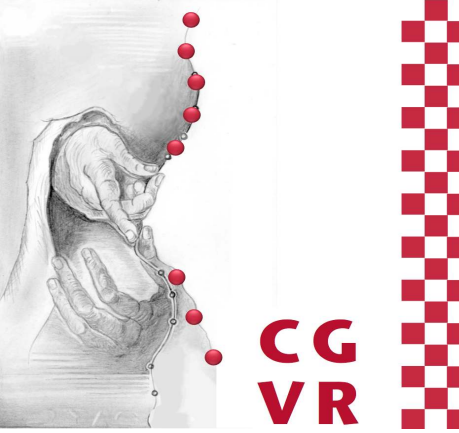
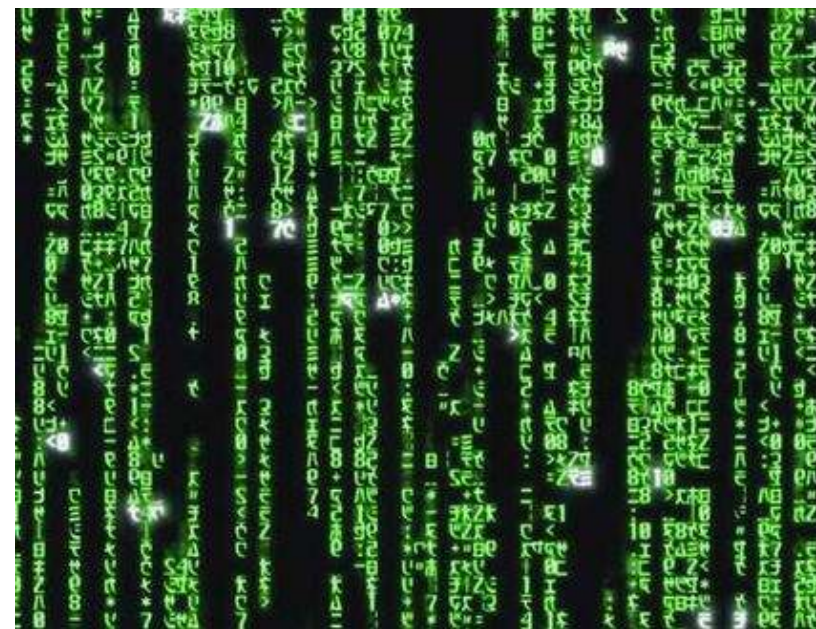




Computergraphik I

Einführung & Displays



G. Zachmann
University of Bremen, Germany
cgvr.cs.uni-bremen.de

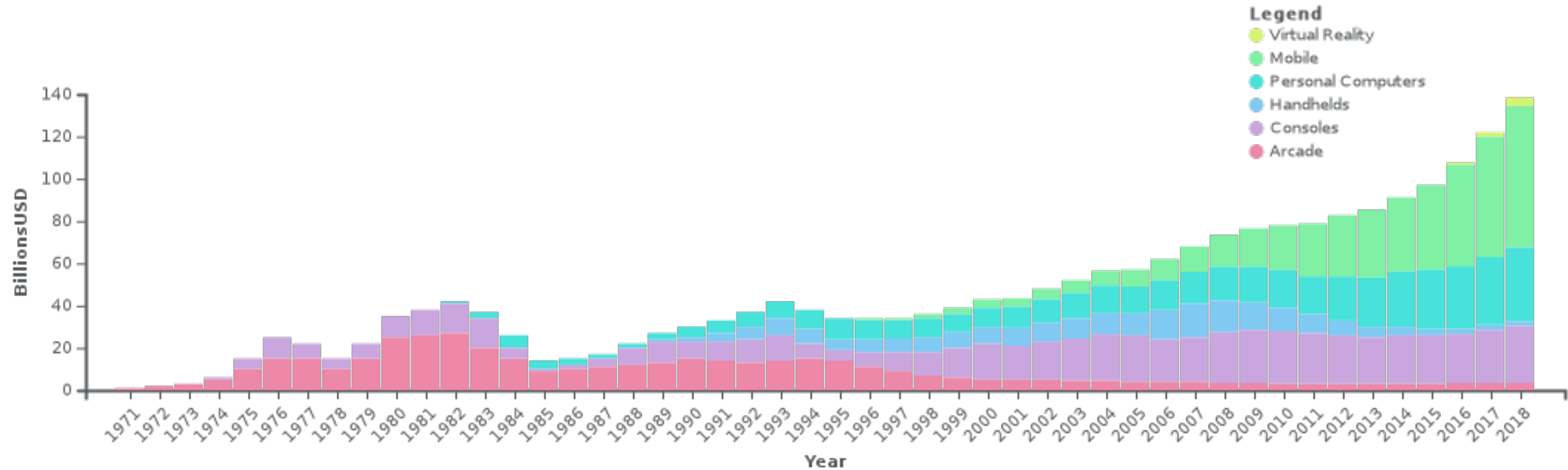


Fragen-Kanal für dieses Kapitel

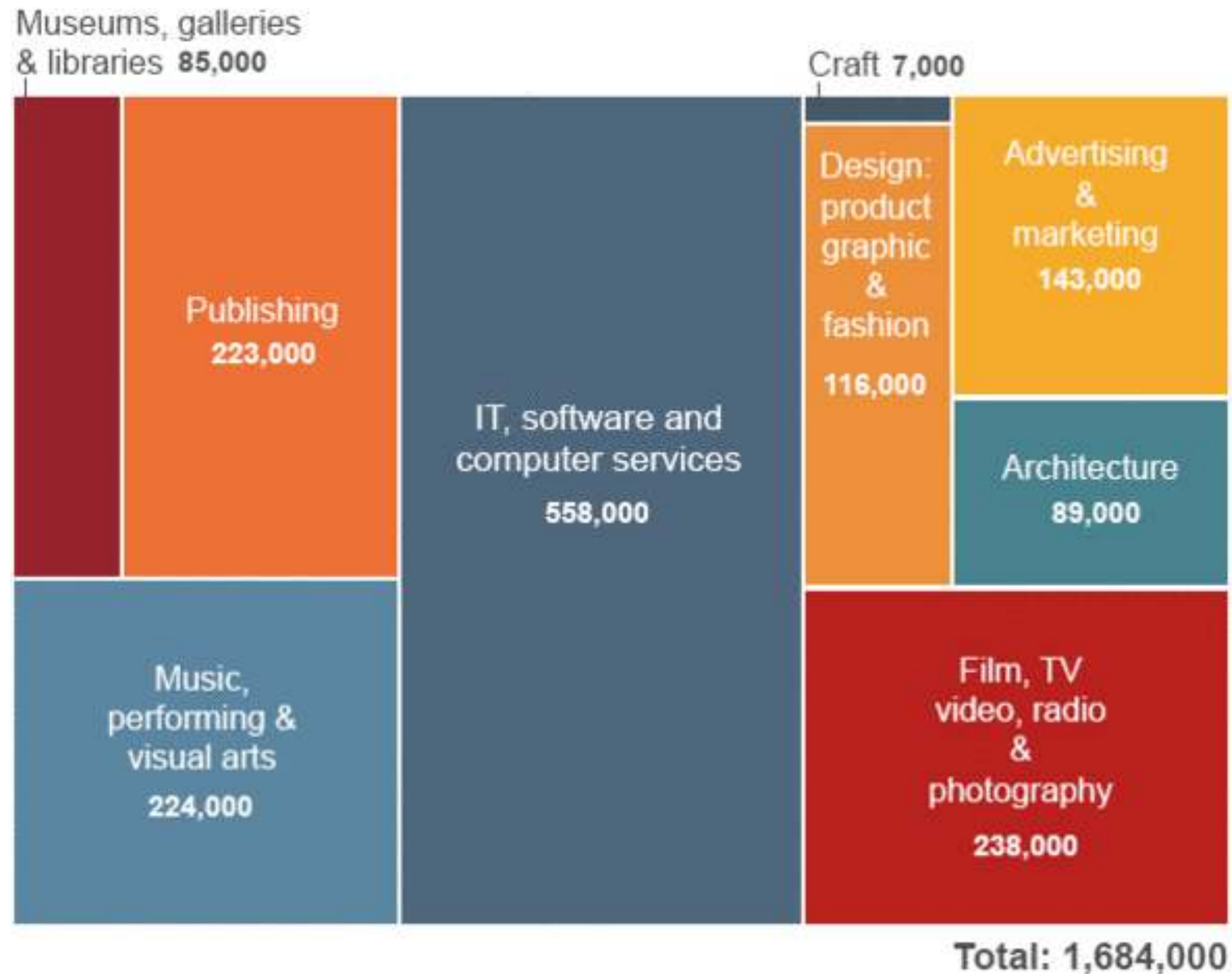


Oder:
menti.com
und Code
3587 0466

Development of Games Market

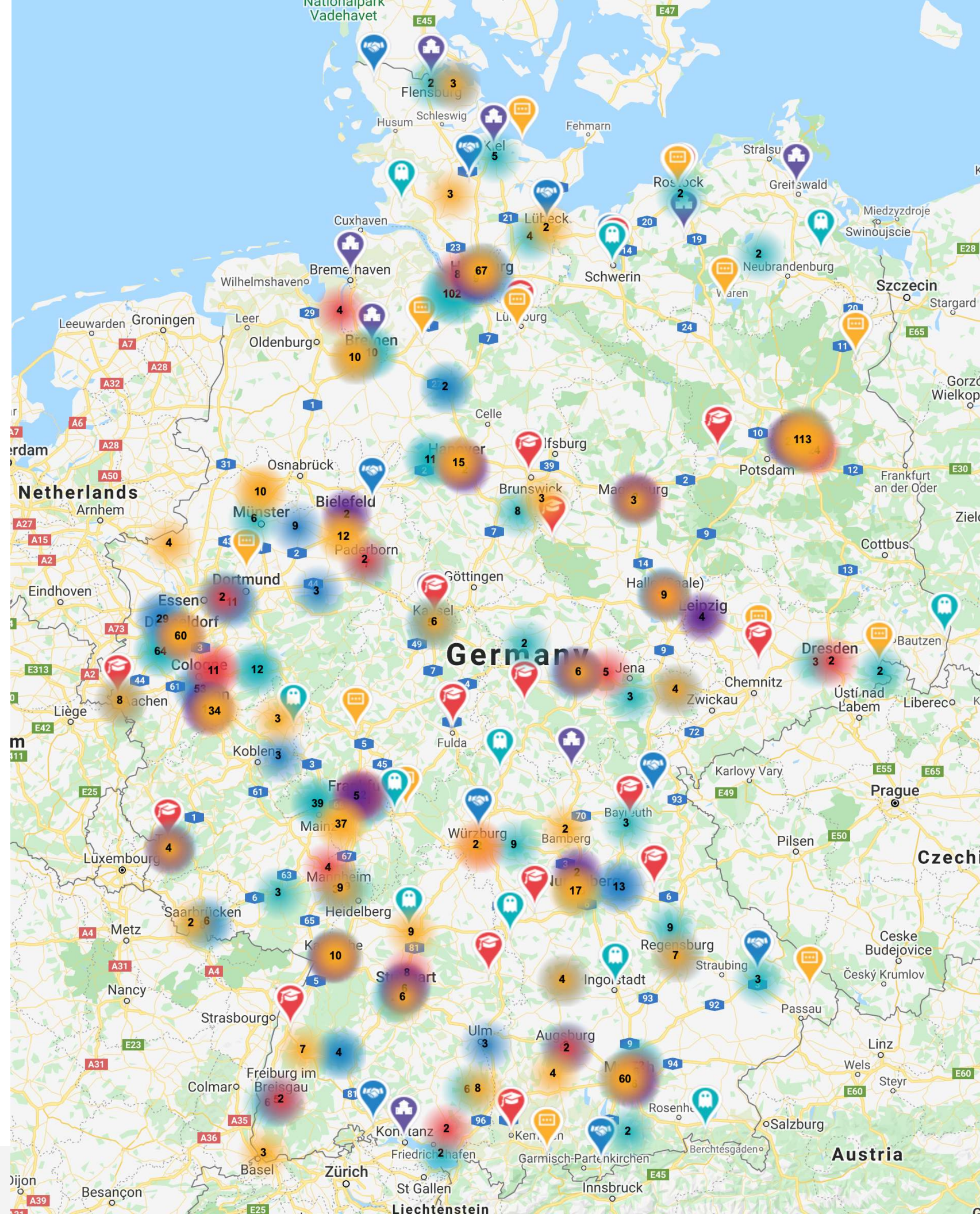


Employment in the creative industries in the UK in 2012



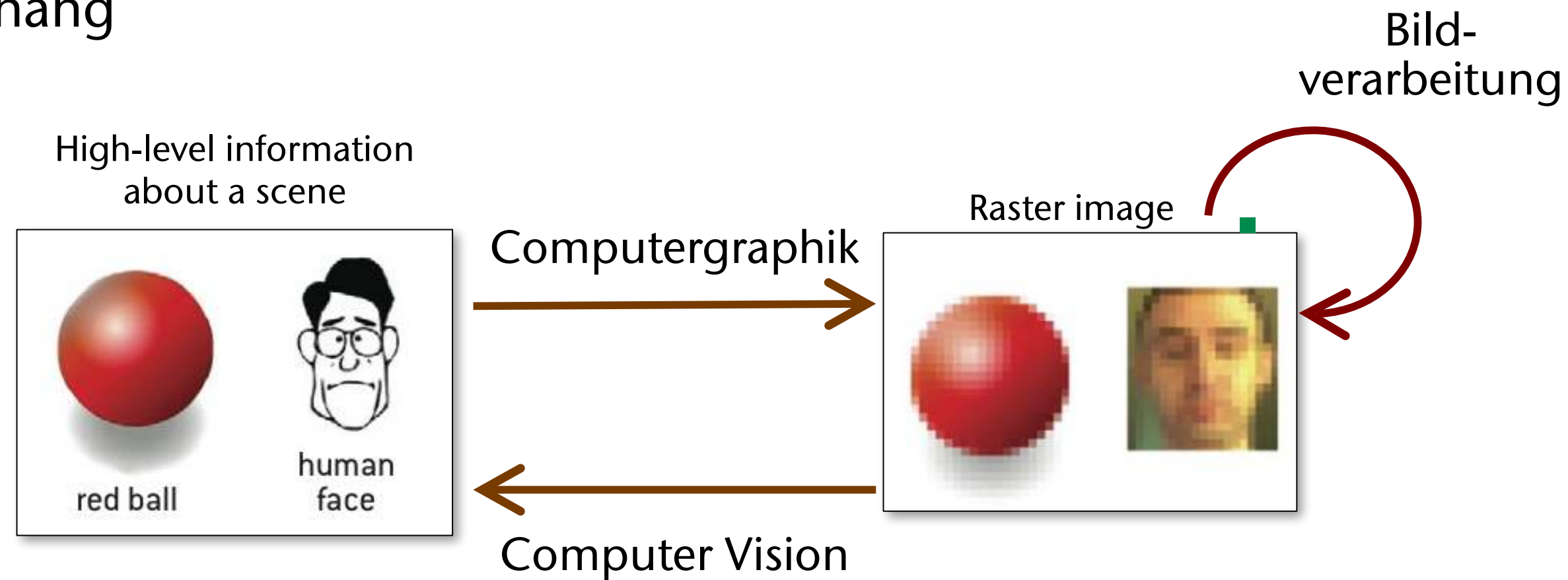
Games Map

<https://www.gamesmap.de>



Das Gebiet "*Visual Computing*"

- *Visual Computing* = Informatik-Disziplinen "mit Bildern"
- Computergraphik, Maschinelles Sehen und Bildverarbeitung stehen in einem engen Zusammenhang



- Trend: Computergraphik und Computer Vision wachsen immer stärker zusammen ("ProCams")

Anwendungsgebiete der Computergraphik

- Videospiele
- Filme
 - Zeichentrickfilme
 - Computeranimationsfilme
 - Spezialeffekte
- CAD / CAM
- Simulationen
- Medizinische Visualisierung
- Visualisierung von Informationen
- Training (Flug-, Fahr-, Operationssimulator)



Pixar: Monster's Inc.

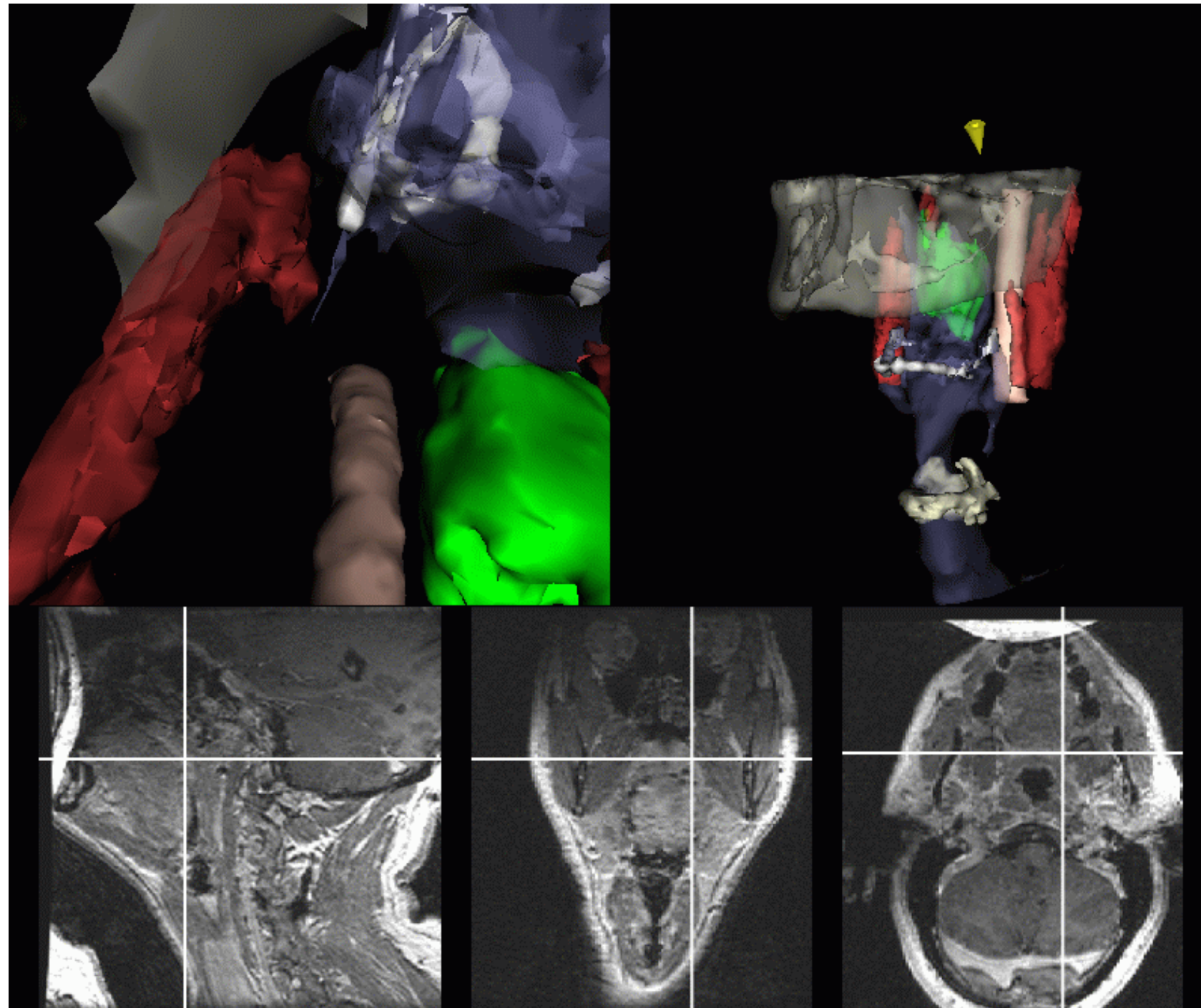


Square: Final Fantasy

Spiele



Medizinische Visualisierung

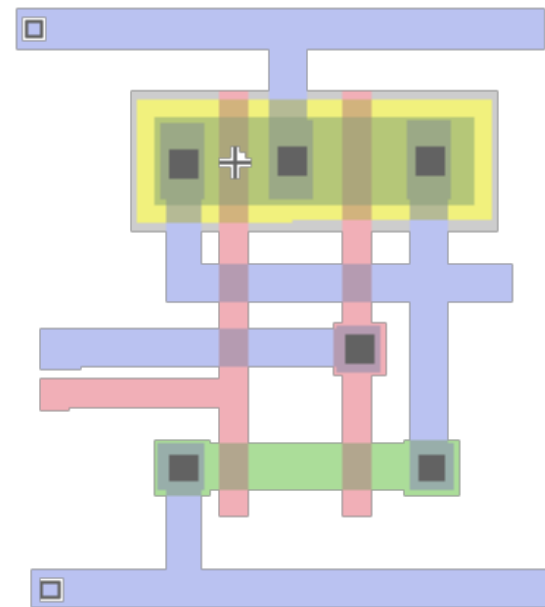
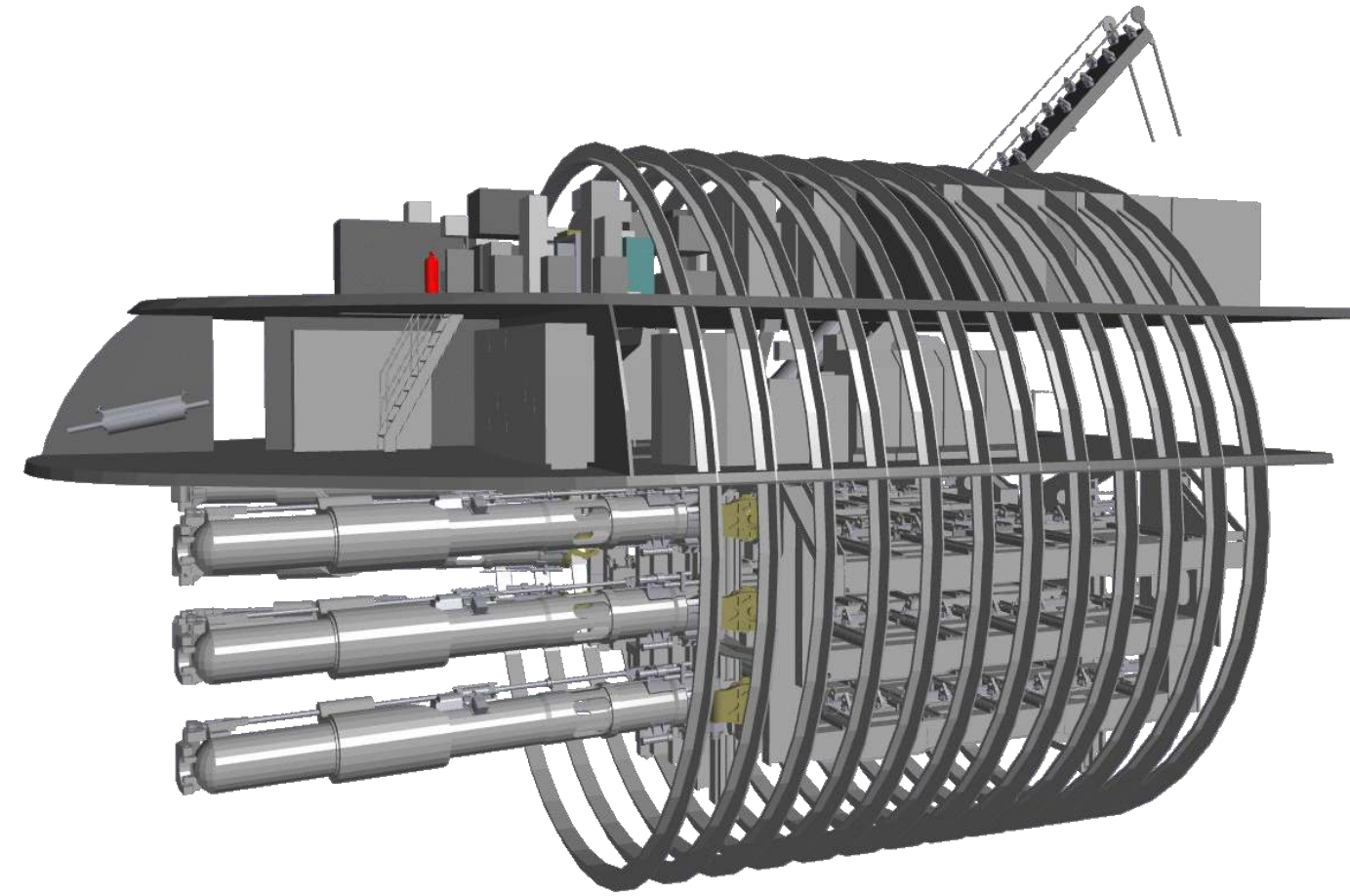


MIT: Image-Guided Surgery Project

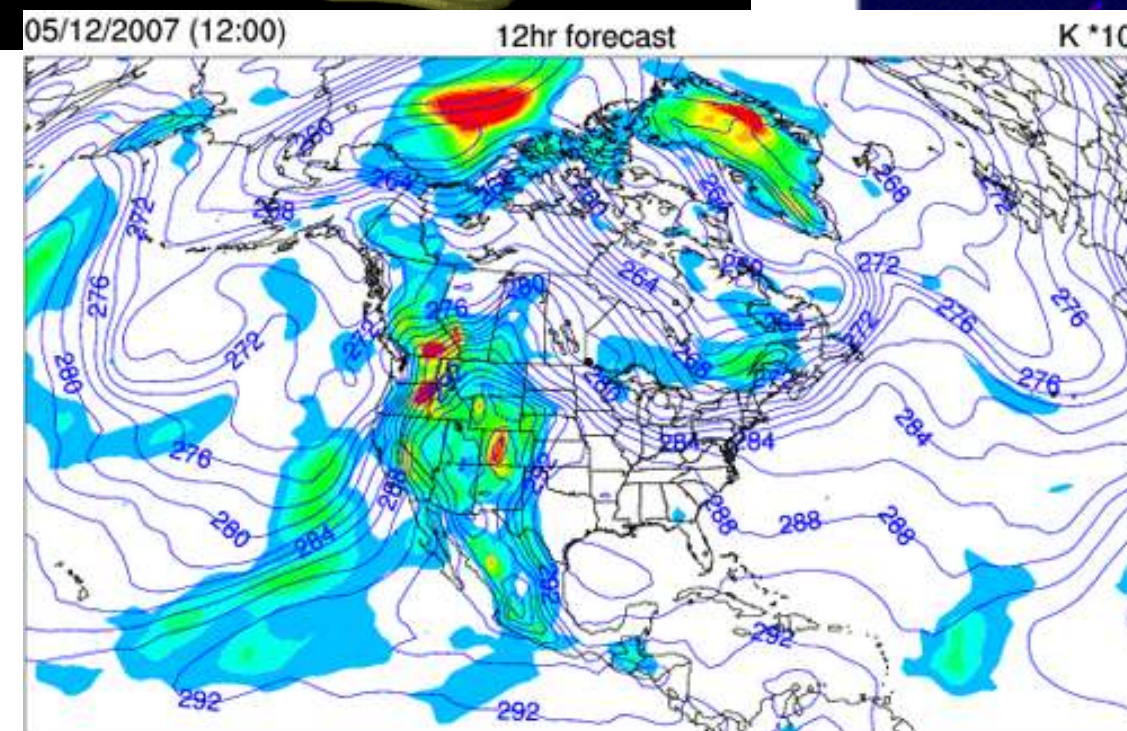
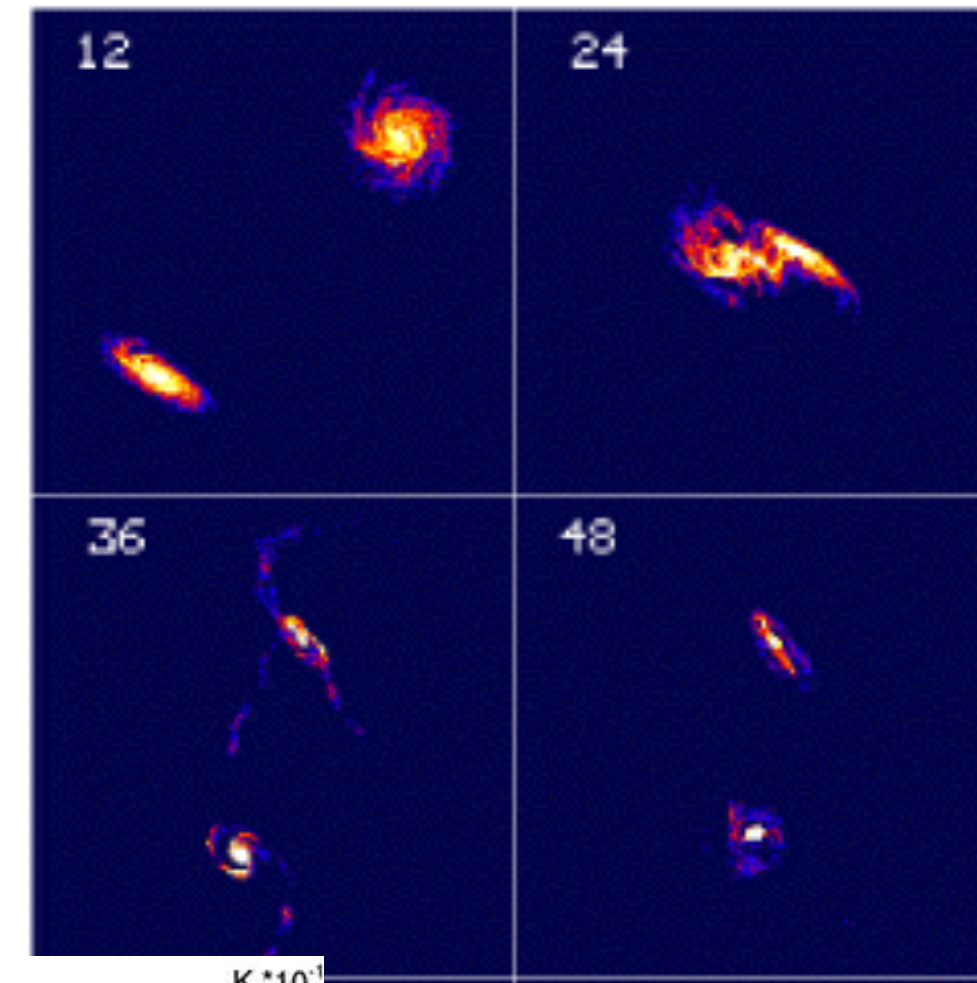
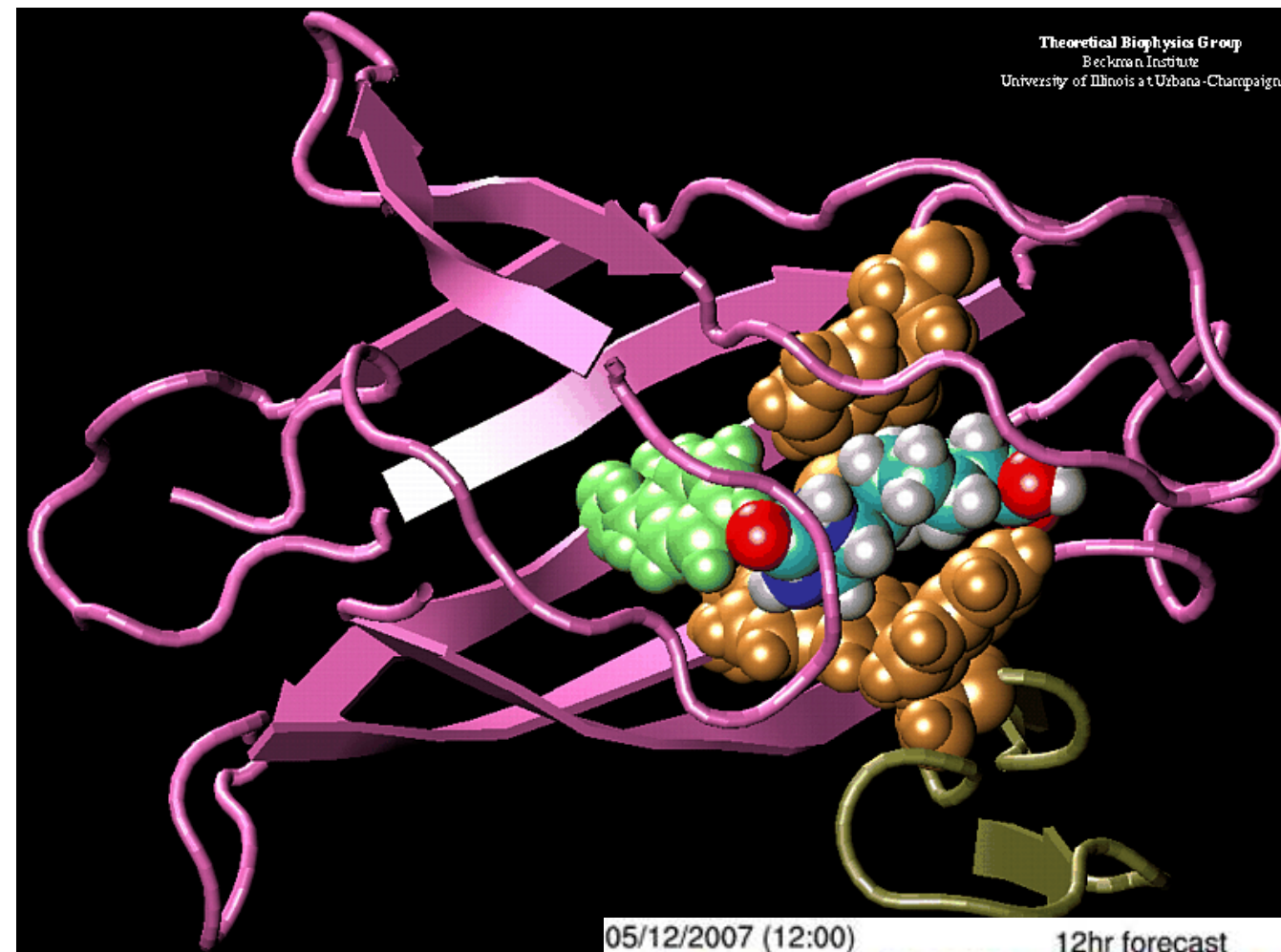


The Visible Human Project

Computer Aided Design (CAD)



Visualisierung wissenschaftlicher Daten



Trainingssimulatoren



immersivetechologies.com



campar.in.tum.de



rioondo.edu



news.erau.edu / Embry-Riddle

Was ist Computergraphik?



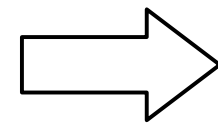
Welche (Teil-)Aufgaben gibt es hierbei zu lösen?



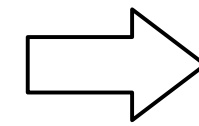
Oder:
[menti.com](https://www.menti.com)
und Code
3587 0466

Die Computergraphik-Prozesskette

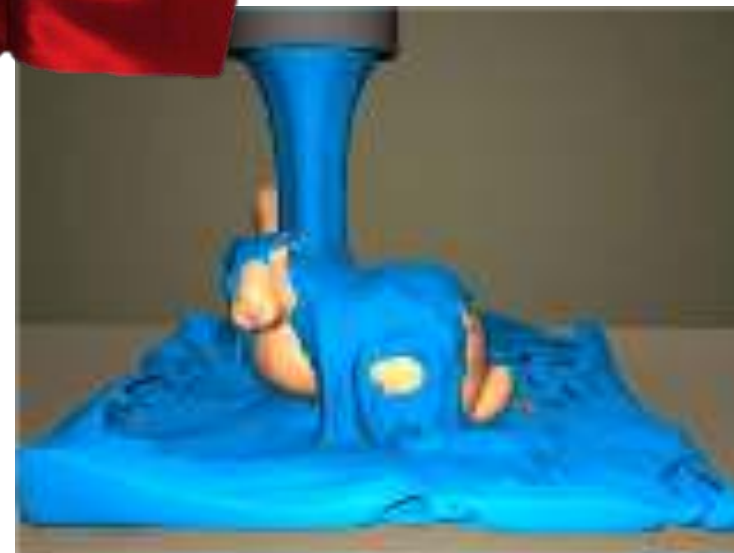
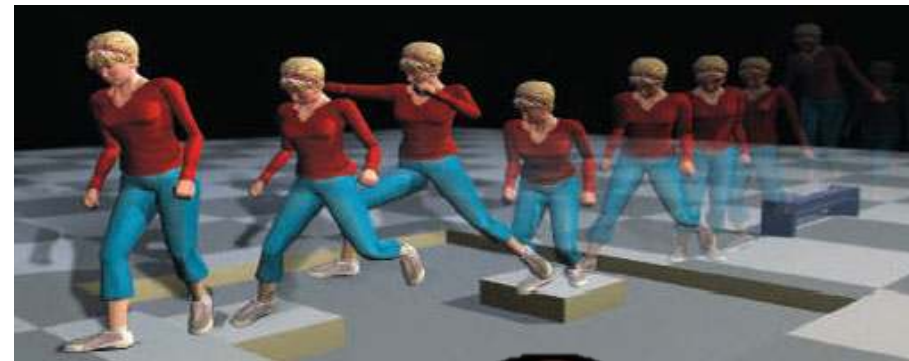
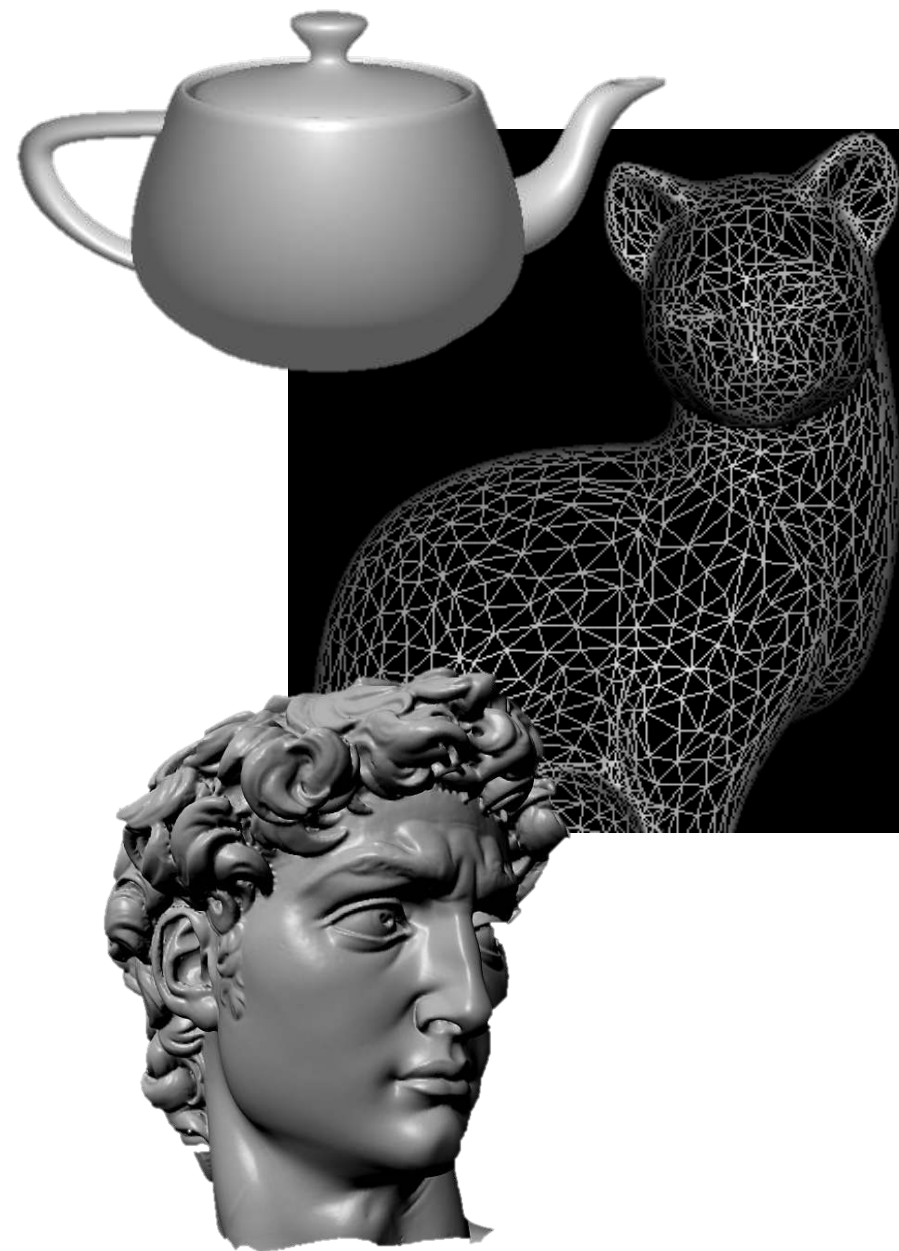
Modelling
(Beschreibung/Processing
der 3D Geometrie)



Animation &
Simulation



Rendering
(Wiedergabe, inkl. Shading,
Lighting, Materials)



Teilgebiete der Computergraphik

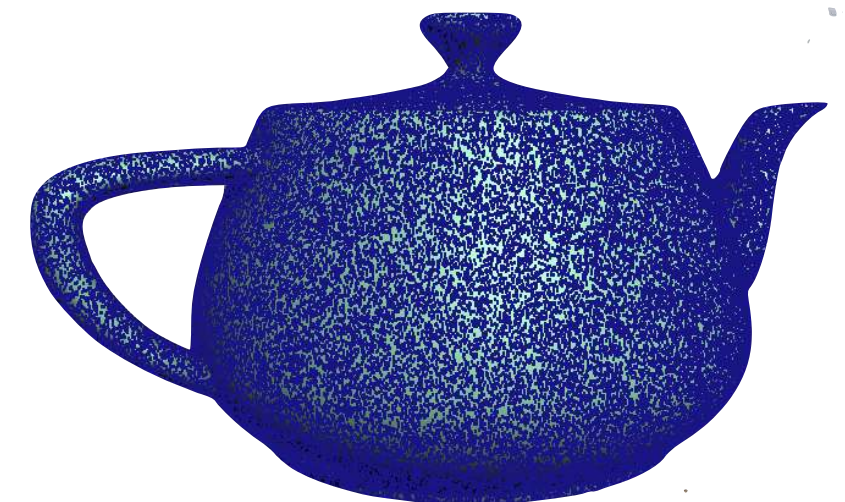
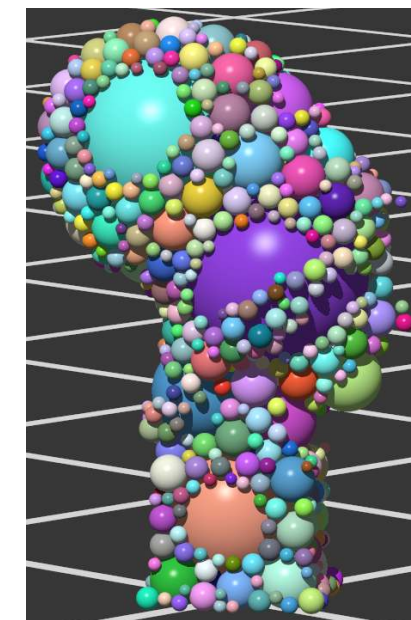
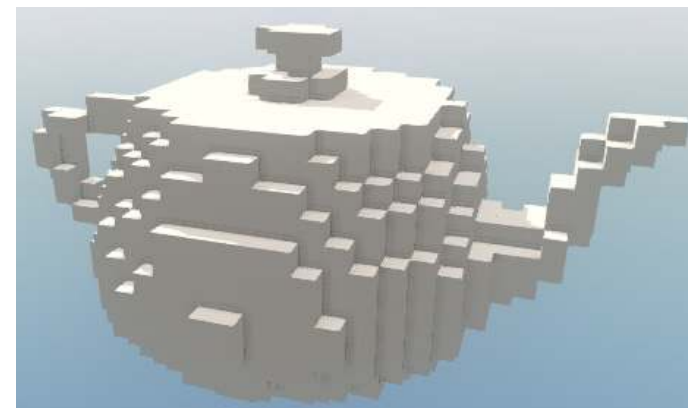
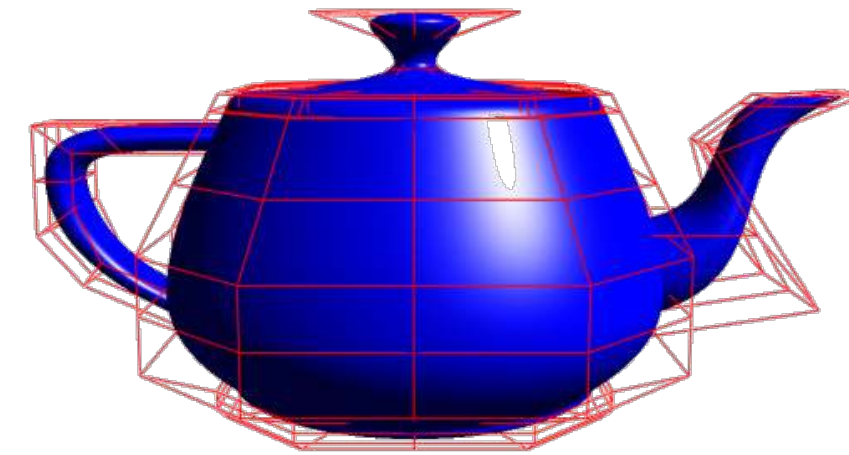
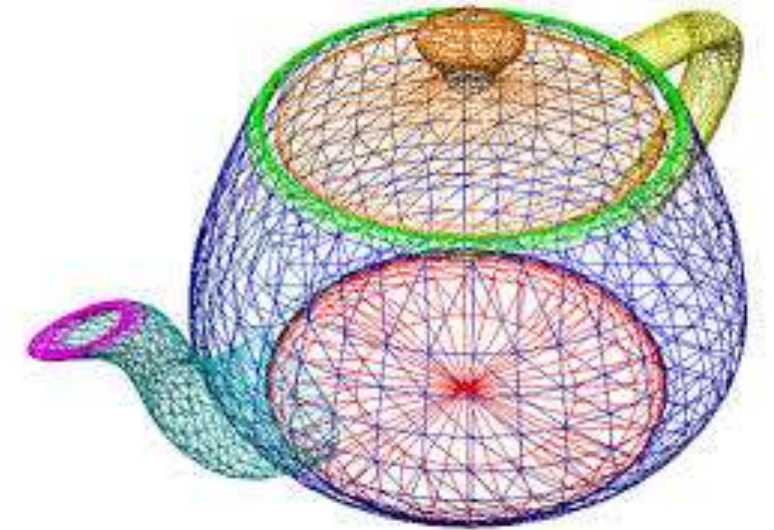
- Die wichtigsten Gebiete:
 - Modellierung
 - Festlegen der Form und Wirkung des äußeren Erscheinungsbildes
 - Interne Datenstrukturen für Objekte, und die ganze Szene, Mesh Processing
 - Rendering
 - Erzeugung des 2D Bildes aus einem 3D Modell
 - Berechnung der Ausbreitung des Lichtes von den Lichtquellen bis ins Auge
 - Animation / Simulation
 - Bewegung der Bilder
 - Implementierung der physikalischen Gesetze (z.B. klassische Mechanik)
- Weitere Gebiete:
 - Interaktion mit dem Anwender (Human-Computer Interaction - HCI)
 - Virtual Reality (VR)
 - Visualisierung (*scientific / information visualization*)

Fragestellungen

- Wie beschreibt man Objekte einer Szene?
- Wie stellt man die ganze Szene und die einzelnen Objekte **schnell** dar?
- Was ist mit Lichtquellen?
- Wie erzeugt man Schatten? ... Verdeckungen? ... Tiefeneindruck?
- Was macht man bei "rauen" Oberflächen?
- Was ist mit kleinen Partikeln wie Nebel, Rauch, Dunst, ... ?
- Physik?
- Animation?

Modellierung – Repräsentation von 3D-Obj.en

- Boundary Representations:
 - Meshes / "polygon soups"
 - Spline-Surfaces (B-Spline, Bezier, etc.)
- Point Clouds
 - Input von Laser Scanners, Kinect, etc.
- Volumen-Repräsentationen:
 - Voxel
 - Kugeln
- U.v.m.



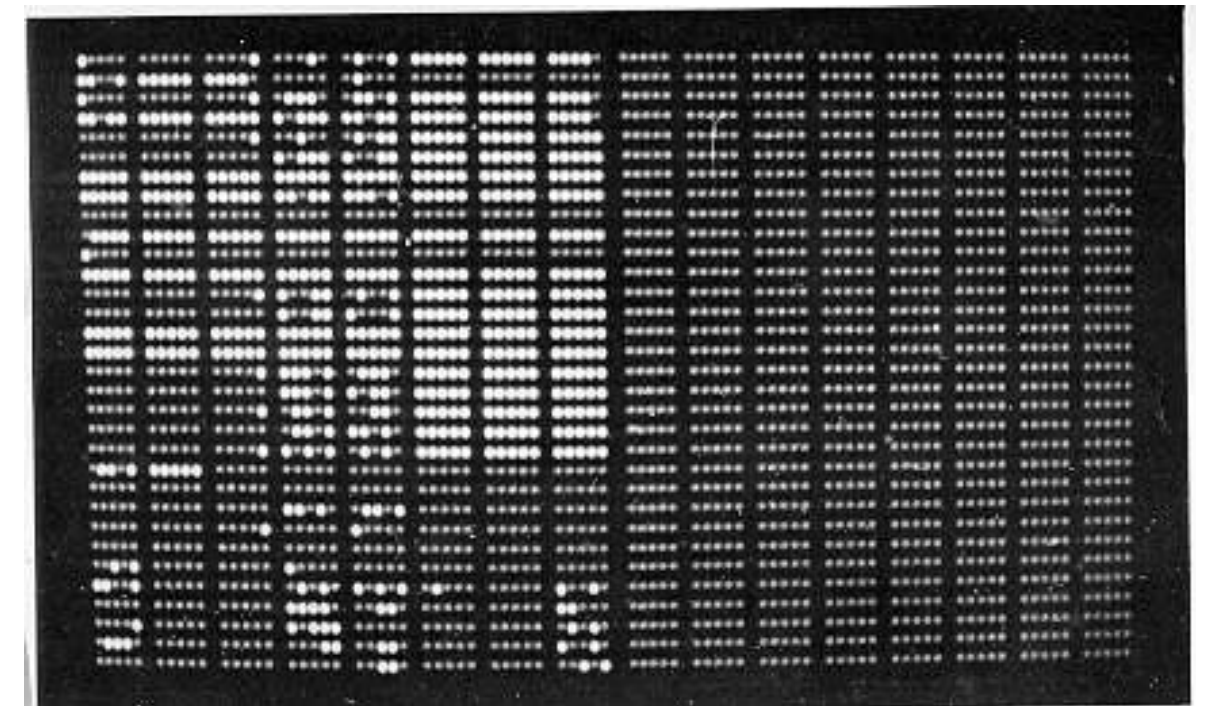
Der *Utah Teapot*: von Hand modelliert von Martin Newell
Mehr zur "Folklore" dazu: http://www.sjbaker.org/wiki/index.php?title=The_History_of_The_Teapot

Kurze Historie der Computergraphik / Rendering



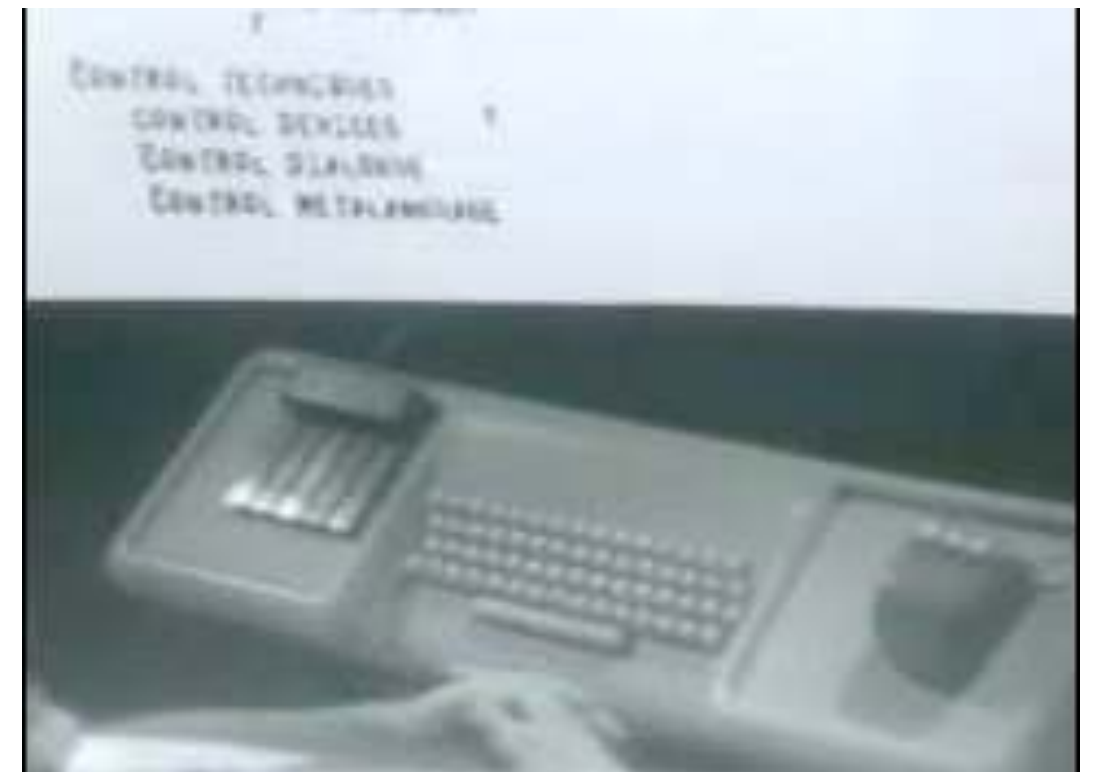
Manchester Mark I

- Am Anfang: noch nicht einmal Text-Displays



Sketchpad (1963) & "The Mother of all Demos" (1968)

- Ivan Sutherland's Sketchpad
 - MIT, 1963
 - Der Beginn der modernen **interaktiven** Graphik
 - Sehr teuer!
 - Viele Konzepte findet man in heutigen Zeichensystemen wieder
 - Pop up Menü
 - Hierarchisches Modellieren
- Doug Engelbart
 - Maus
 - Hyperlinks / Hypertext
 - Email, CSCW
 - Telekonferenz, ...

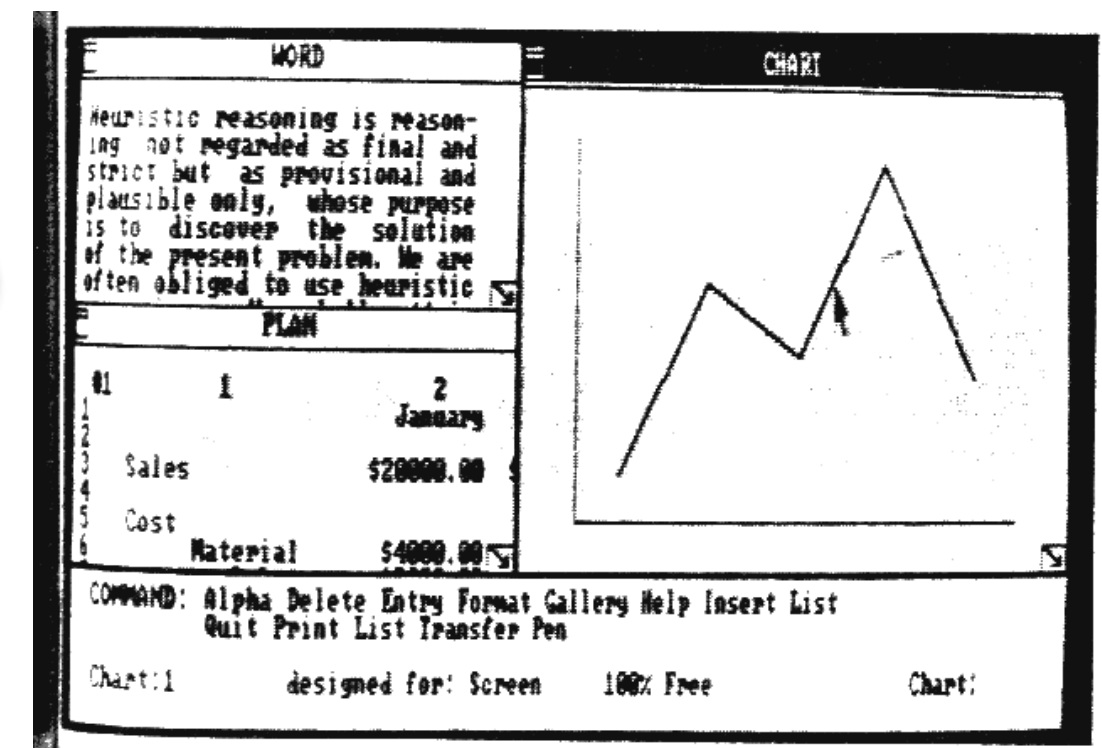


"The Mother of all Demos"

Engelbart ,
1968

Von Text zu GUIs

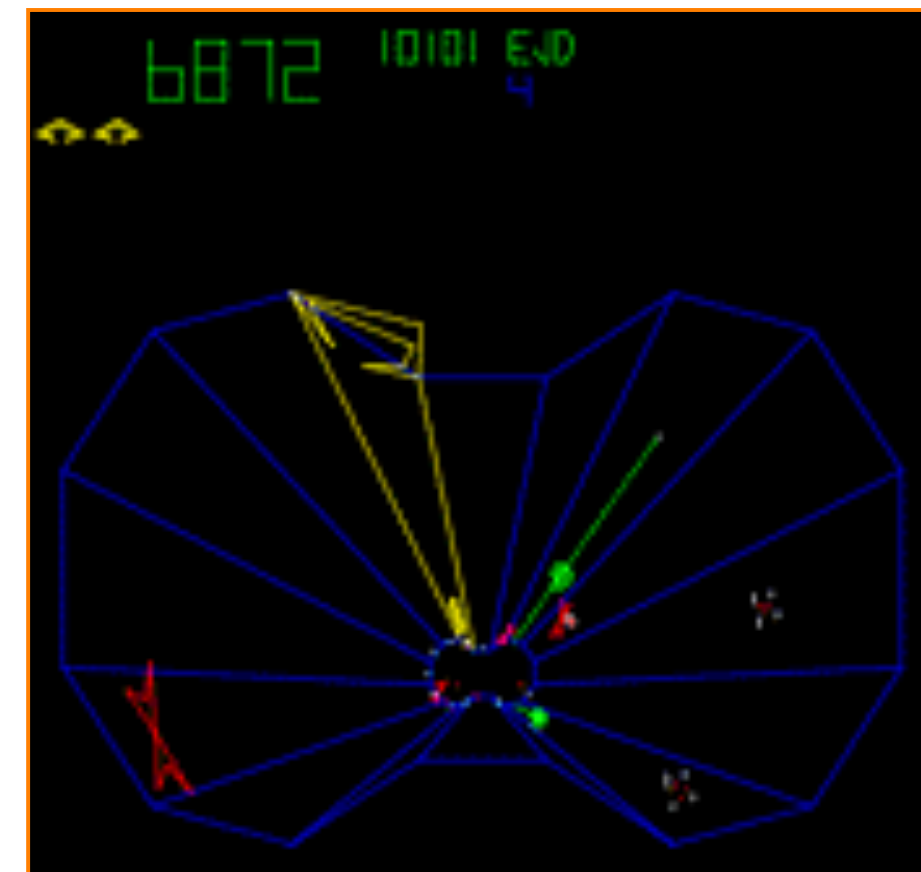
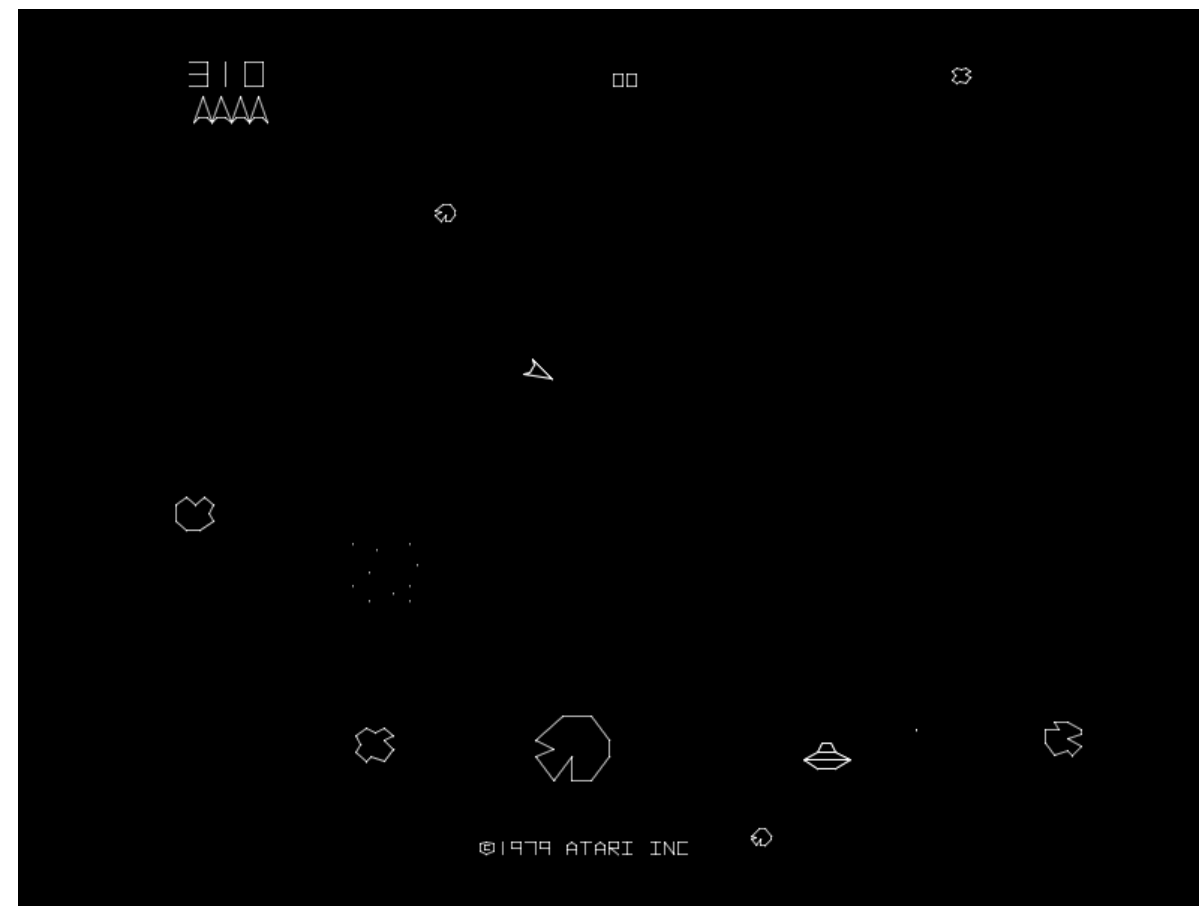
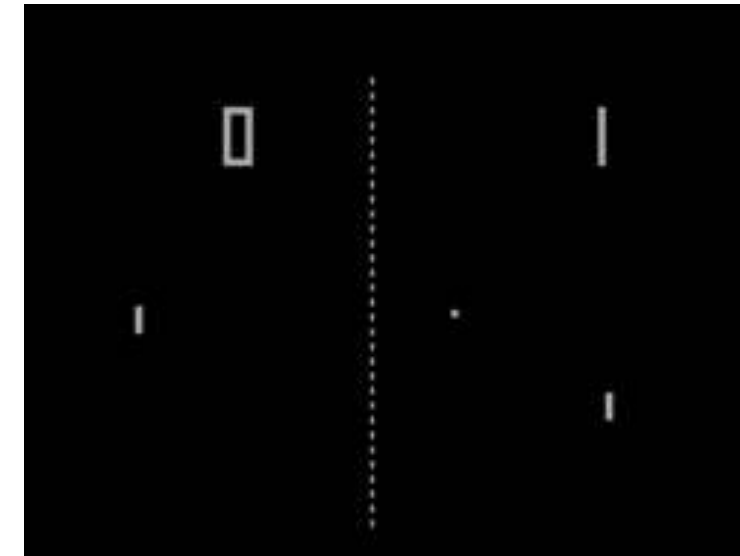
- Ausgedacht vom Xerox PARC etwa 1975
- 1981: "Echtzeit" Vektor-Displays, erste bezahlbare Rastergraphik (Apple II)
- "GUI / Desktop" zuerst kommerziell eingesetzt auf Apple Mac
- Mitte/Ende 80er: C64, IBM PC
 - PCs mit eingebautem Raster-Display
 - Bezahlbare Rastergraphik



Windows 1.0

Erste Spiele

- Zunächst noch reine "Vektorgraphik":
 - Pong
 - Asteroids
 - Star Wars

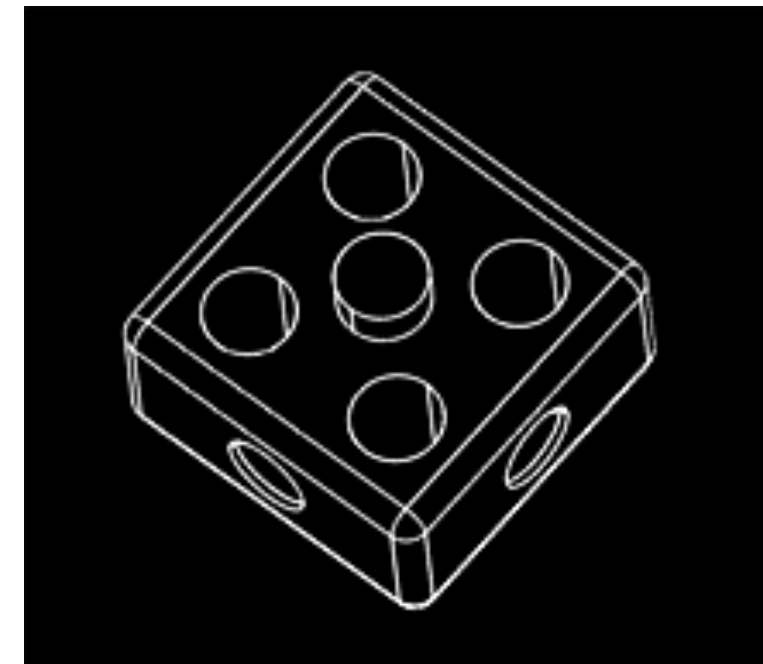


- Dann Rastergraphik:
 - Space Invaders
 - Pac Man



Rendering: 1960 (Sichtbarkeit)

- Roberts (1963), Appel (1967): verdeckte Linien
- Warnock (1969), Watkins (1970): verdeckte Flächen
- Sutherland (1974): Sichtbarkeit = Sortierung



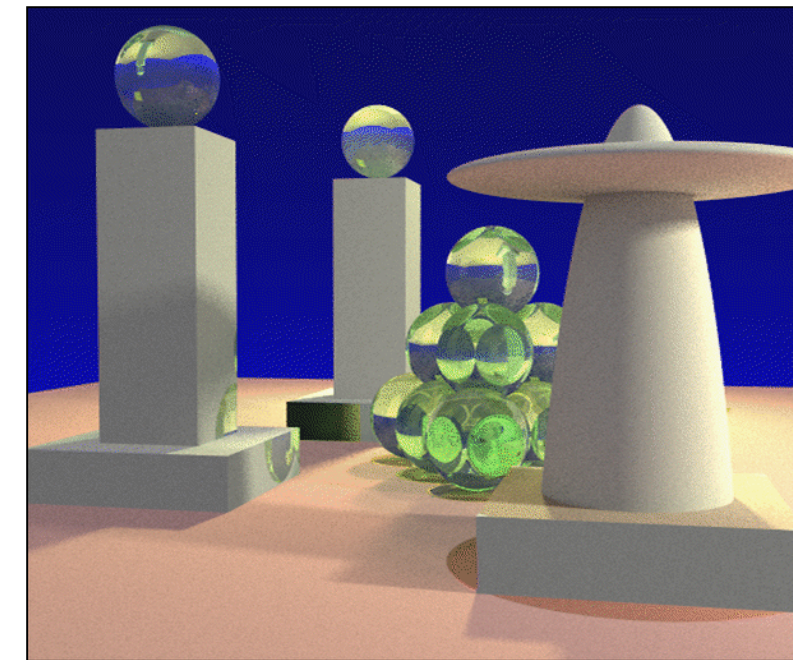
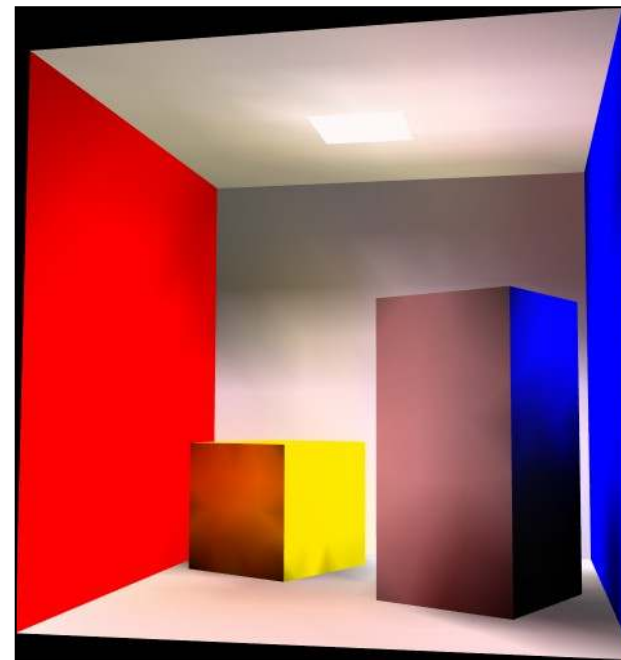
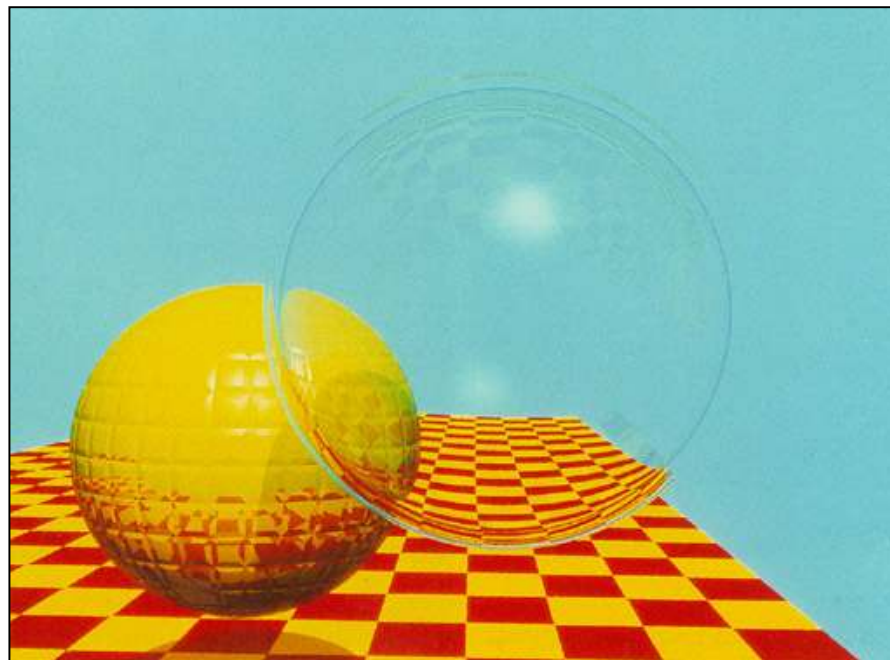
Rendering: 1970 (Beleuchtung)

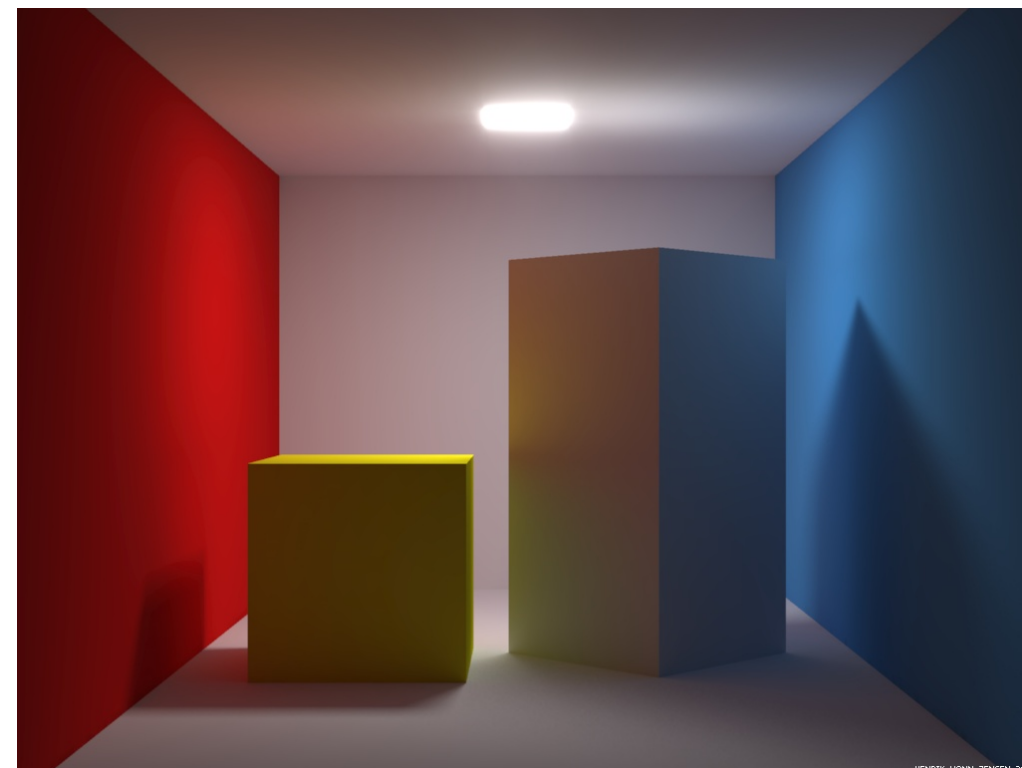
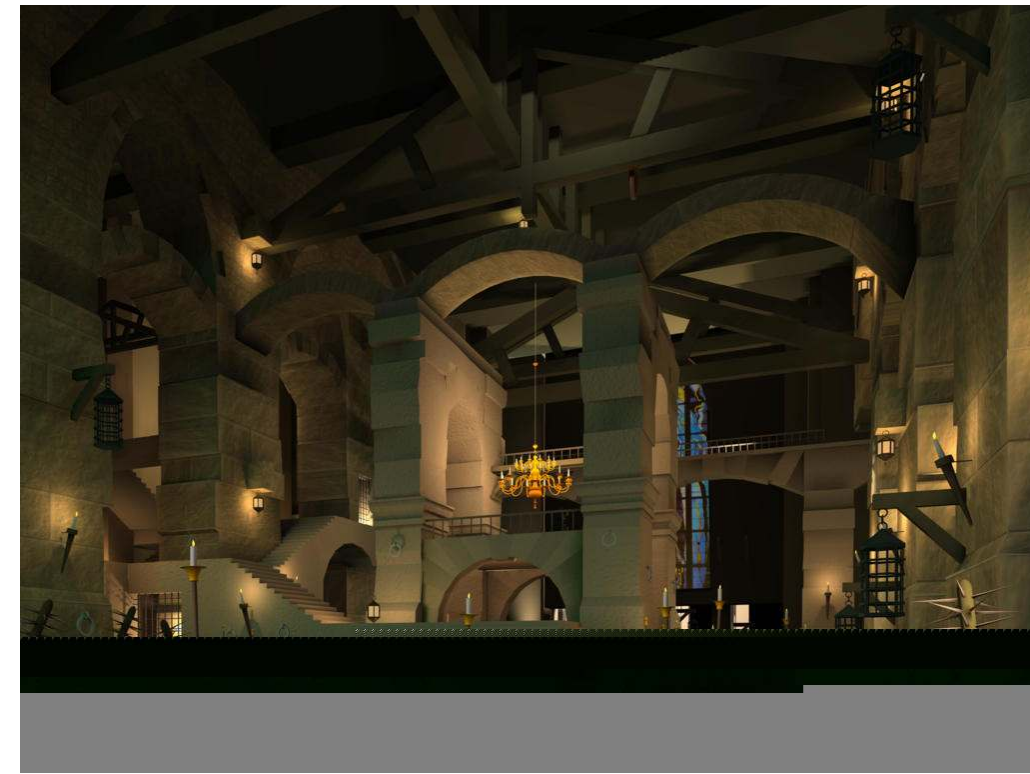
- Raster Graphiken:
 - Gouraud (1971): diffuse Beleuchtung
 - Blinn (1974): gewölbte Oberflächen, Textur
 - Phong (1974): spiegelnde Beleuchtung
 - Catmull / Straßer (1974): verdeckte Flächen

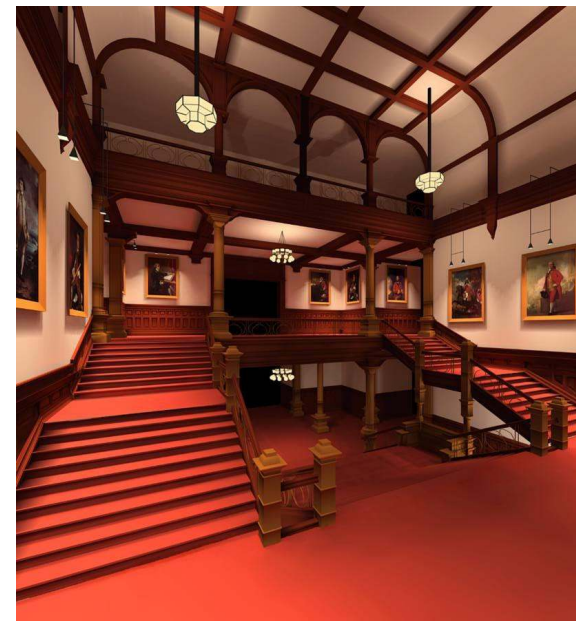
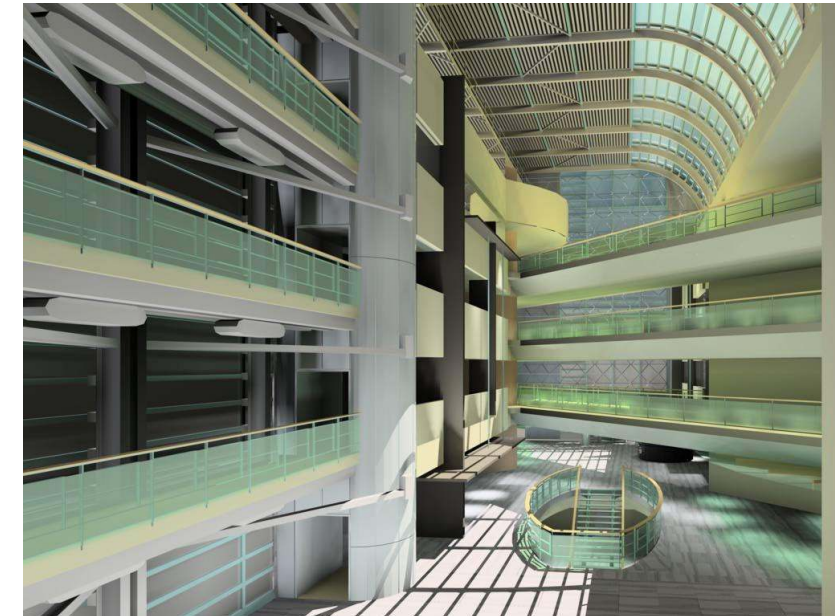


Rendering: 1980, 1990 (Globale Beleuchtung)

- Whitted (1980) : Ray-Tracing
- Goral, Torrance et al. (1984) : Radiosity
- Kajiya (1986) : Die Rendering-Gleichung







Beleuchtungseffekte bei polygonalem Rendering



+



Polygonales Rendering heute ...



- CG1-Level (Rendering)



- CG2-Level (Rendering)



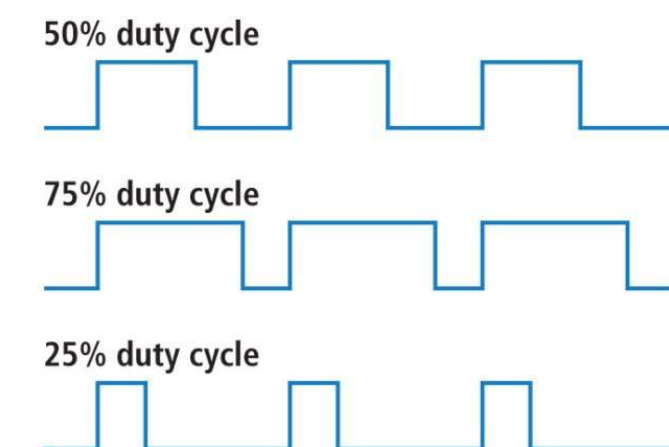
Displays – The Ultimate Display?



Avatar, 2009, James Cameron

Display-Kategorien

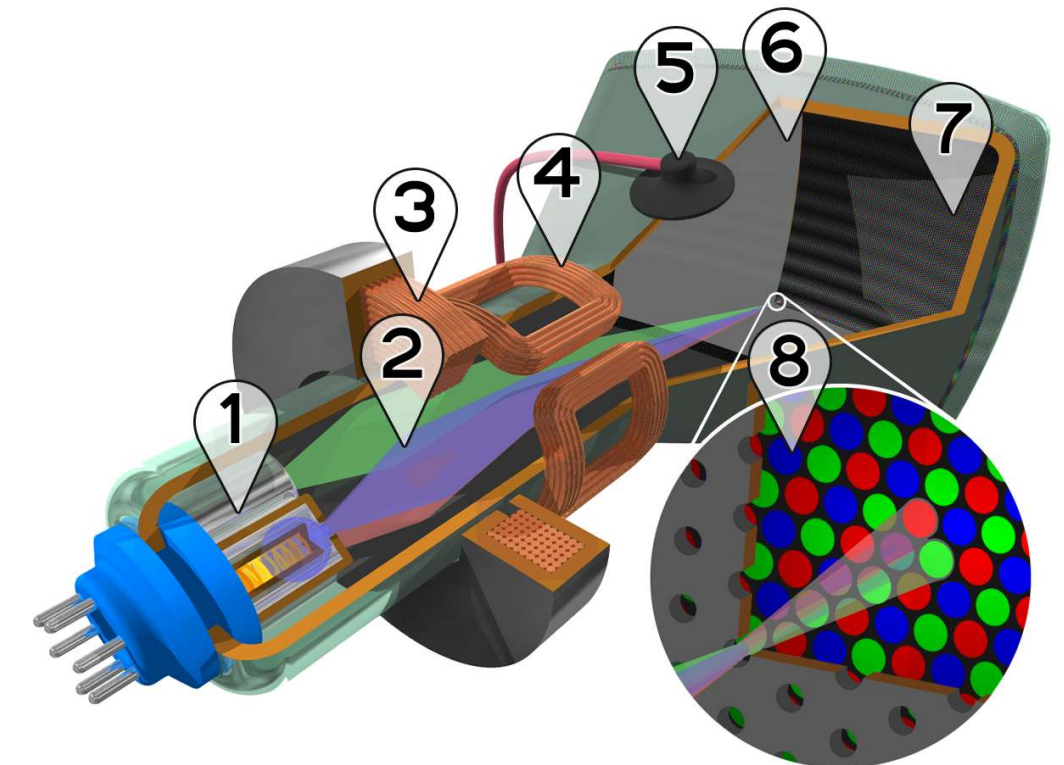
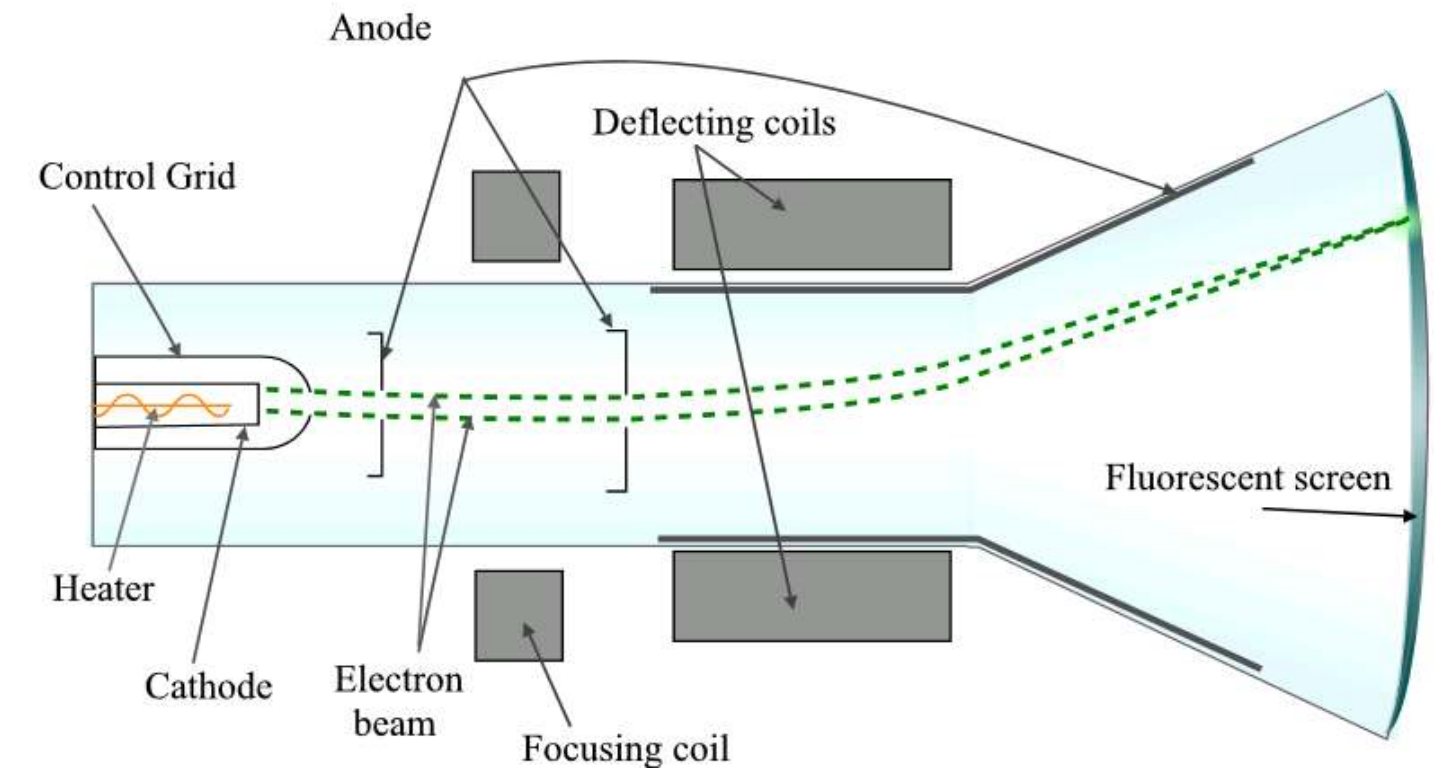
- **Emittierende Displays** (emissive displays):
 - Keine zusätzliche Lichtquelle nötig
 - Beispiele: Kathodenstrahlröhre (CRT), Laser-Projektion, LEDs
 - I.a. beliebige Helligkeitszwischenstufen durch verschiedene Spannung
- **Light Valve Displays** ("Lichtventile"):
 - Benötigen separate Lichtquelle, z.B. rückwärtige Beleuchtung
 - Beispiele: LCD, Digital Micromirror Device (DMD), E-Ink,
 - Display lässt Licht passieren / blockiert Licht
 - Manche können nur komplett an/aus, Abstufungen durch sog. Pulse Width Modulation (Duty-Cycles)



Kathodenstrahlröhre (CRT, Braunsche Röhre, 1897)

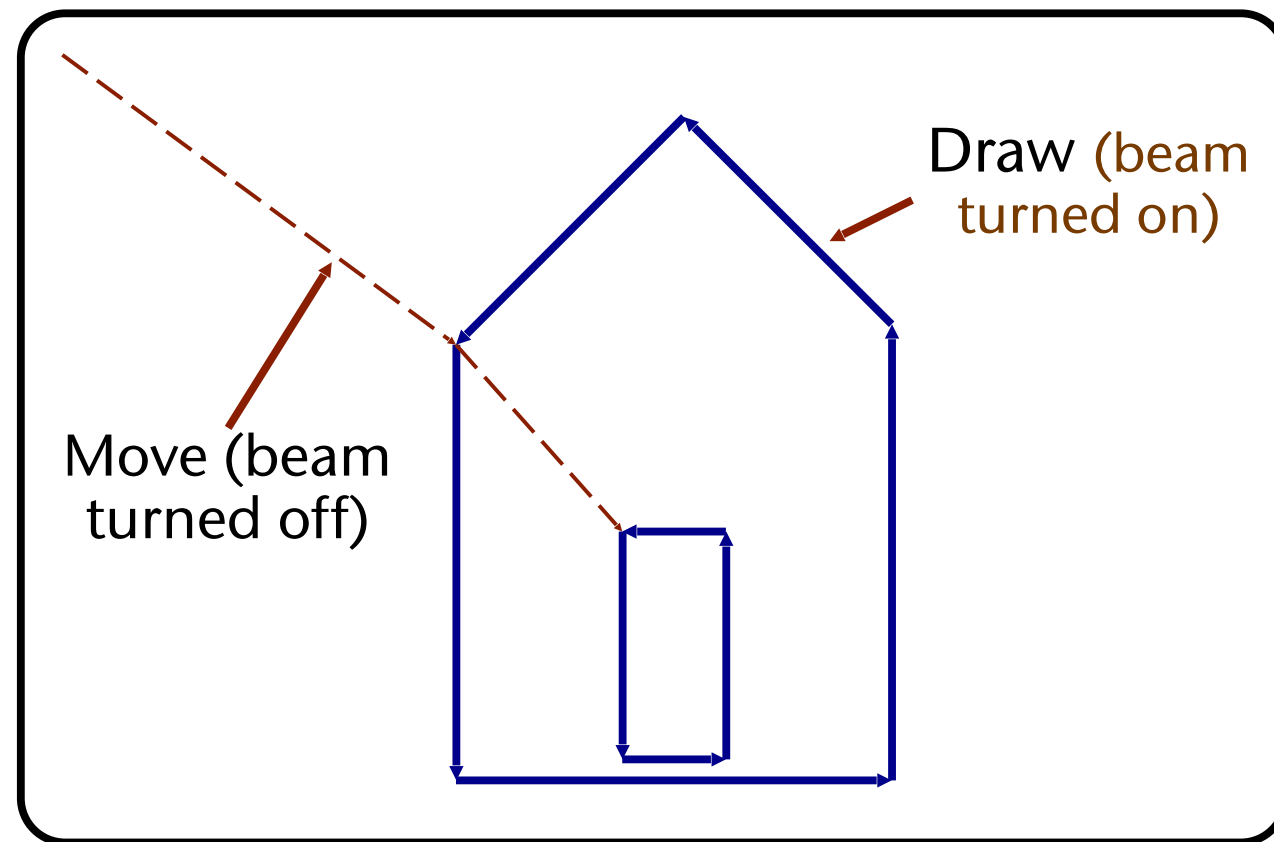


- Elektronen werden
 - erzeugt durch Erhitzung der Glühkathode (1)
 - beschleunigt in Richtung Anode (5)
 - fokussiert (3)
 - abgelenkt (4)
 - gefiltert durch Lochmaske (6)
 - treffen auf Phosphorpunkte (8)
- Lichterzeugung und Farben:
 - Phosphor-Atome "konvertieren" Elektronenbeschuss in Photonen
 - 3 Arten → rot, grün, blau; dazu drei Elektronenstrahlen



Vektor Displays / Vektorgrafiken

- Bis Anfang / Mitte der 80er
 - Steuere X, Y durch die Spannung an den vertikalen/horizontalen Ablenkspulen
 - Oft wird Intensität durch Z geregelt



Tempest



Battlezone

Vektor-Displays heute

- Hauptsächlich für “Entertainment displays” (Laser Shows, Exhibits, ...)



Chalky

Refresh (Aktualisierung)

- Ein Bild muss aufgefrischt werden, um ein neues Bild darzustellen
 - Aktiviert der Elektronenstrahl eine Region von Phosphoratomen, so verblasst diese nach einer Weile (einige Millisekunden)
- Folge: der Elektronenstrahl muss regelmäßig alle Stellen des Bildes treffen, um Flimmern zu vermeiden
- Kritische Frequenz: 25 Hz (Vollbilder!)
- Max. mögliche Refresh-Rate hängt bei Vektordisplays von Anzahl und Länge der Linien ab → beschränkte Komplexität der Szene
- Persönliche Konvention auf den Folien: **Begriffe**, die neu definiert werden, werden mit **blauer** Schrift geschrieben (egal wo auf der Folie)



21

20

EXPERIENCE
SIGGRAPH

EXPERIENCE
SIGGRAPH



EXPERIENCE
SIGGRAPH

EXPERIENCE
SIGGRAPH



EXPERIENCE
SIGGRAPH

EXPERIENCE
SIGGRAPH

EXPERIENCE
SIGGRAPH

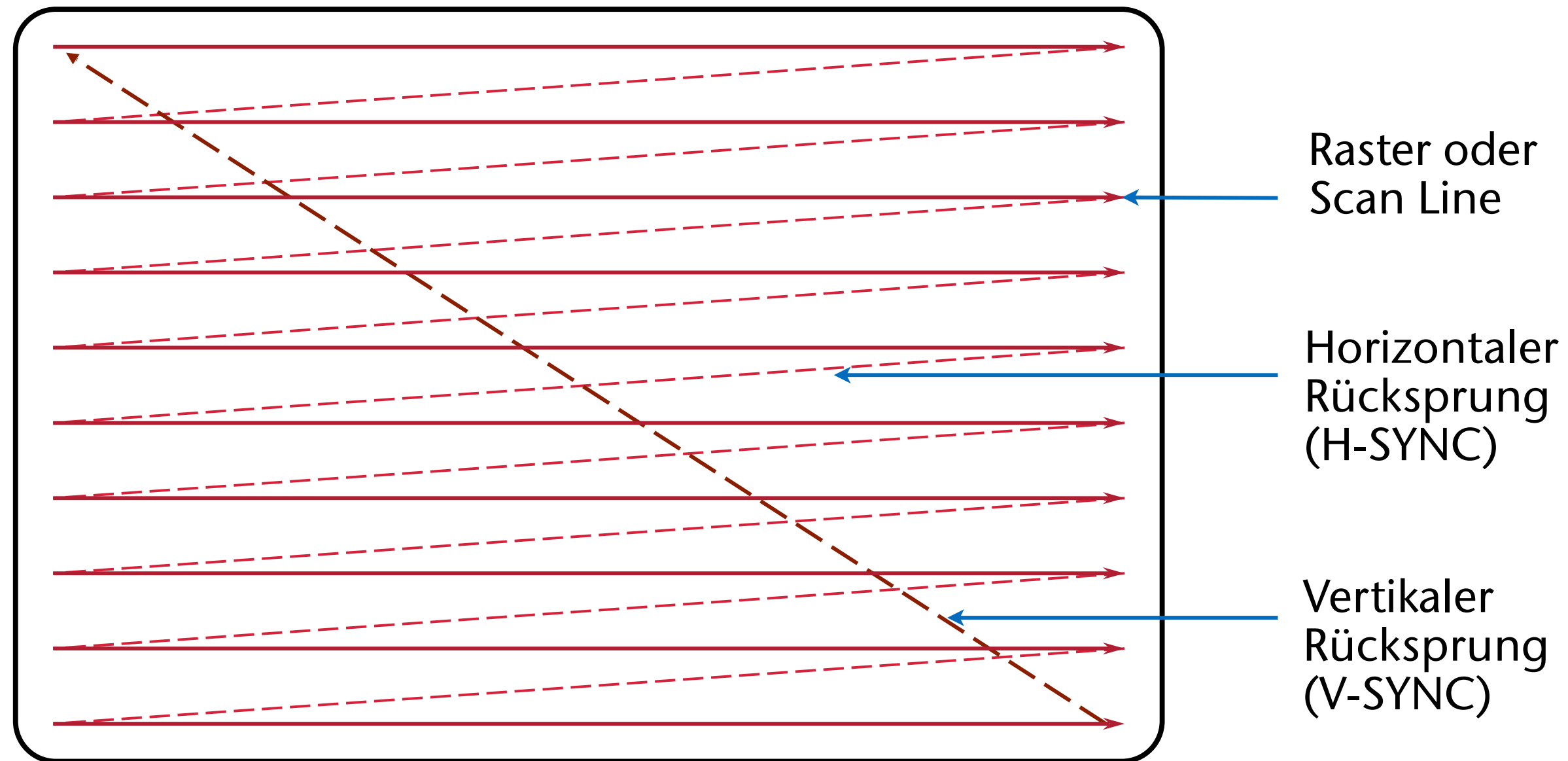
Bitte spekulieren: woher kommt das "Flackern"?



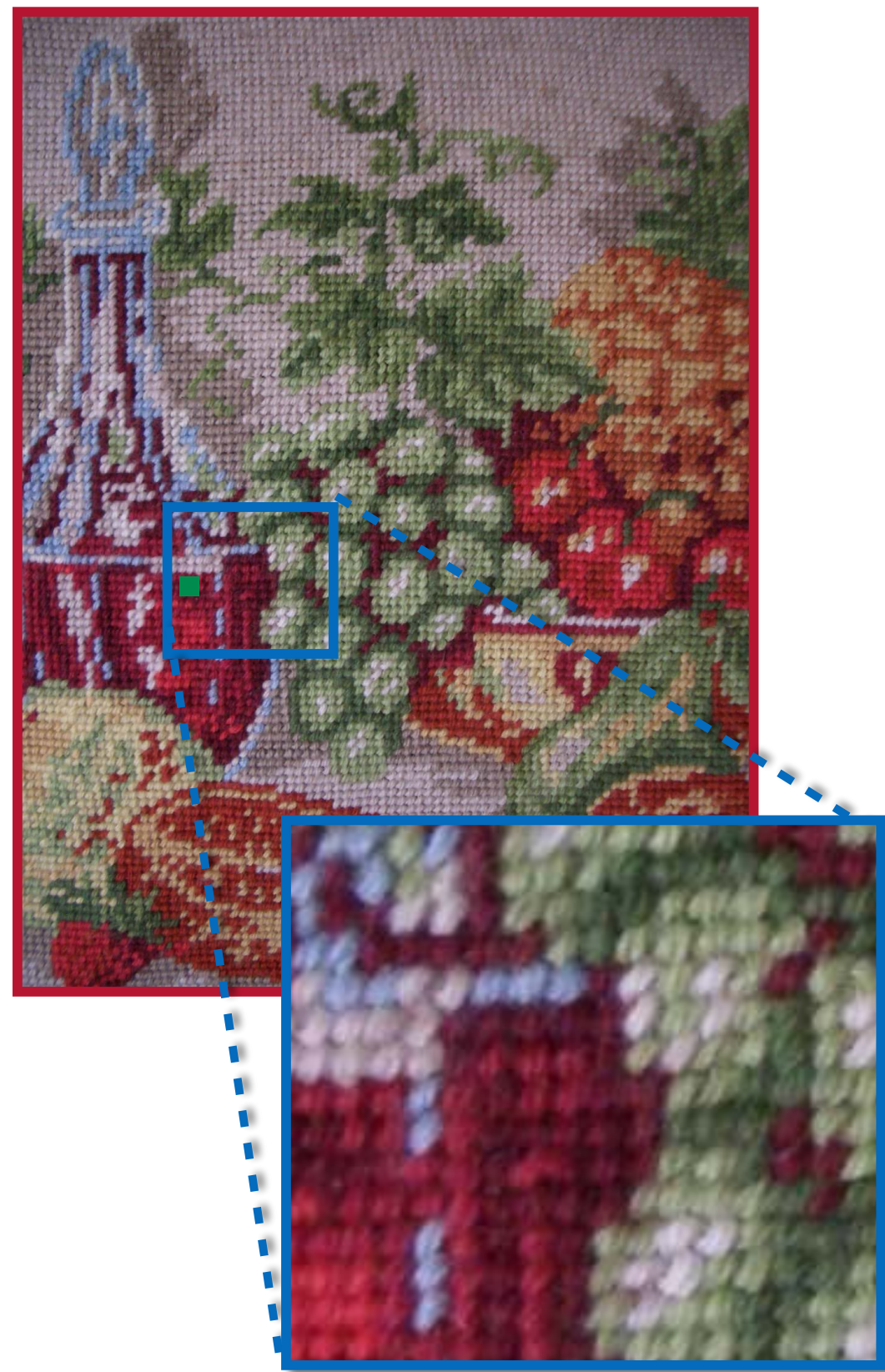
Oder:
[menti.com](https://www.menti.com)
und Code
3587 0466

Rastergraphik (Raster / Scanline Displays)

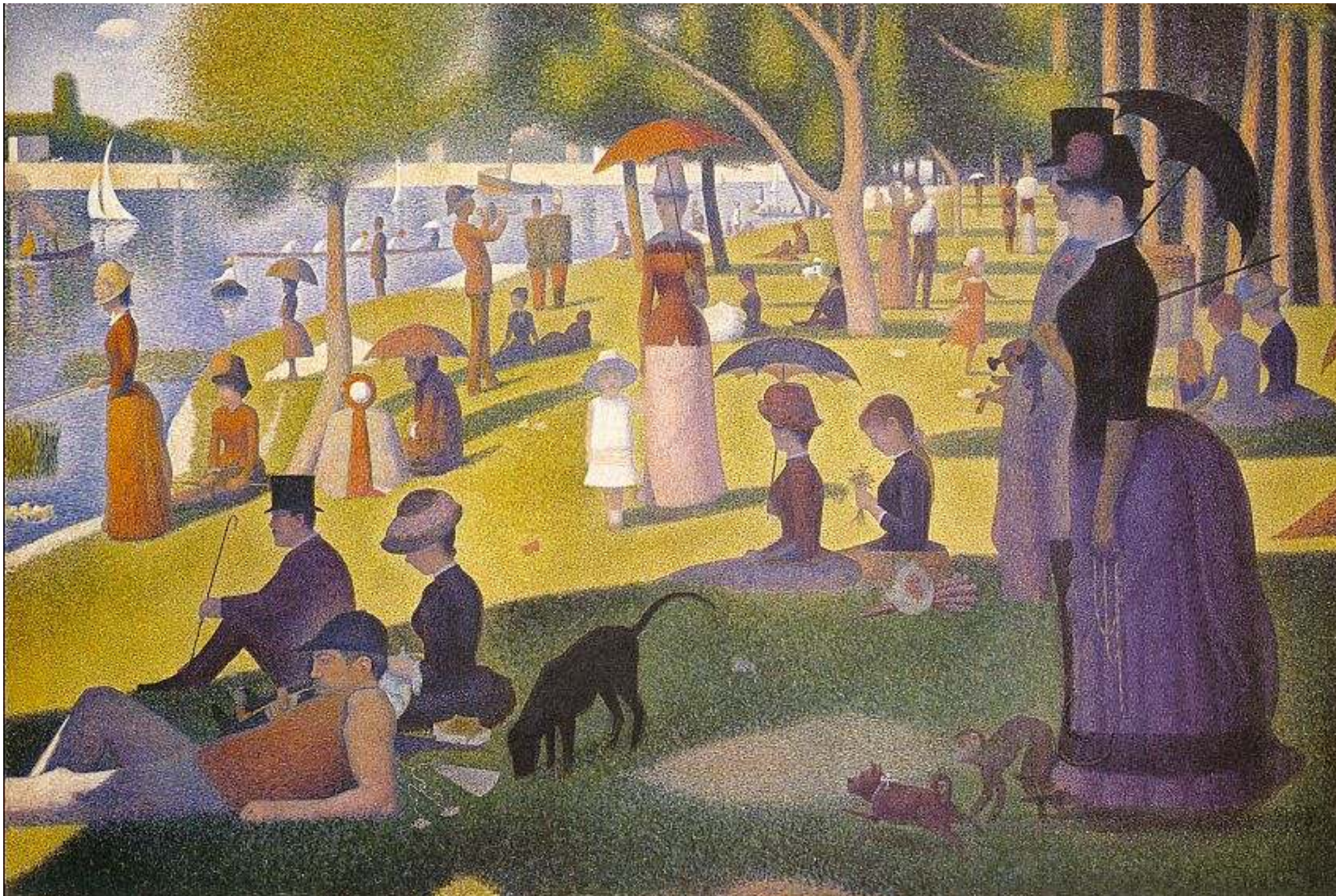
- Heutzutage sind fast alle Displays Raster-basiert
- Speicherung von Bildern als Bildpunktmatrix
 - Feste Informationsmenge pro Bildpunkt (und damit: pro Bild)



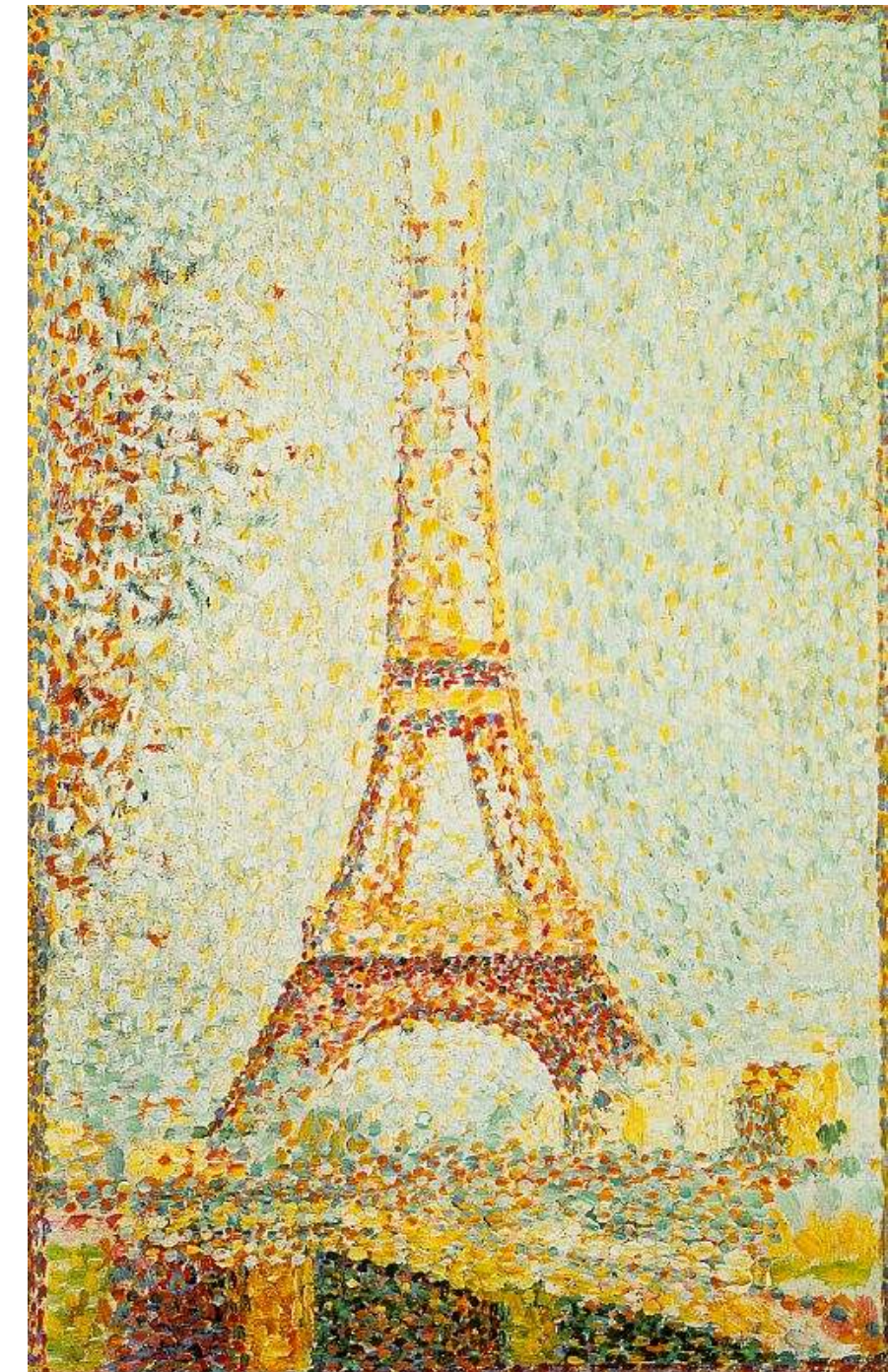
Beispiele aus anderen Bereichen



Die Pointillisten

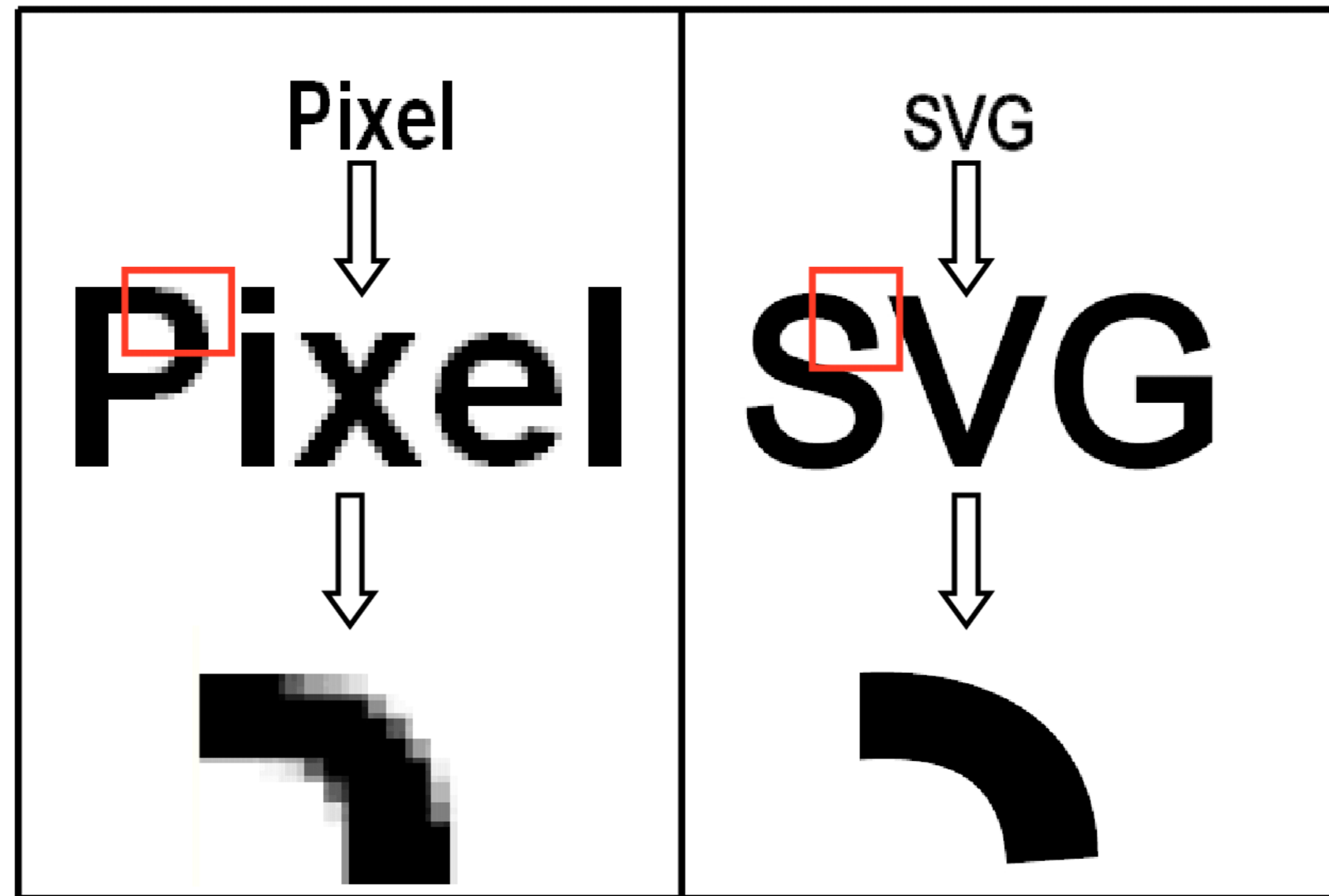


Seurat, A Sunday Afternoon on the Island of La Grande Jatte, 1884-86



Seurat, The Eiffel Tower, 1889

Kleiner Exkurs: Pixelgraphik vs. Vektorgraphik



Beispiele und Vor-/Nachteile für Pixel-/Vektorgraphik



Oder:
[menti.com](https://www.menti.com)
und Code
3587 0466

Bildformate für Pixelgraphik & Vektorgraphik

Vektorgraphik

Linien- und Kurvenbeschreibungen für geometrische Formen, sog. *Paths* (auch Text)

Vorteile

- Skalierung ohne Qualitätsverlust
- Kompression / geringe Dateigröße
- Textbearbeitung

Vertreter: PDF, SVG

Pixelgraphik (aka. Rastergraphik)

Quadratische Bildpunkte im Raster, denen jeweils eine Farbe zugeordnet ist

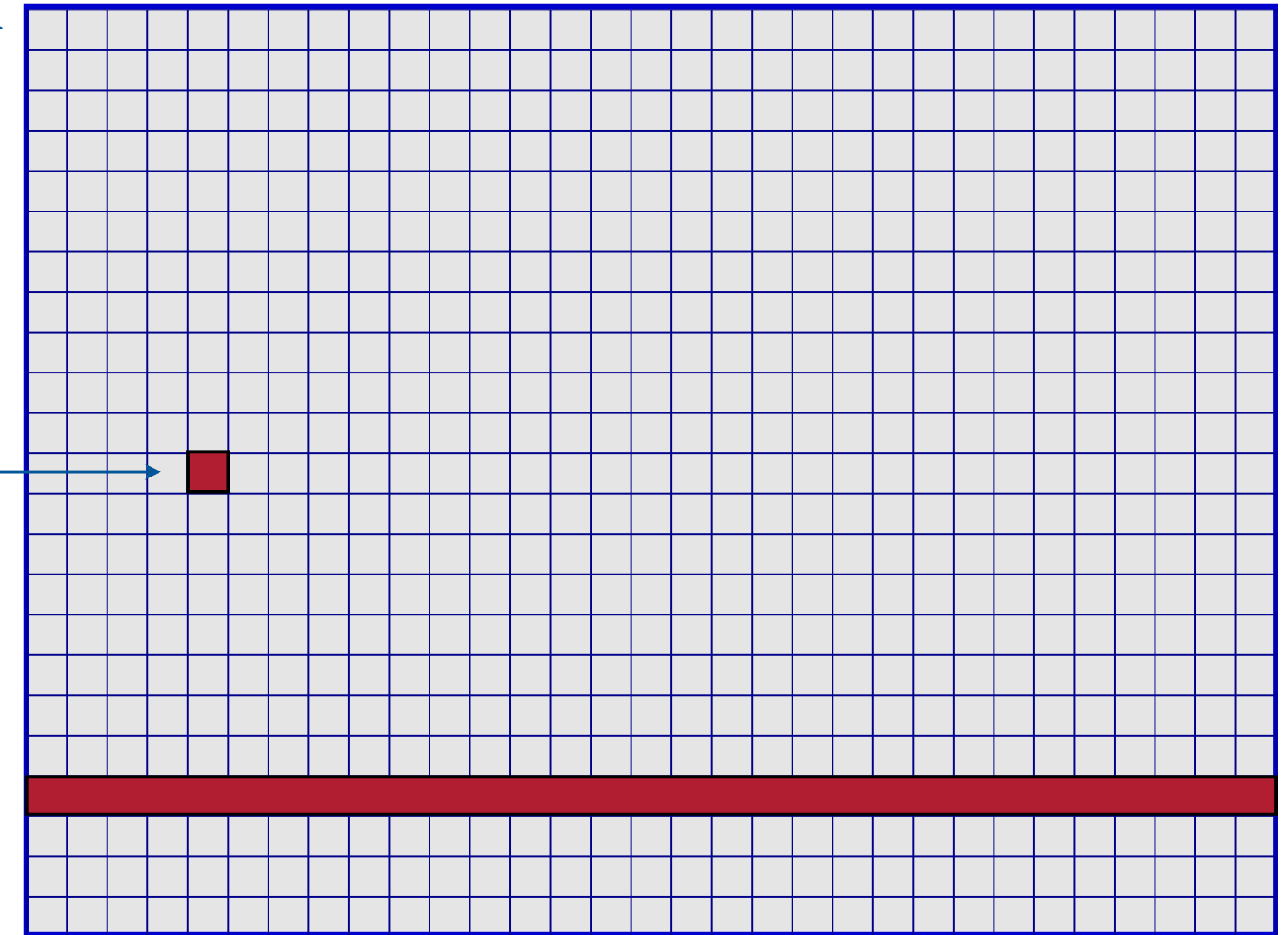
Vorteile

- Programmunabhängig
- Bearbeitung jedes einzelnen Bildpunktes
- Detailreicher

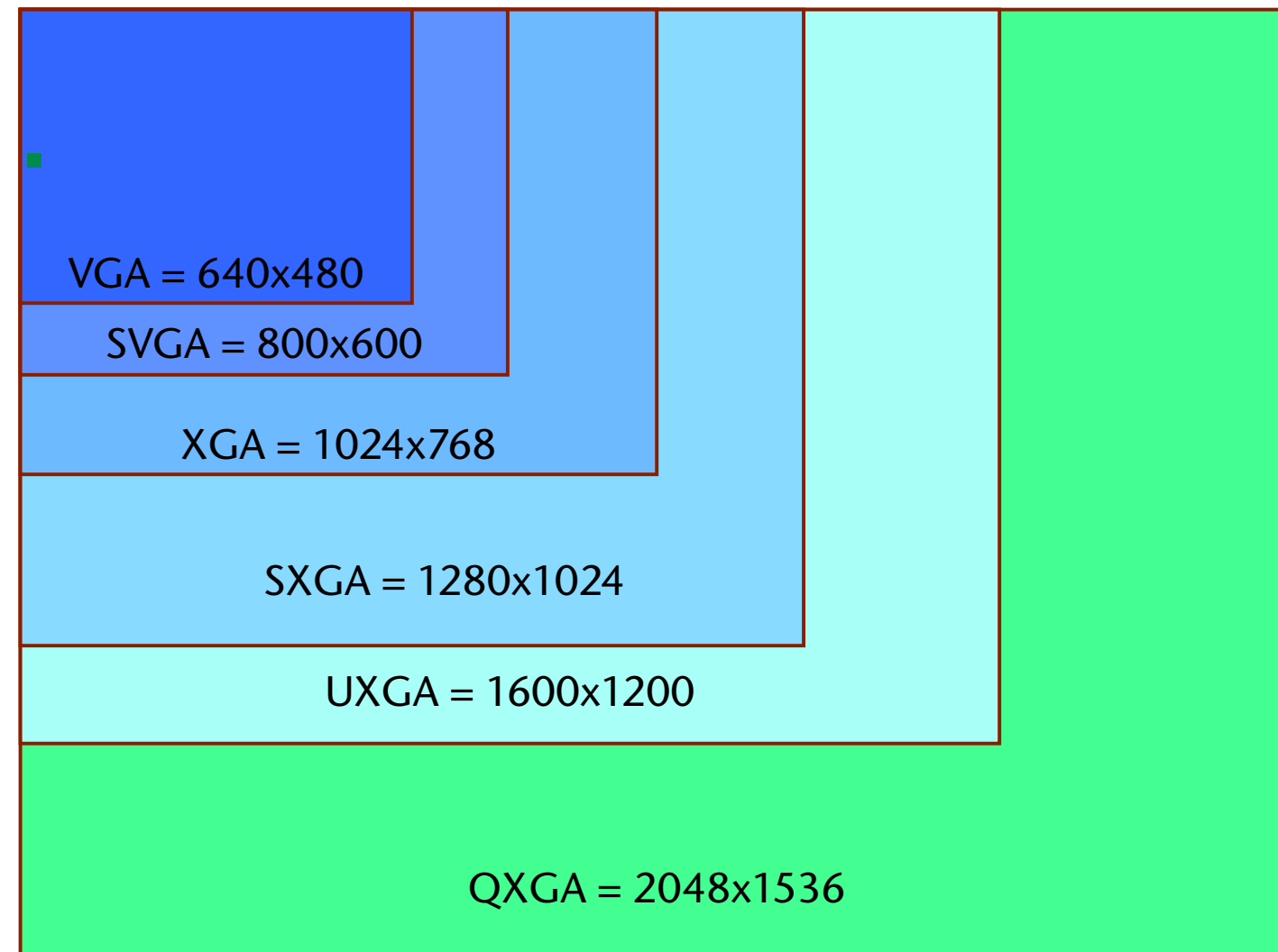
Vertreter: JPG, PNG, BMP, GIF

Einige Fachbegriffe

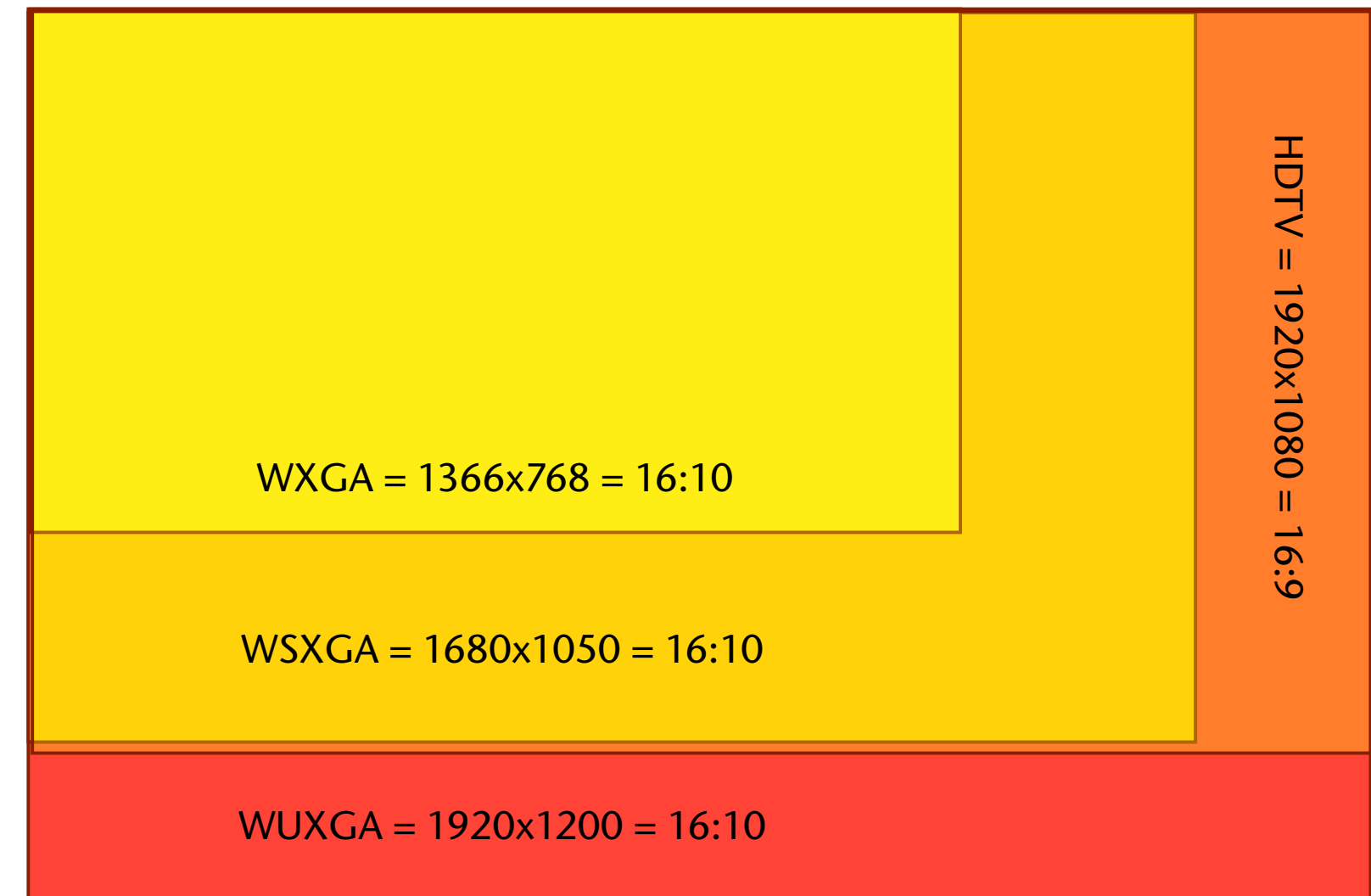
- **Frame** —————→
 1. ein 2D Array von Pixeln oder Zellen
(wird auch so gespeichert)
 2. Einzelbild auf dem Monitor
- **Pixel** ("picture element"): eine einzelne Zelle eines Frames
 - Speichert nicht nur Farben!
- **Scanline**: eine Reihe von Pixel —————→
- **Auflösung**: eigentlich Pixel pro Zoll (ppi); hier Größenbeschreibung von Bildern (z.B. 1280x1024)
- **Aspect ratio** = Breite : Höhe (früher 4:3, jetzt immer mehr 16:9)



Standardauflösungen

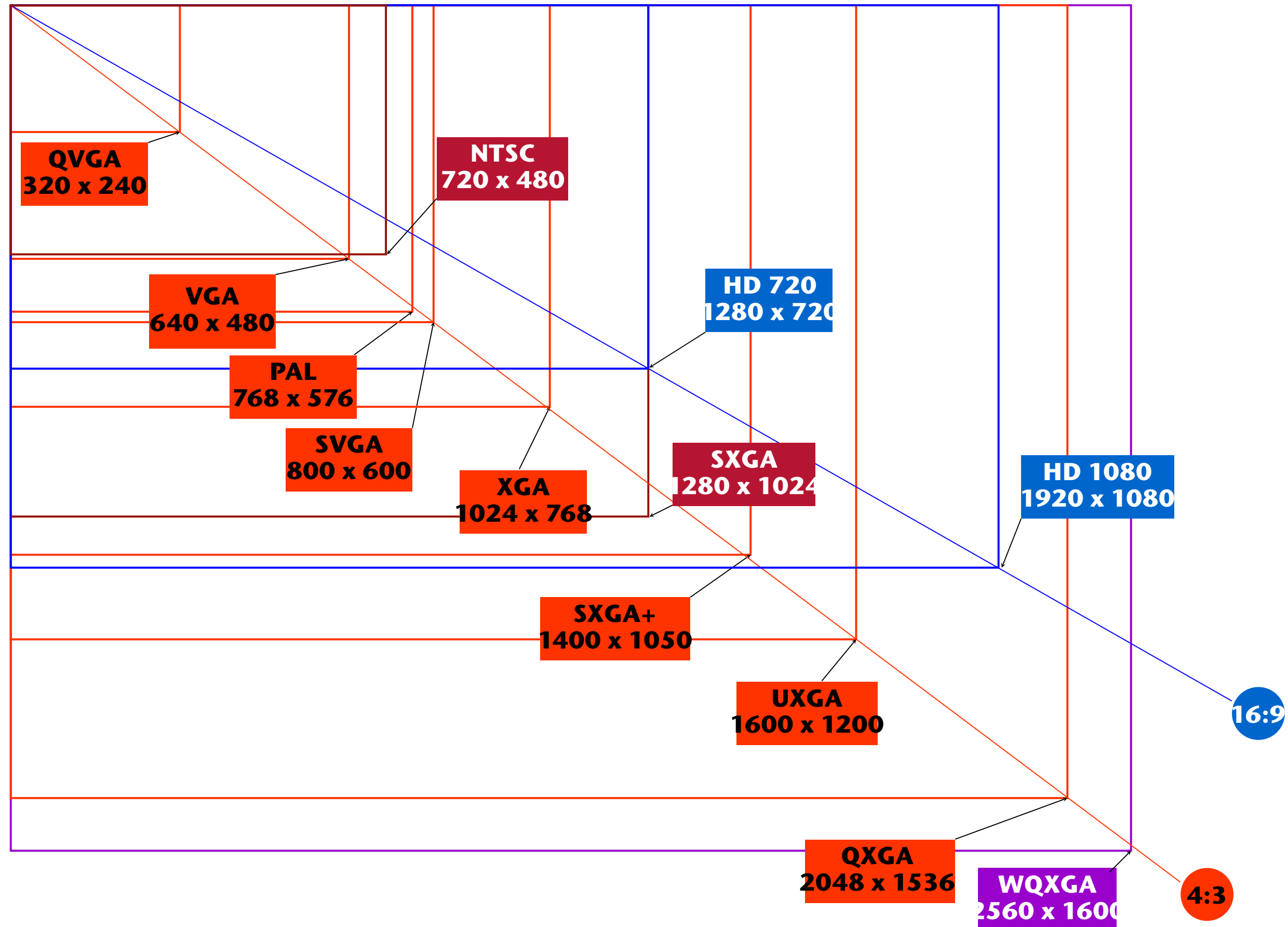


Standardauflösungen:
diese haben eine *aspect ratio* von
 $4:3 = 1.33:1$, außer SXGA mit $1.25:1$

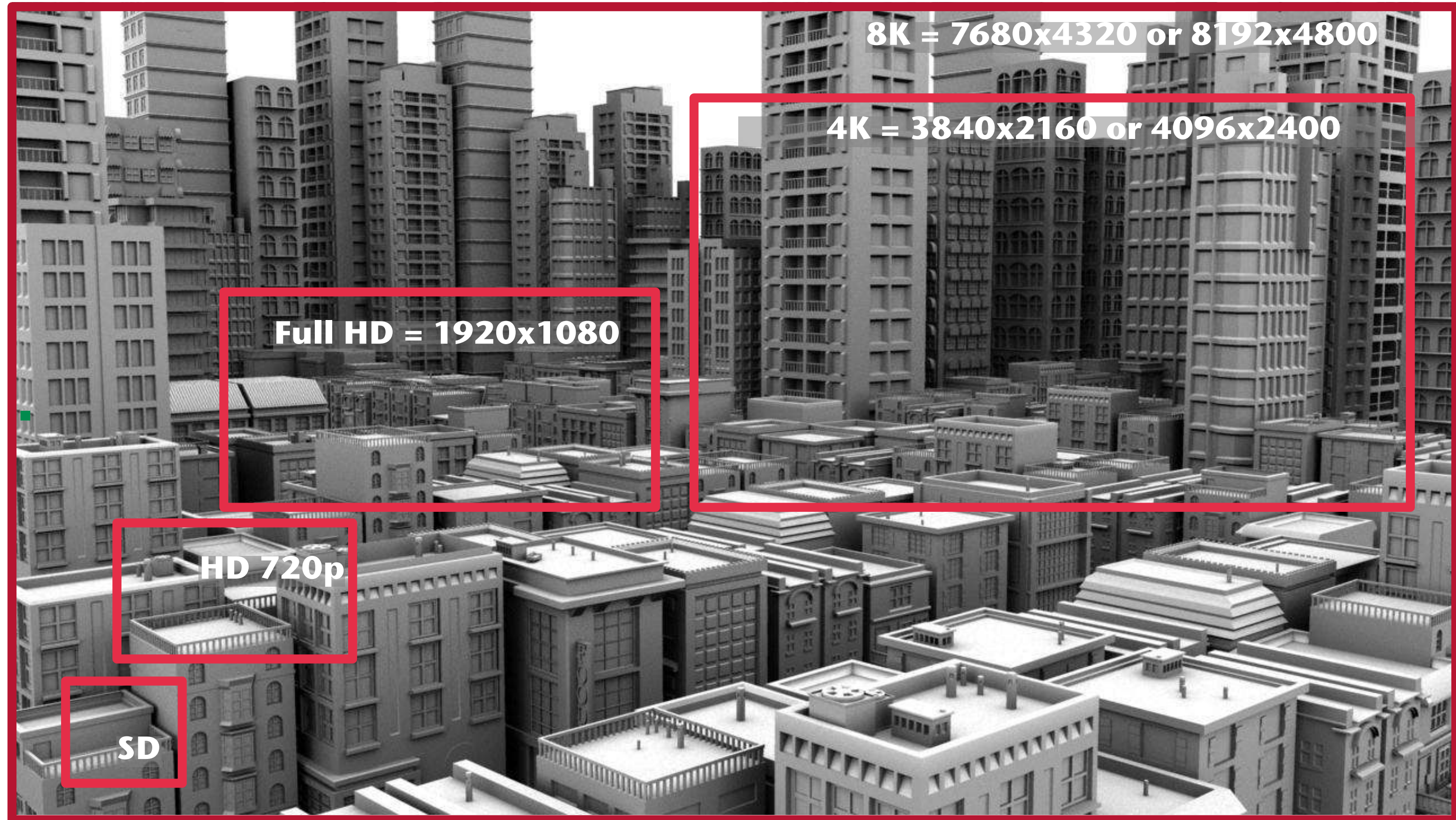


Wide-screen-Auflösungen:
Aspect ratio $\approx 16:9 \approx 1.78:1$.
(Viele Kinofilme sind in $1.85:1$
oder $2.35:1 \approx 21:9$ gedreht.)

Standardauflösungen ?



Current Trend: Exponential Pixel Growth

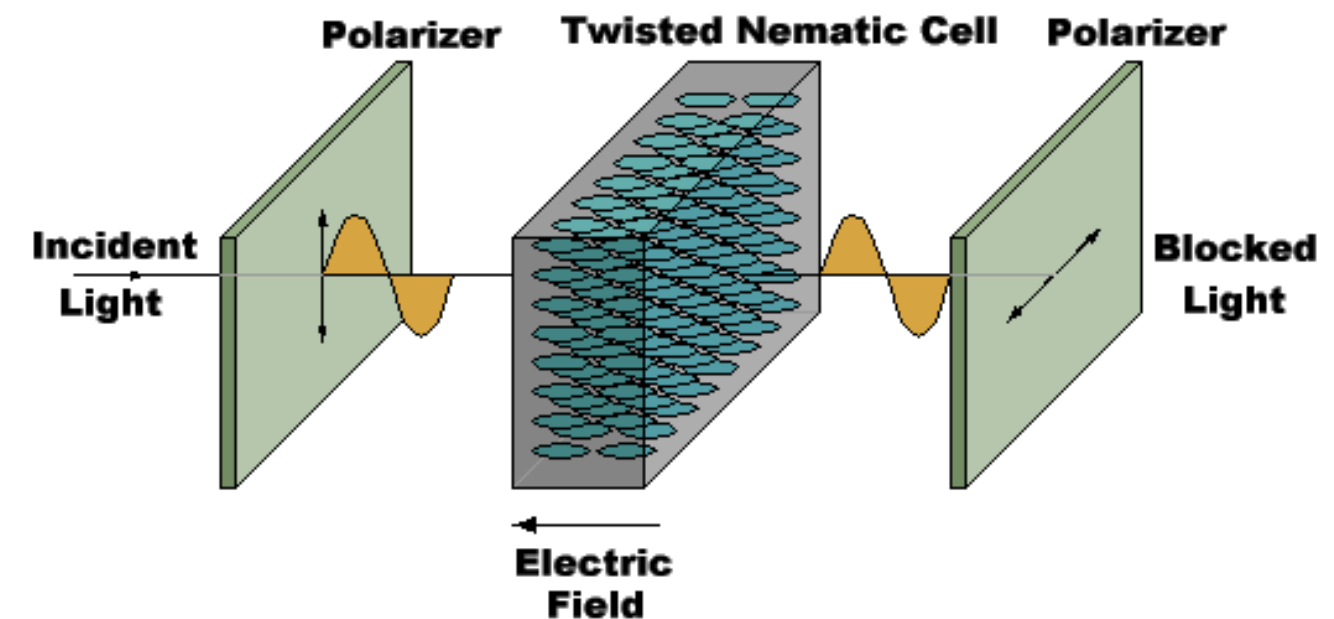
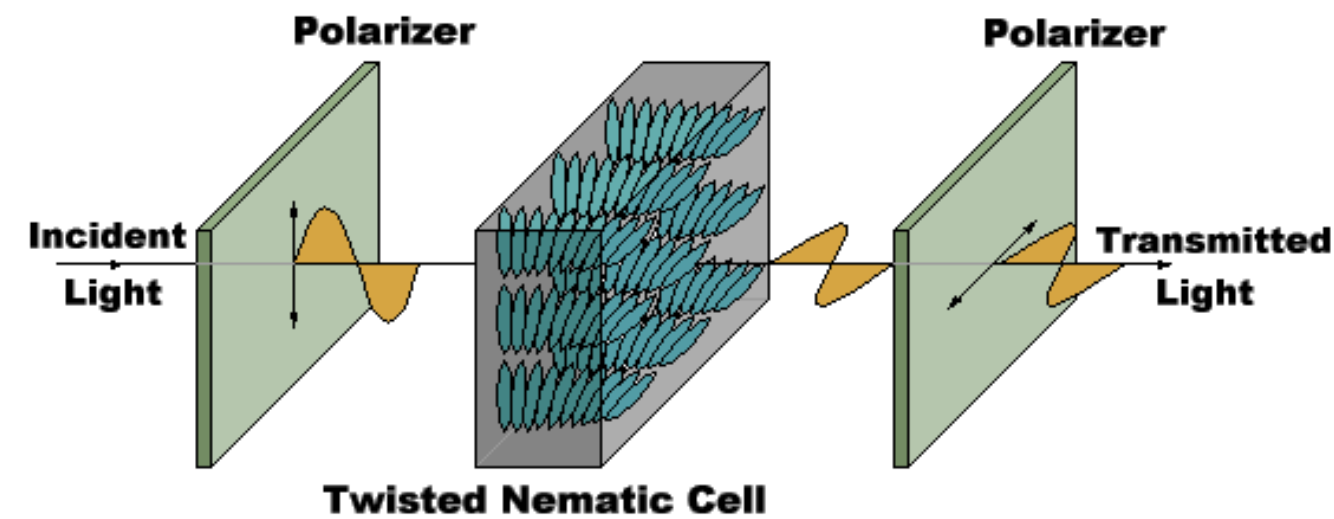
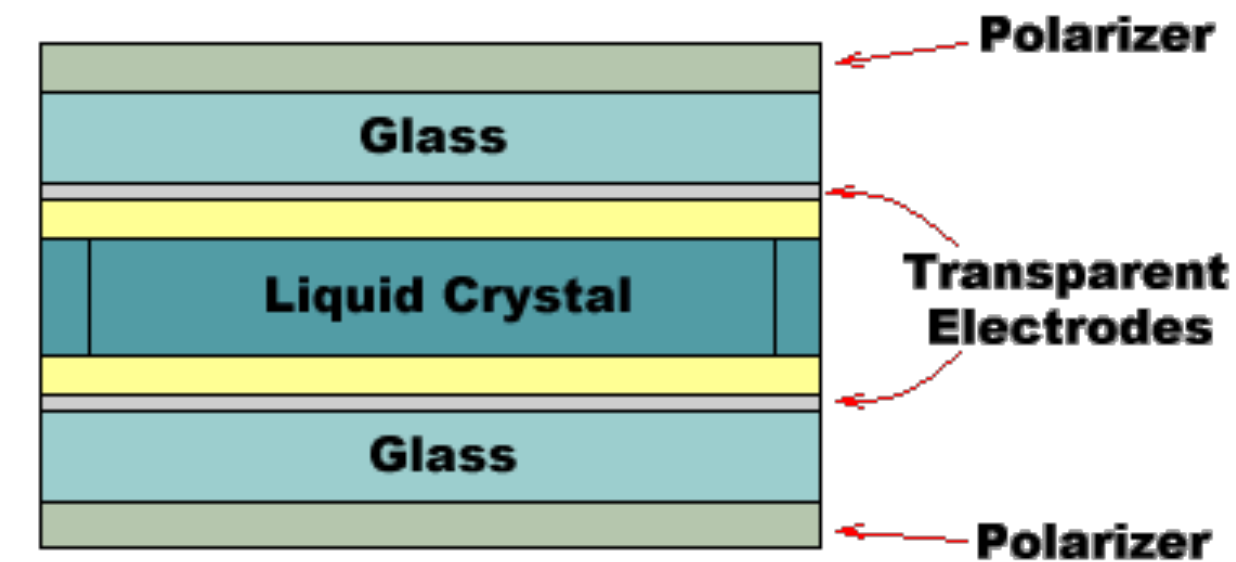


[Rose Adler, Leighana Ginther, Jackie Osterday]

Liquid Crystal Displays (LCDs)

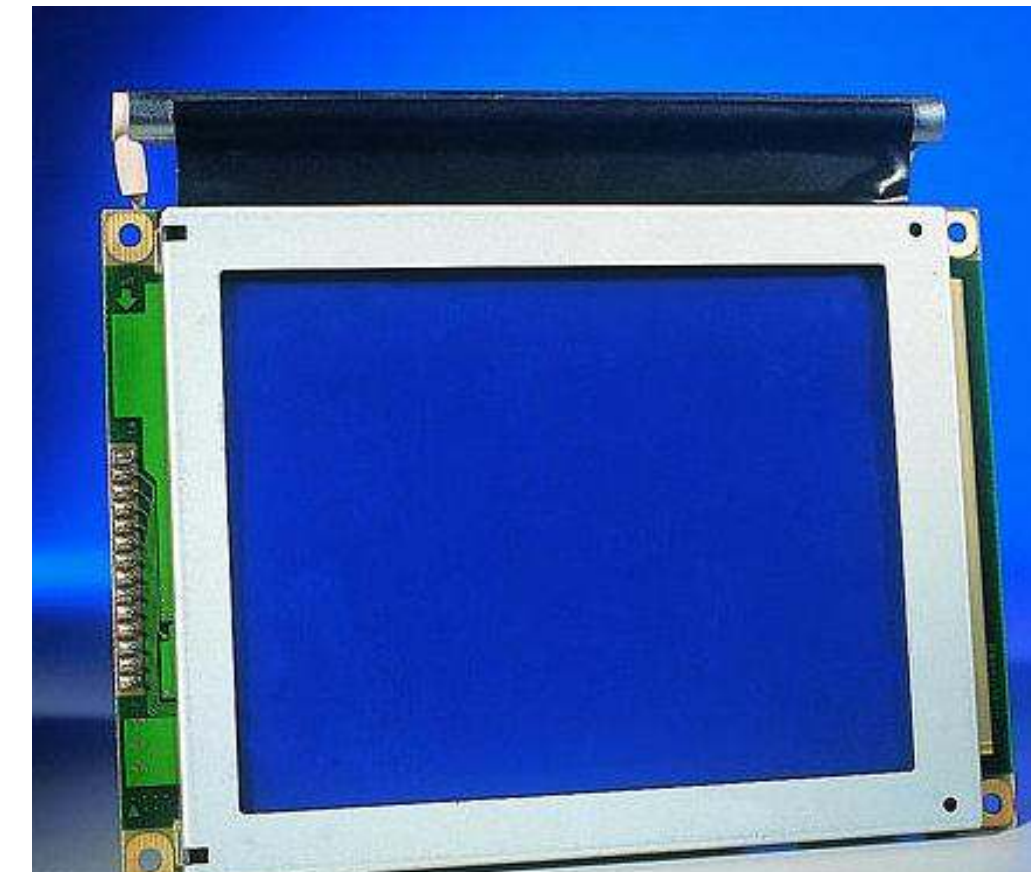
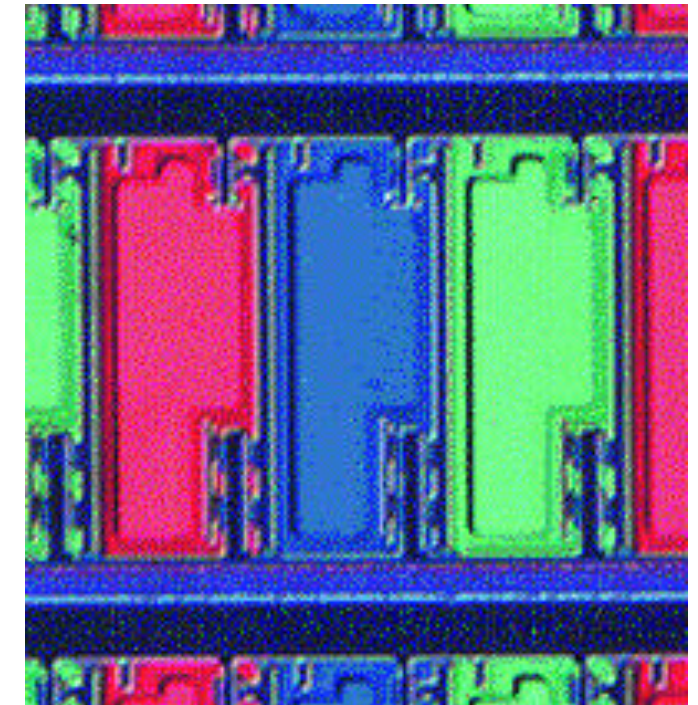
- LCDs lassen das Licht hindurch bzw. nicht und sind somit auf eine externe Lichtquelle angewiesen
- Laptop Bildschirme: von hinten beleuchtet, durchlässige Displays
- Alte Handy's: reflektierende Displays (+ externe Lichtquelle)

Sandwich structure of LCD's



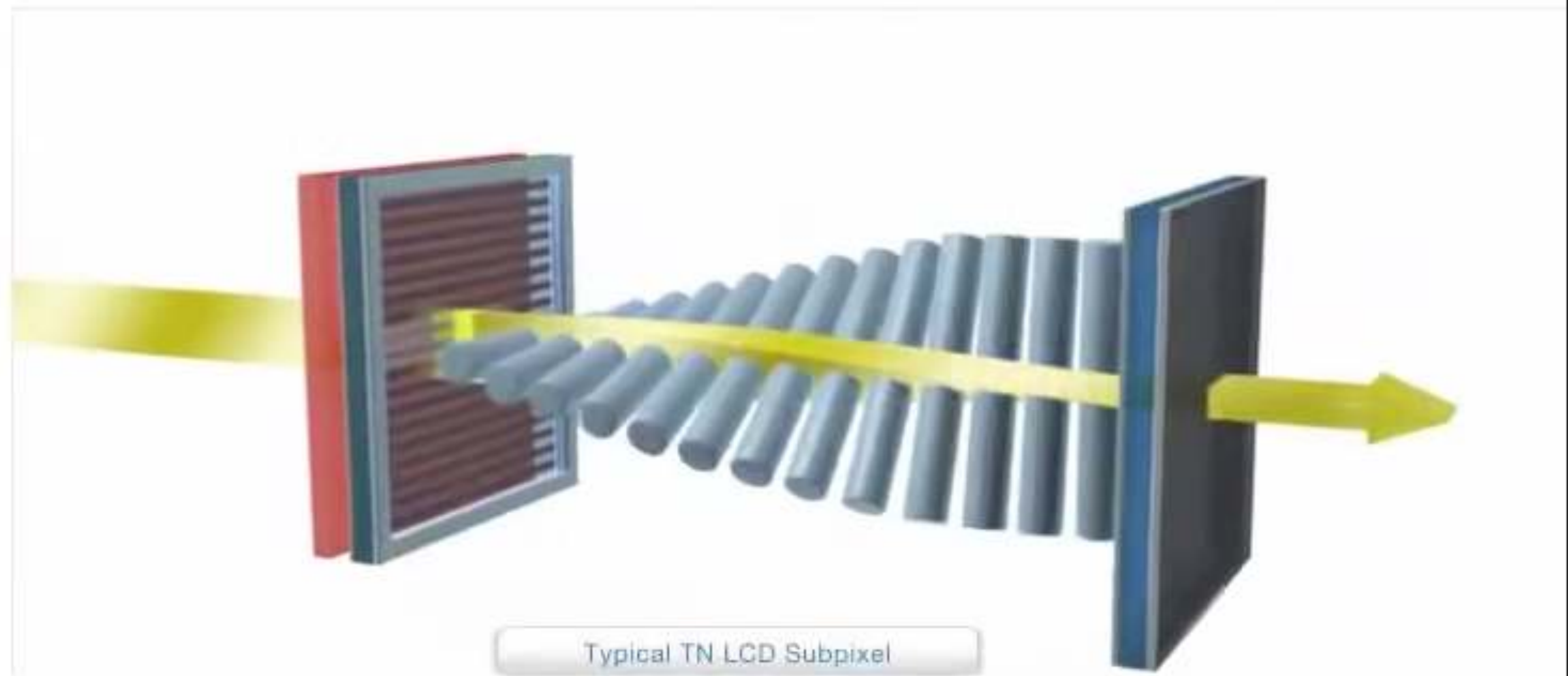
TFT-LCD-Displays

- Pixel besteht aus drei **Sub-Pixeln** mit R/G/B-Farbfilter
 - Jedes **Subpixel** ist ein Transistor!
- Leuchtmittel bei **transmissiven LCDs**
 - schmale Leuchtstofflampe oder LEDs an der Seite
 - Licht wird verteilt durch flachen Lichtleiter + Diffuser-Scheibe
 - Liefert etwas sichtbares Licht, aber vor allem UV-Spektrum
 - Beschichtung an der Innenseite des Glaspanels erzeugt daraus sichtbares Licht
- **Reflektive LCDs** schalten Hintergrund nur bei Bedarf an



- Das Licht durchdringt den hinteren (vertikalen) Polarisator, wird dabei polarisiert (schwingt nur noch in einer Richtung)
- Nichtaktivierte Flüssigkeitskristalle drehen die Polarisierung um $90^\circ \rightarrow$ Licht gelangt durch vorderen (horizontalen) Polarisator
- Angeschaltete Transistoren erzeugen ein elektrisches Feld (in diesem Subpixel)
 - Das führt zu einer Ausrichtung der Flüssigkristalle
 - So ausgerichtete Flüssigkeitskristalle ändern die Polarität des Lichtes **nicht**
 - Licht wird vom vorderen (horizontalen) Polarisator geblockt
- Die Transistoren werden Zeile für Zeile nach dem Scan-Line-Verfahren aktualisiert
- Die Kristalle müssen eine gewisse Zeit ausgerichtet bleiben, um Flimmern zwischen der Aktualisierung zu verhindern

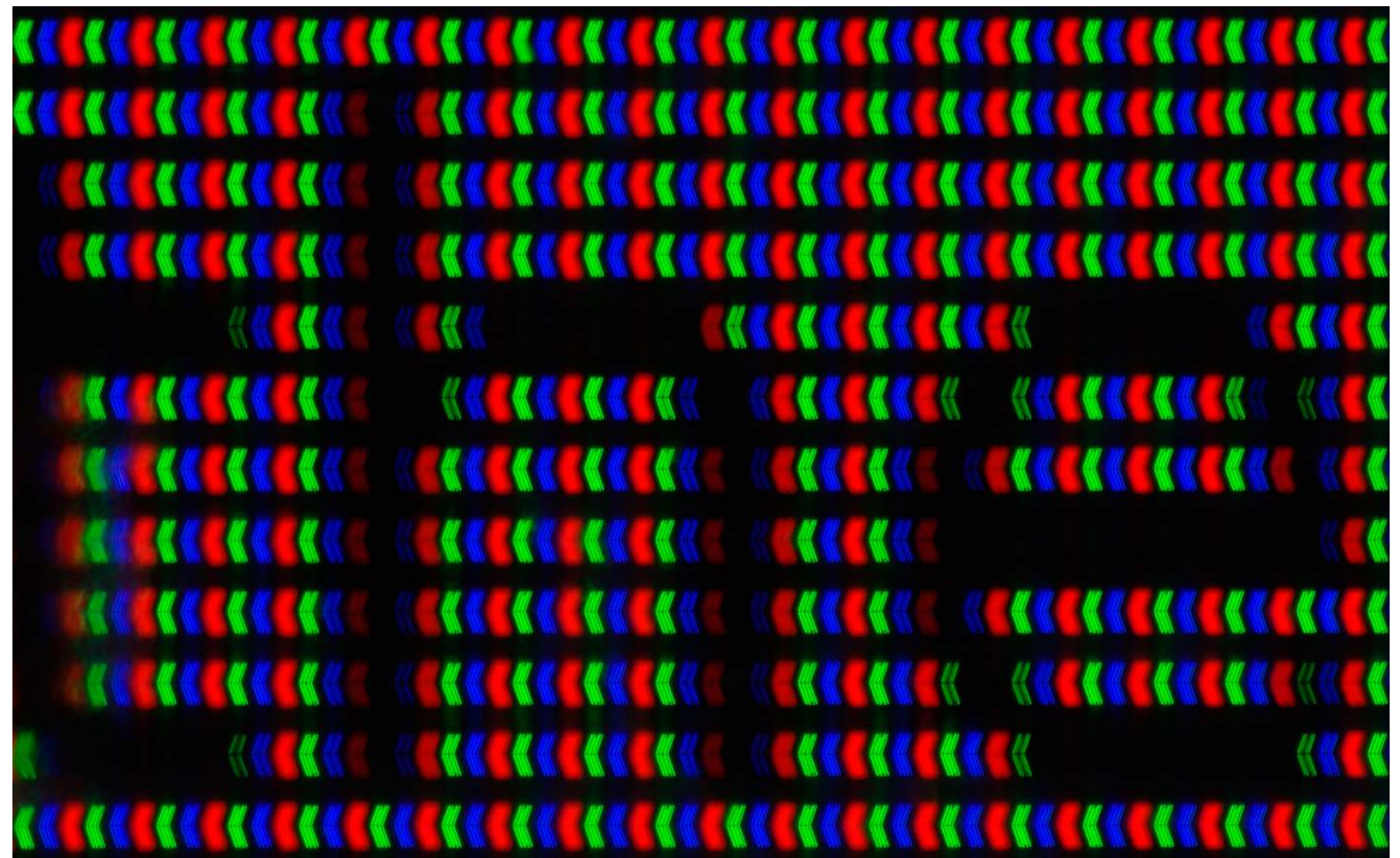
Das Ganze nochmal als Video



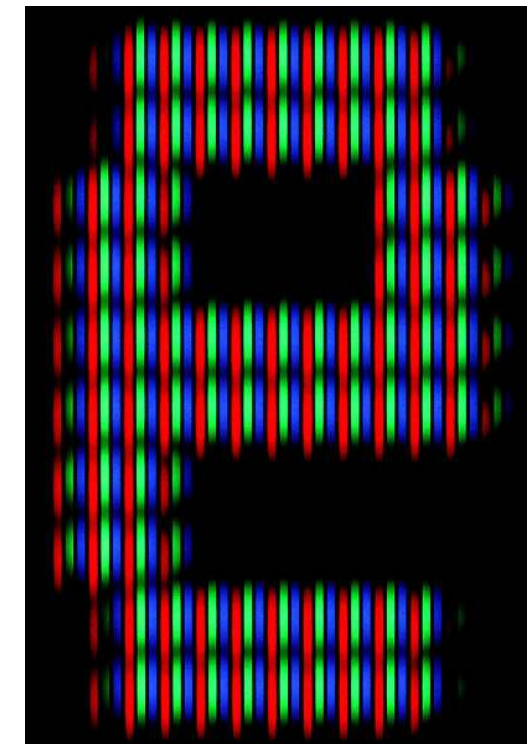
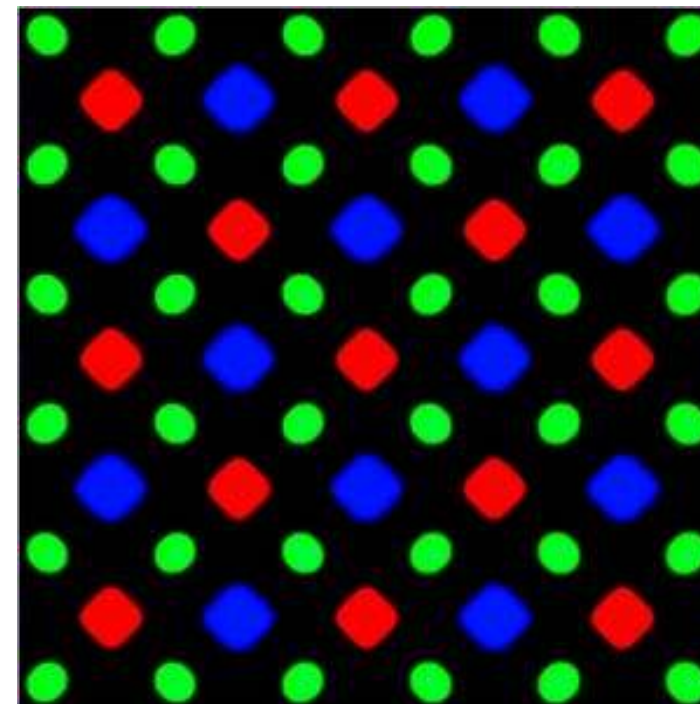
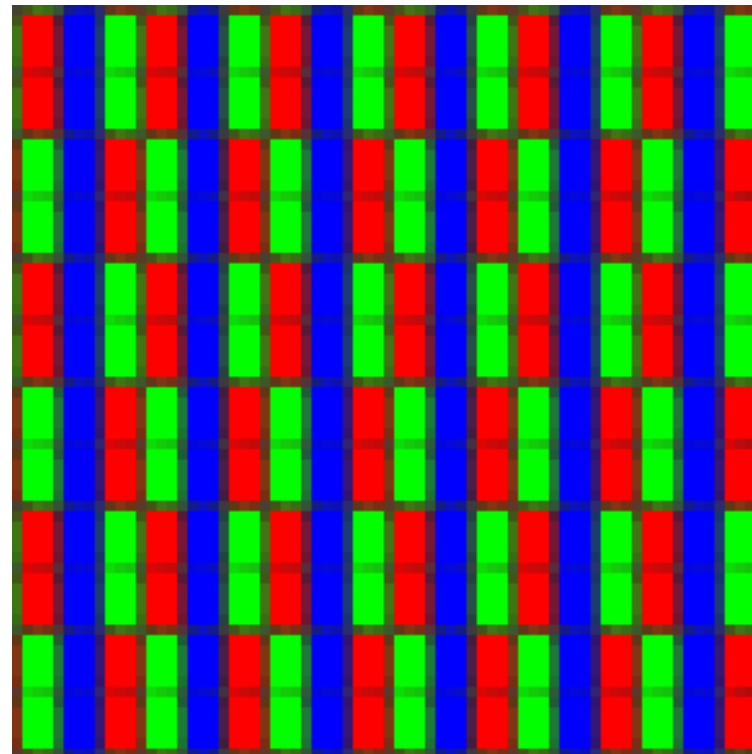
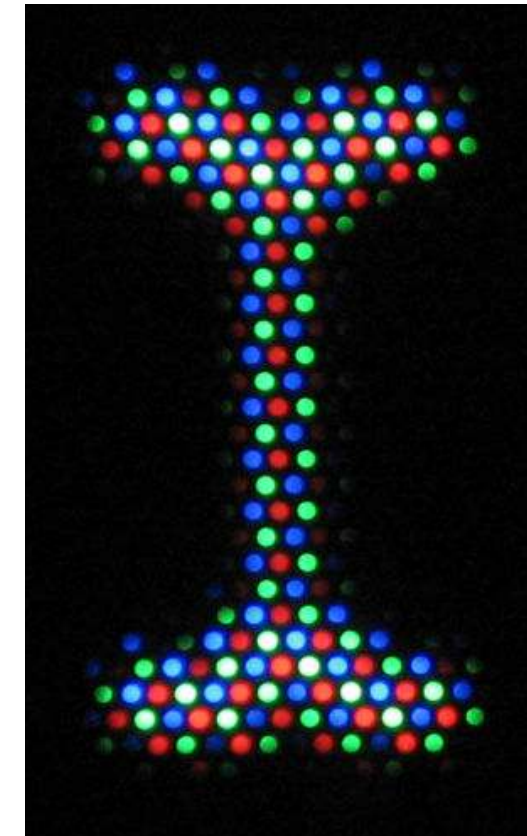
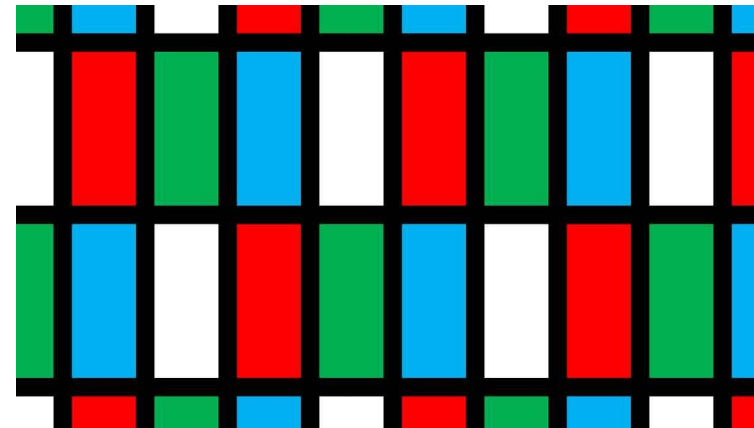
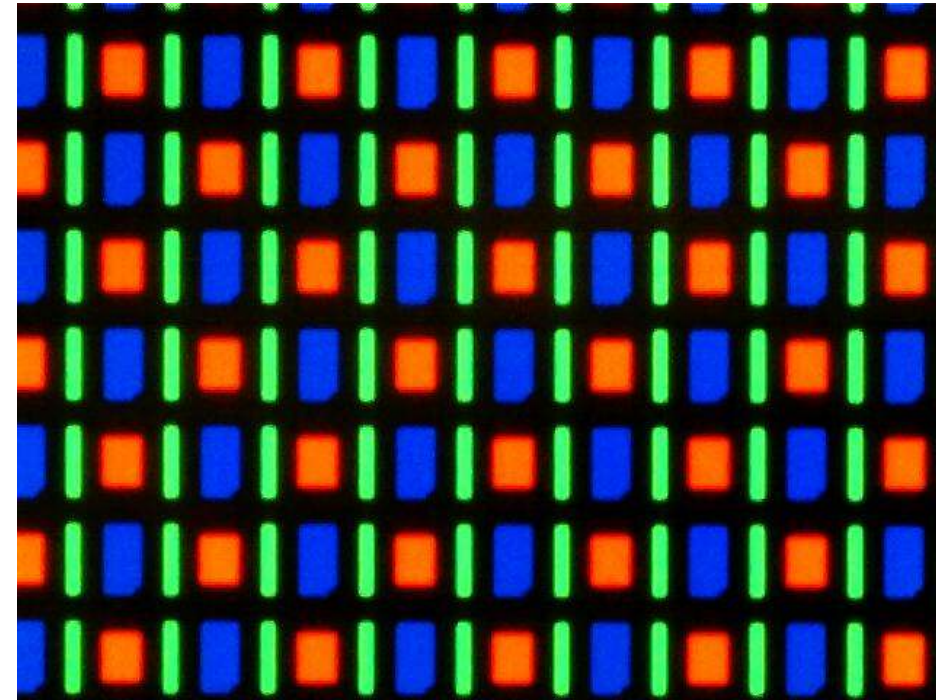
Ausschnitt aus http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/Vikuiti1/BrandProducts/secondary/optics101/

Weiterentwicklungen

- Einfache LCD-Displays haben das Problem, dass die Farben & Helligkeit vom Viewing Angle abhängen!
- Nicht so IPS-Displays (u.a.):

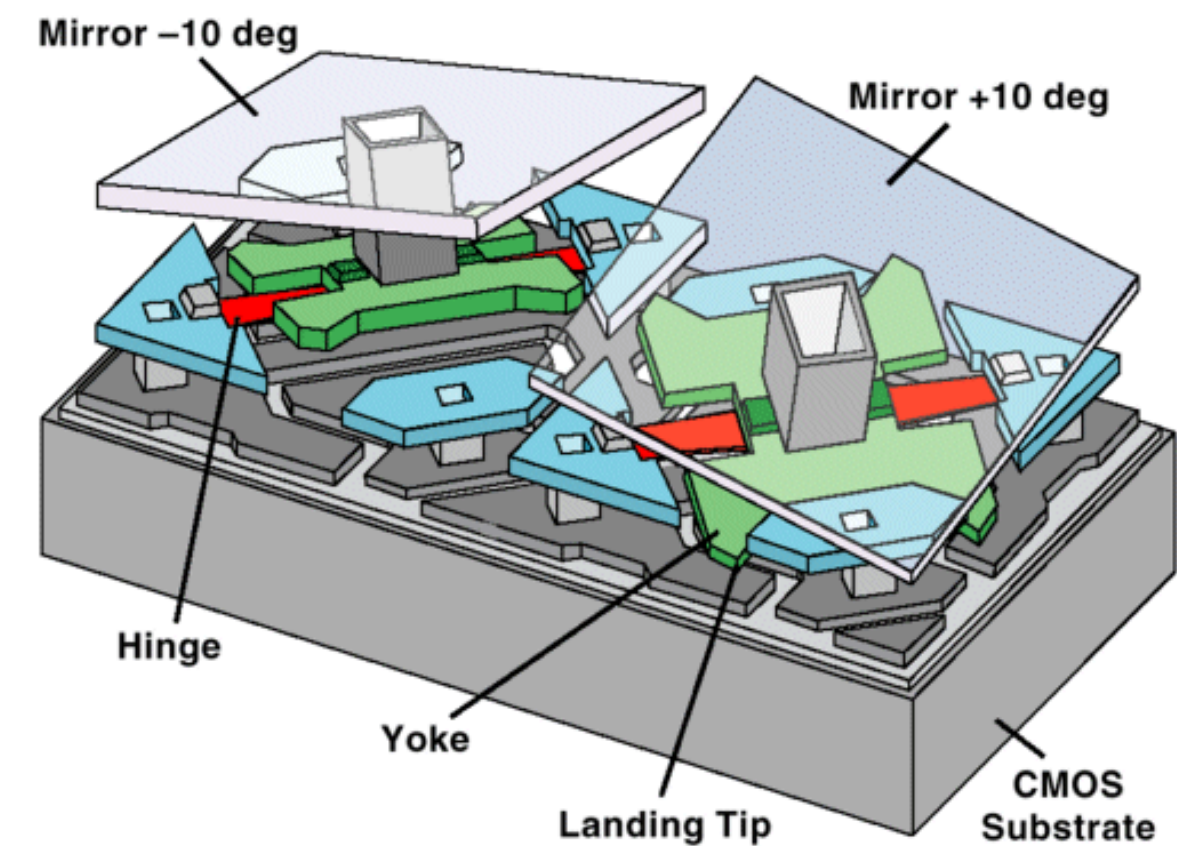
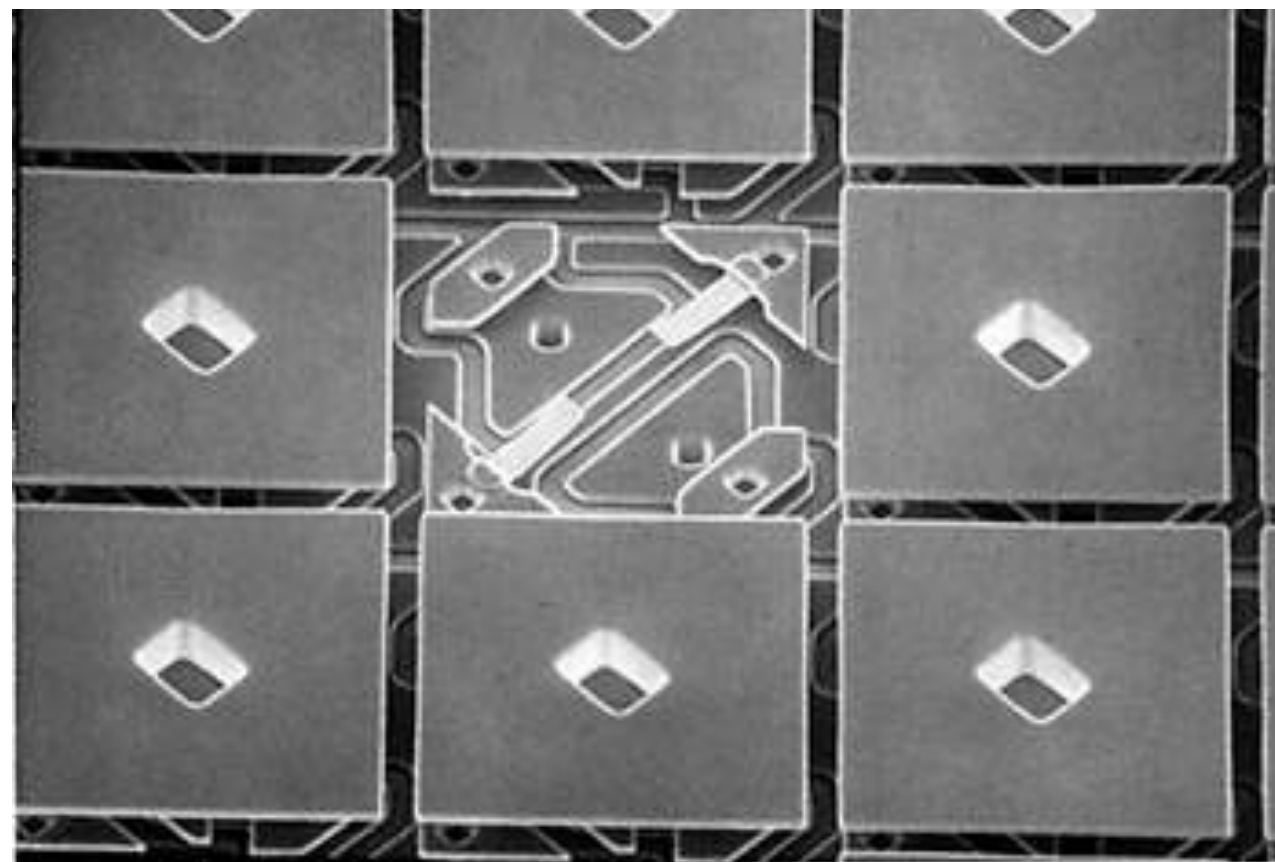


Weitere Sub-Pixel Anordnungen

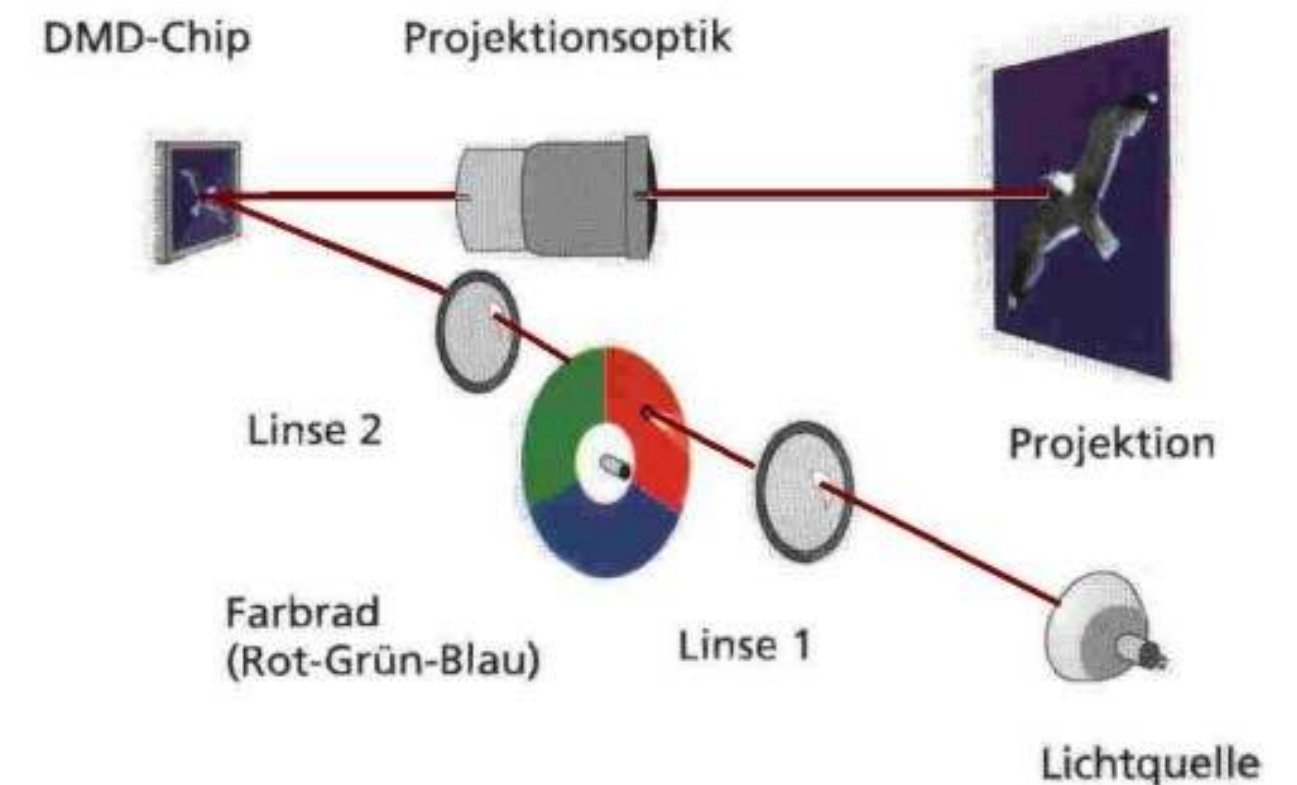
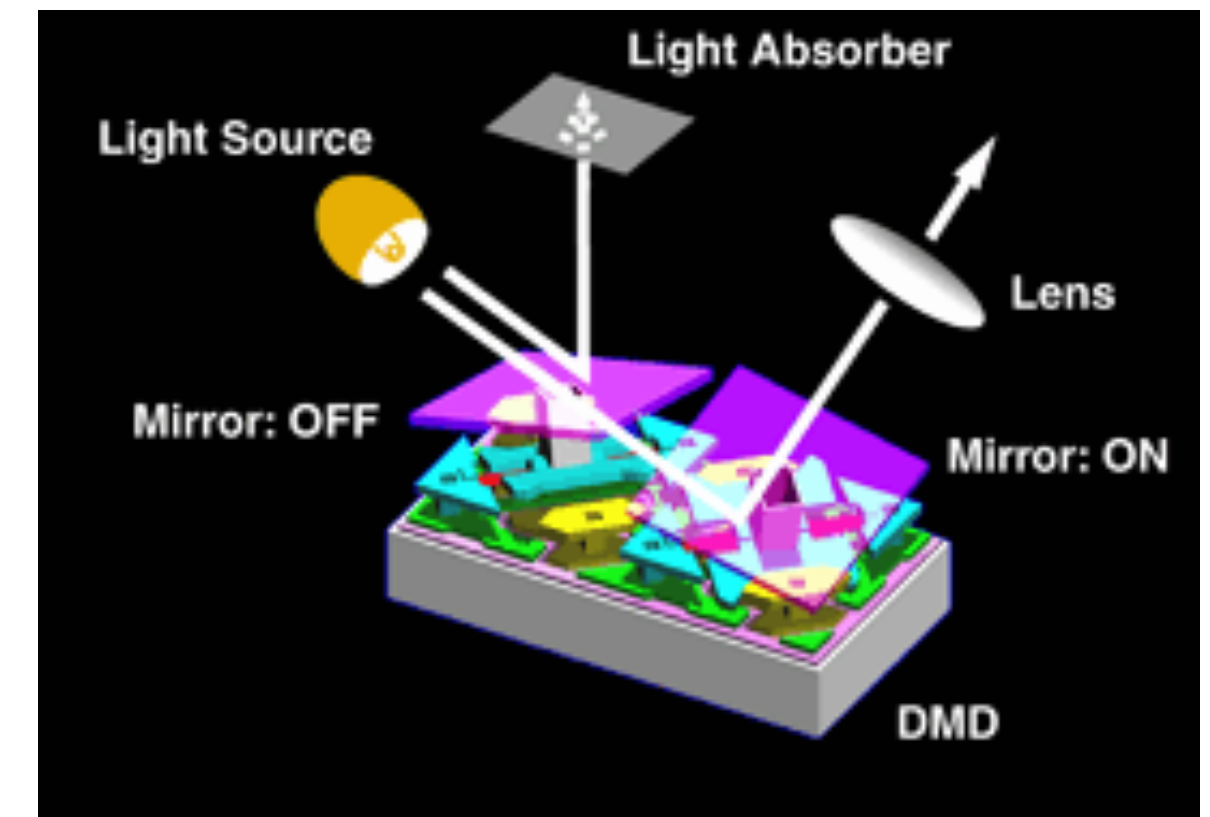


Digital Light Processing Devices

- DMD-Chip (Digital Micromirror Device):
 - Kernstück eines DLP-Projektors
 - **Microelectromechanical** (MEM) Geräte werden mit VLSI Technik gefertigt
 - Auf 2 cm² über 508.000 reflektierende Mikro-Spiegel, jeder für sich um bis zu 10° kippbar
 - Jeder Spiegel kann einzeln elektrostatisch bewegt werden, schaltet genau ein Pixel an/aus



- DMDs haben „binäre“ Pixel →
 - Verschiedene Grauwerte durch Anpassen der Impulslänge
- Drei Grundfarben per rotierende RGB-Farbfilter-Scheibe oder mehrere Chips
- Vorteile:
 - Hochauflösend
 - Sehr flach
 - Sehr lichtstark
- Problem mit Flimmern

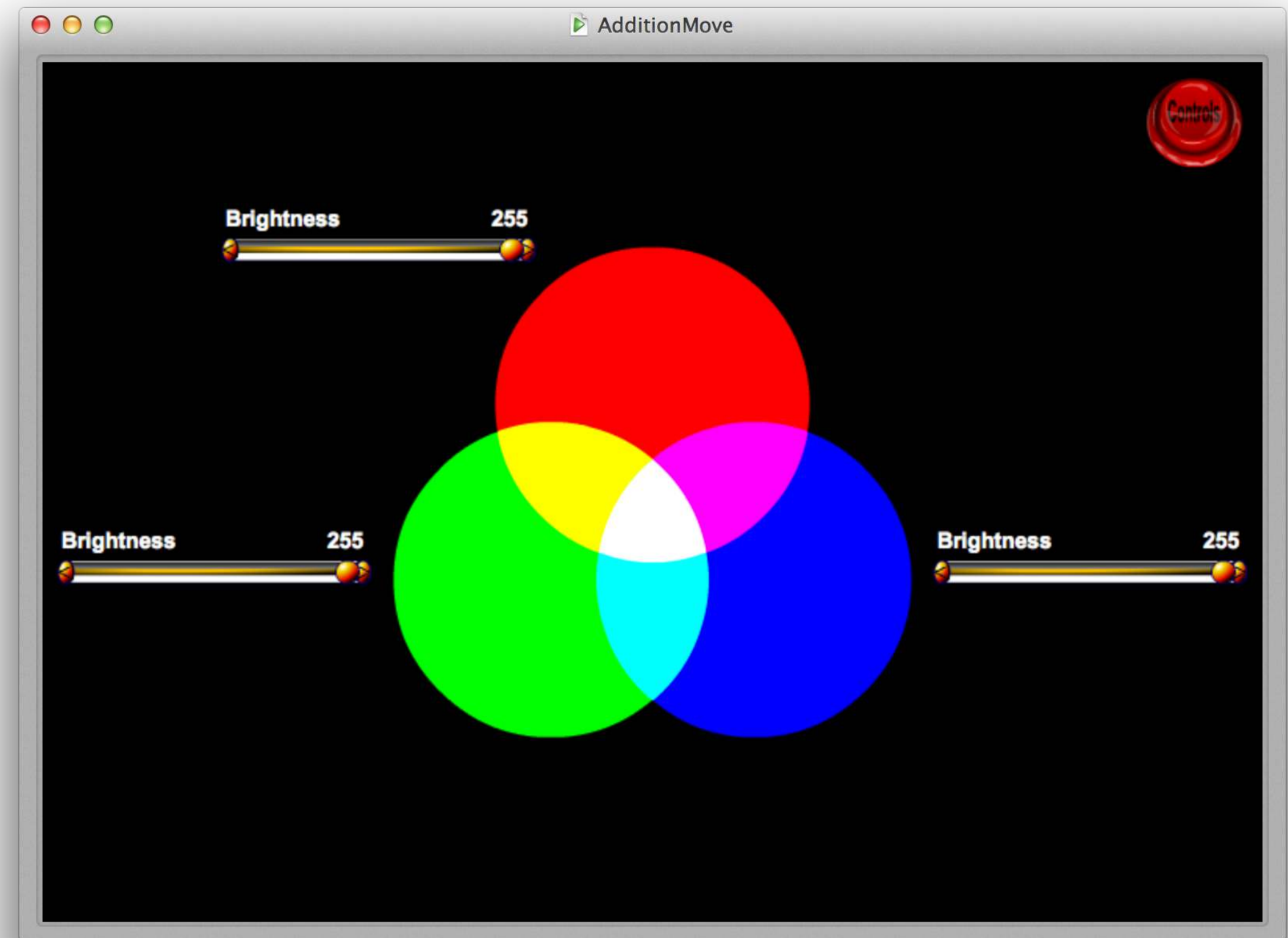


Additive Farbmischung

(vorerst oberflächlich)

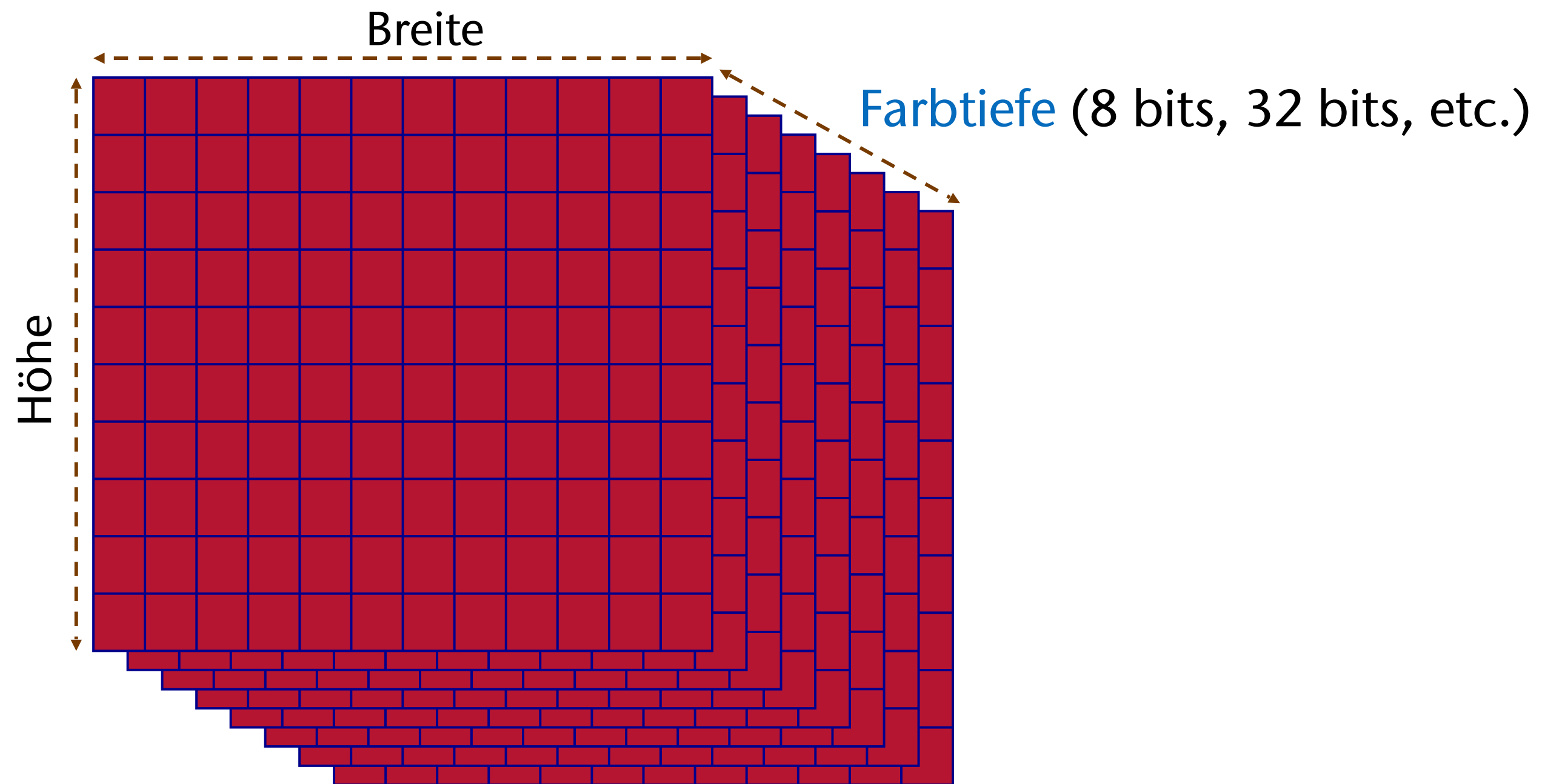
- Das RGB-Farbmodell:

- Farbe = $(r, g, b) \in [0,1]^3$
- $(0, 0, 0)$ schwarz
- $(1, 0, 0)$ rot
- $(0, 1, 0)$ grün
- $(0, 0, 1)$ blau
- $(1, 1, 0)$ gelb
- $(1, 0, 1)$ Magenta
- $(0, 1, 1)$ cyan
- $(1, 1, 1)$ weiß



Der Frame Buffer

Muss bei Farbdисplays viele Bits pro Pixel spendieren (später noch mehr)

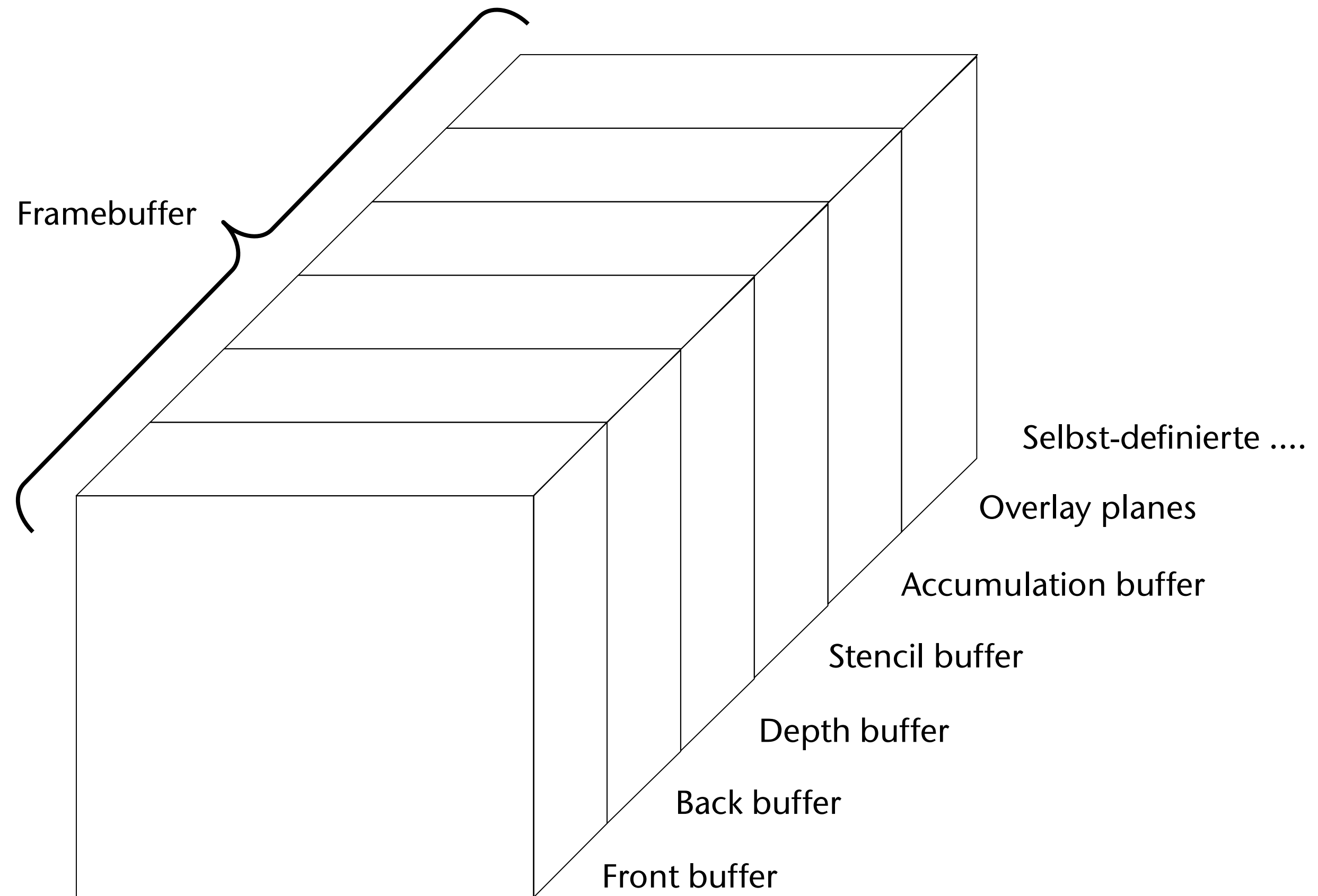


$$\text{Memory (Bits)} = \text{Breite} * \text{Höhe} * \text{Farbtiefe}$$

Farbtiefen

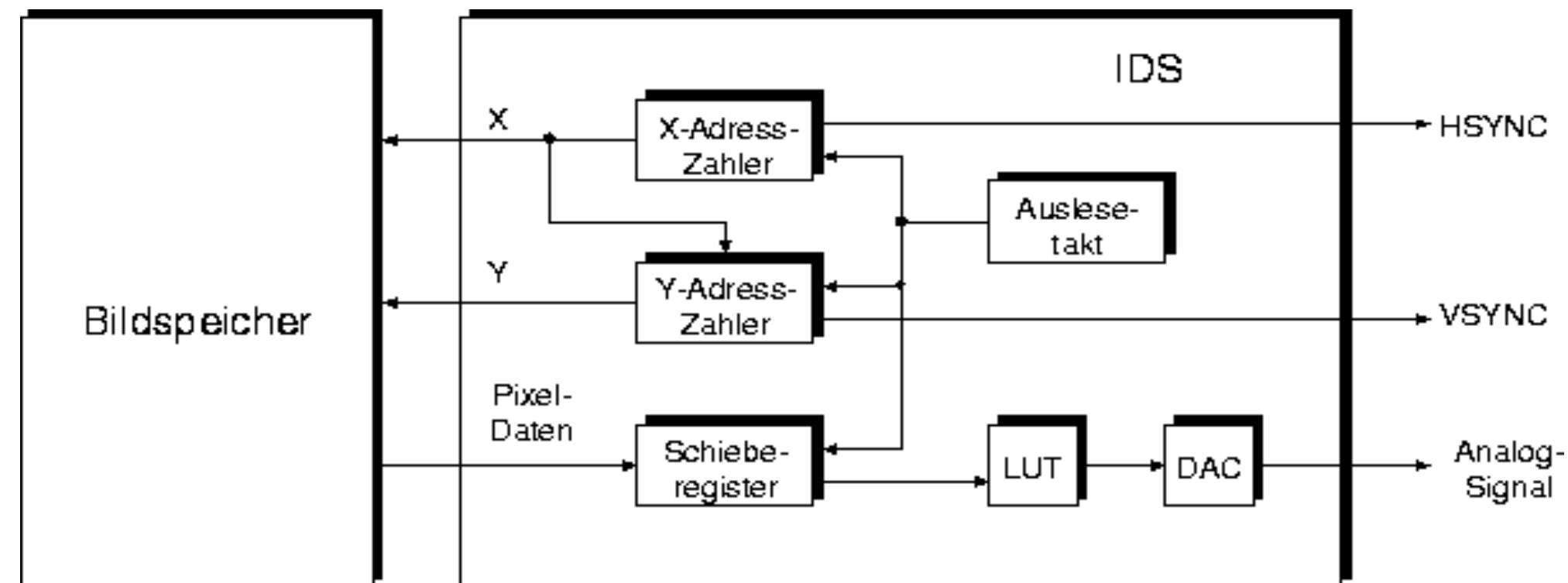
- Schwarz und Weiß: 1 Bit/Pixel
- Grauskala: 8 Bit/Pixel
- 8-bit Farbe: spart Speicherplatz, 3-2-2 oder Color Lookup Table
- 24-bit Farbe: 8 Bit pro Farbkanal – rot, grün, blau (RGB)
- Wie groß muss der Frame-Buffer für ein 1600x1200 Pixel großes Bild in RGB sein?
 - 8 Bit für jeden Farbkanal
 - Das sind 24 Bit/Pixel
 - Das ergibt $1600 \cdot 1200 \cdot 24 \text{ Bit} = 5.76 \text{ MBytes}$
 - Die meisten Graphikkarten reservieren 32 Bit/Pixel bei true color
= 7.68 MBytes
- Datenrate bei 30 frames per second (FPS): 230 Mbytes / sec

Kleine Antizipation: es gibt viele weitere Buffer in einem Framebuffer

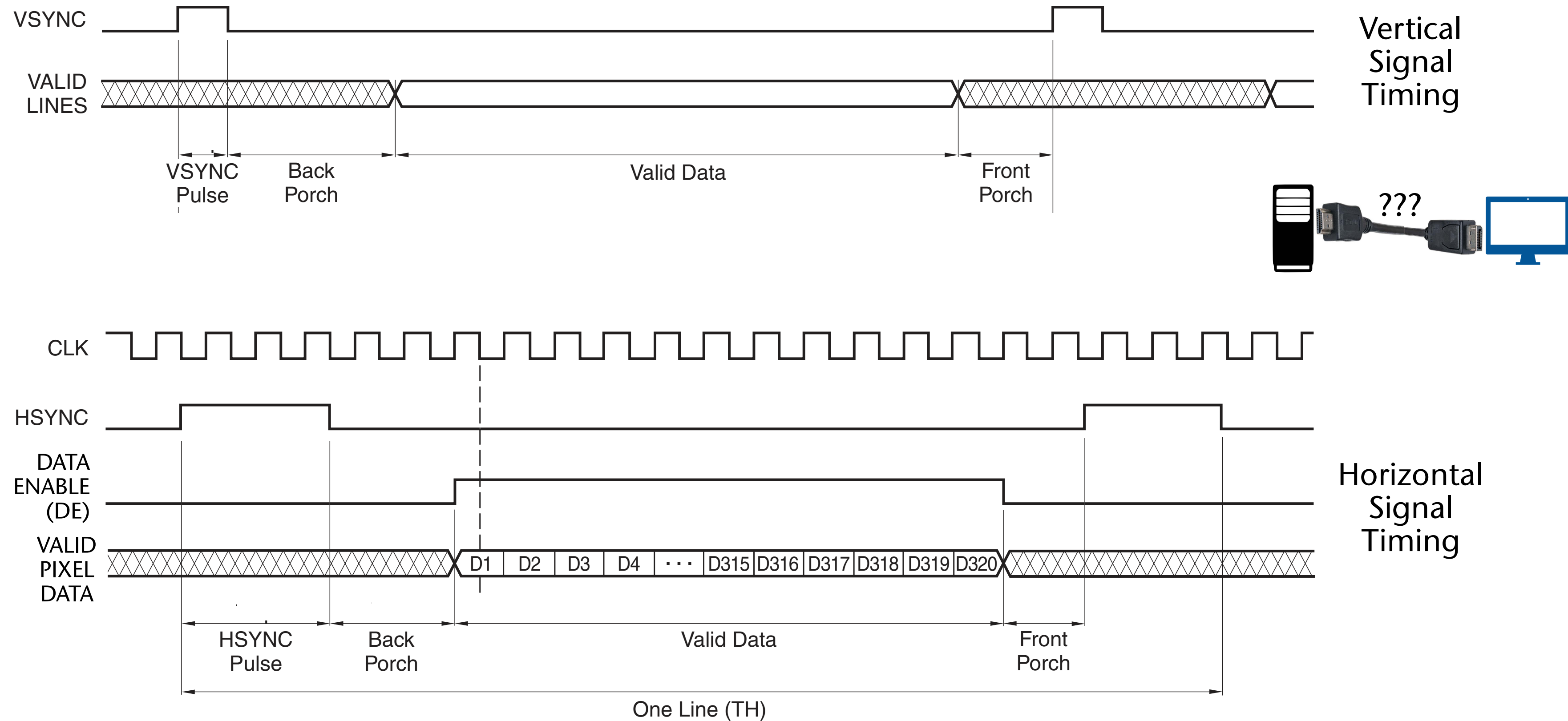


Der Video-Controller

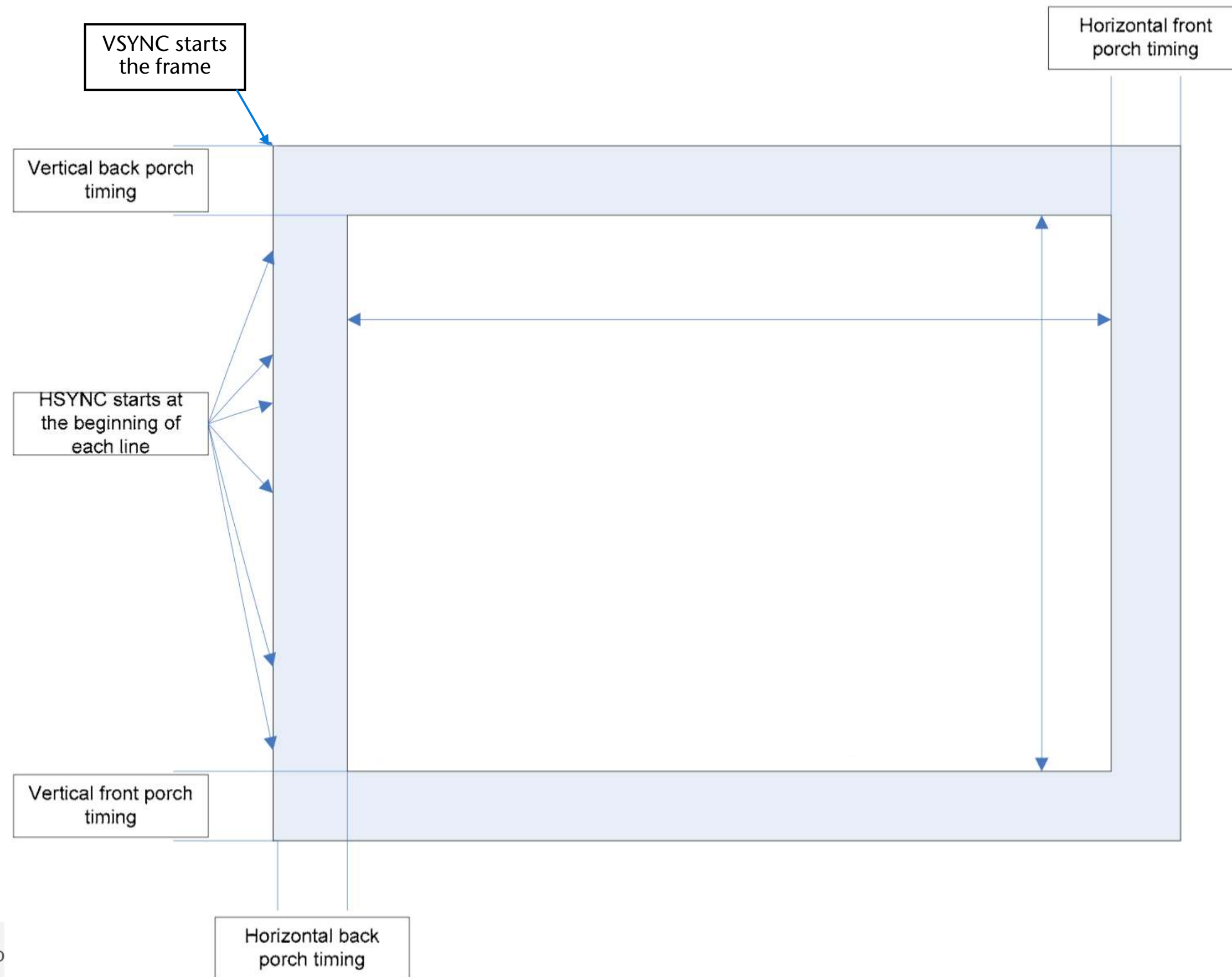
- Erzeugen der horizontalen (HSYNC) und vertikalen (VSYNC) Synchronisationsimpulse für das entsprechende Bildformat
- Adressierung und Auslesen des Bildspeichers
- Ansteuern des Monitors mit entsprechenden Intensitäts-/ Farbwerten, mit Dunkelsignal für H/V-Austastlücke und Digital-Analog-Wandlung (DAC).



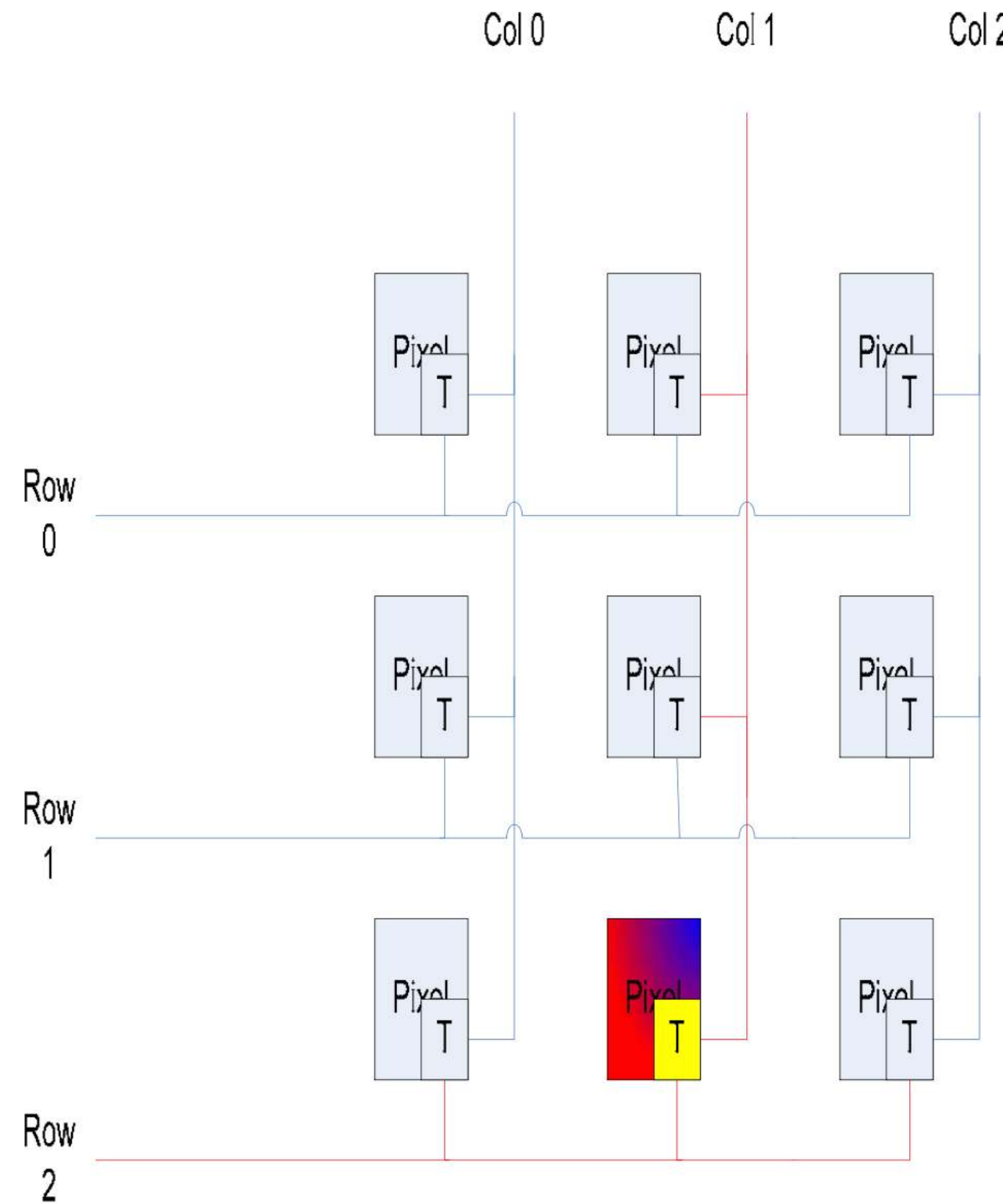
Technical Details on Transmitting the Signals



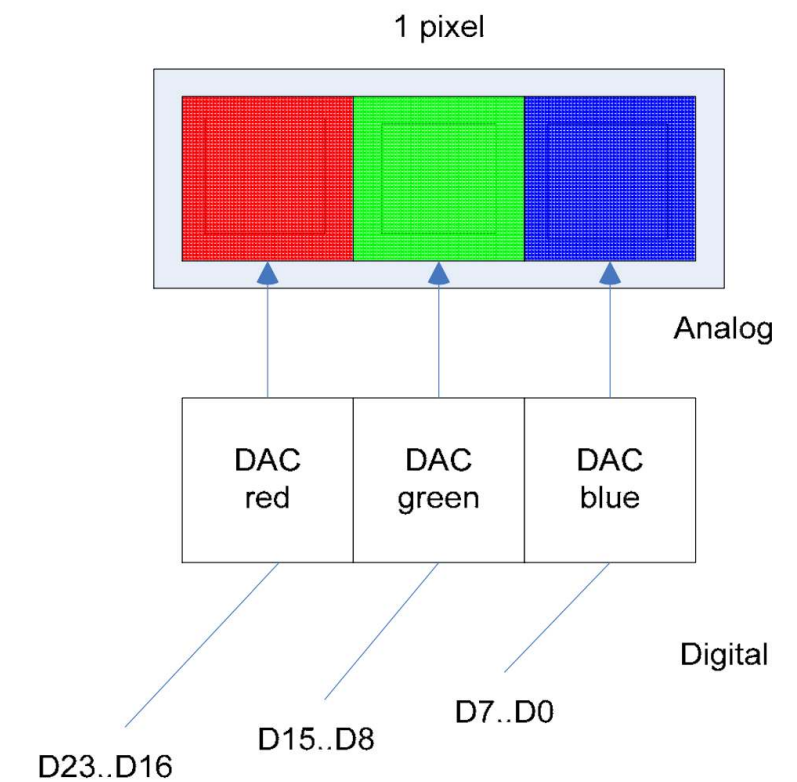
Visualisierung der Timings als "Frame"



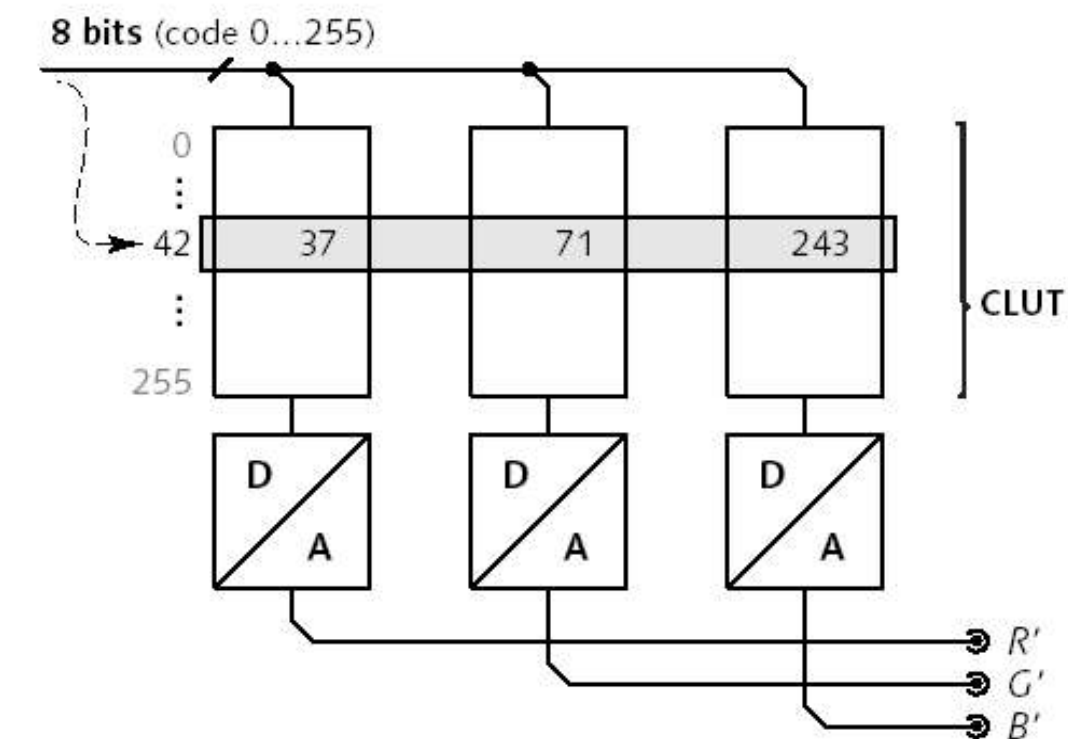
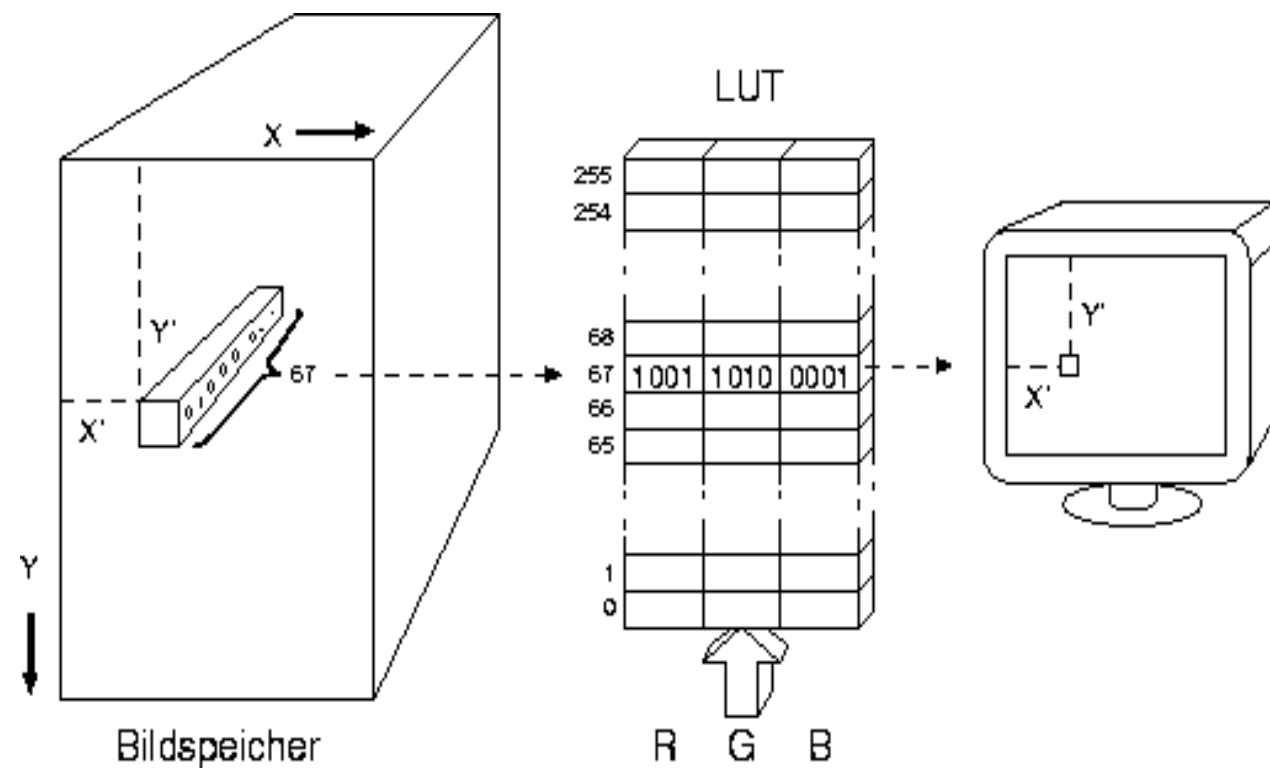
Ansteuerung auf der Monitor-Seite (LCD / LED)



TFT LCD-Displays

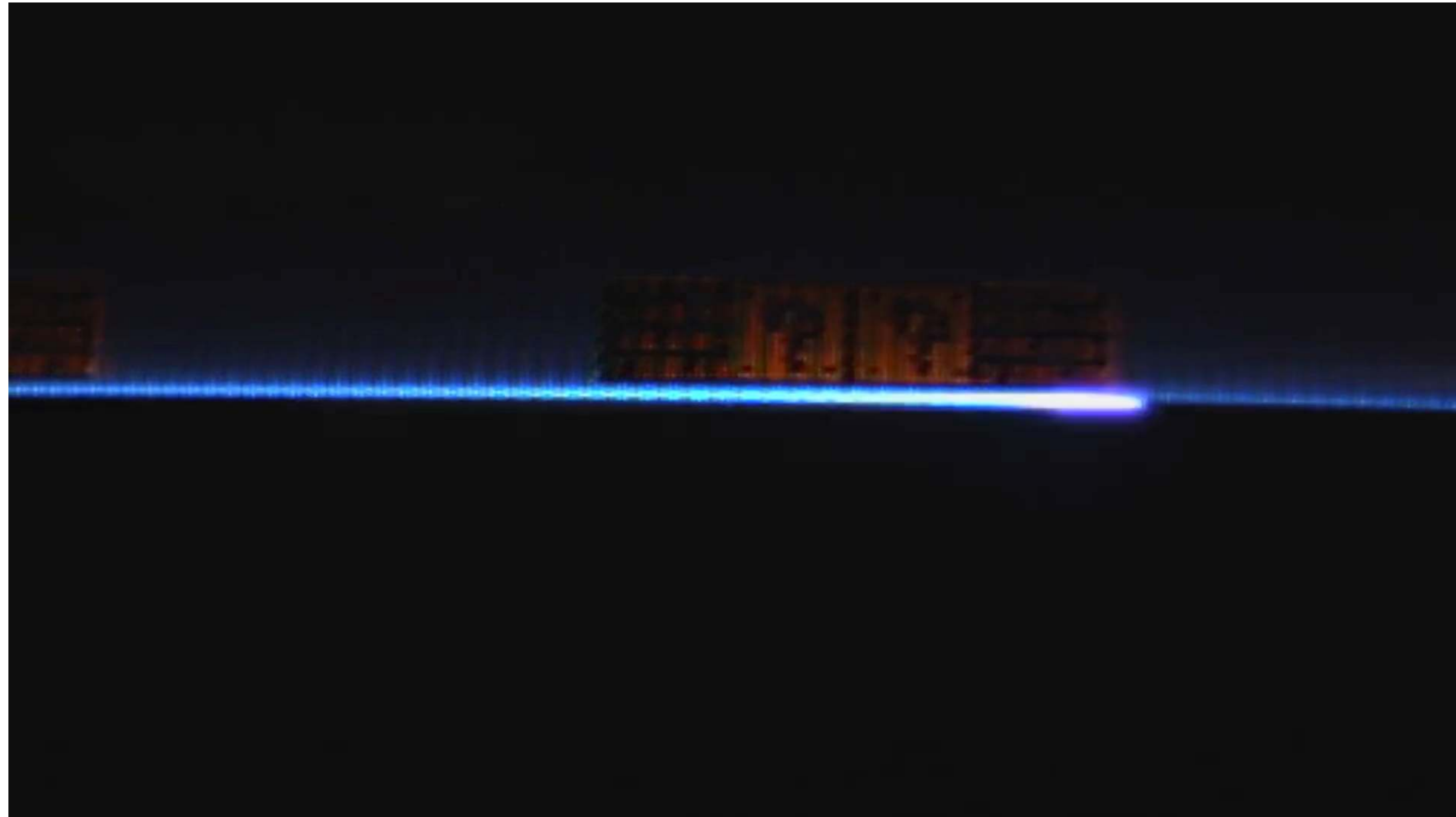


-
- The diagram illustrates the readout circuit for the detector. It features a large block on the left labeled "Bildspeicher" (Image Memory). Three data lines originate from this block: "X", "Y", and "Pixel-Daten". The "X" line connects to an "X-Adress-Zähler" (X-Address Counter), and the "Y" line connects to a "Y-Adress-Zähler" (Y-Address Counter). Both counters are connected to a common "Auslese-takt" (Readout Clock) line. The outputs of these counters are connected to a "Schiebe-register" (Shift Register). The "Pixel-Daten" line also feeds into the shift register. The output of the shift register passes through a "LUT" (Look-Up Table) and then a "DAC" (Digital-to-Analog Converter) before being sent to the next stage.



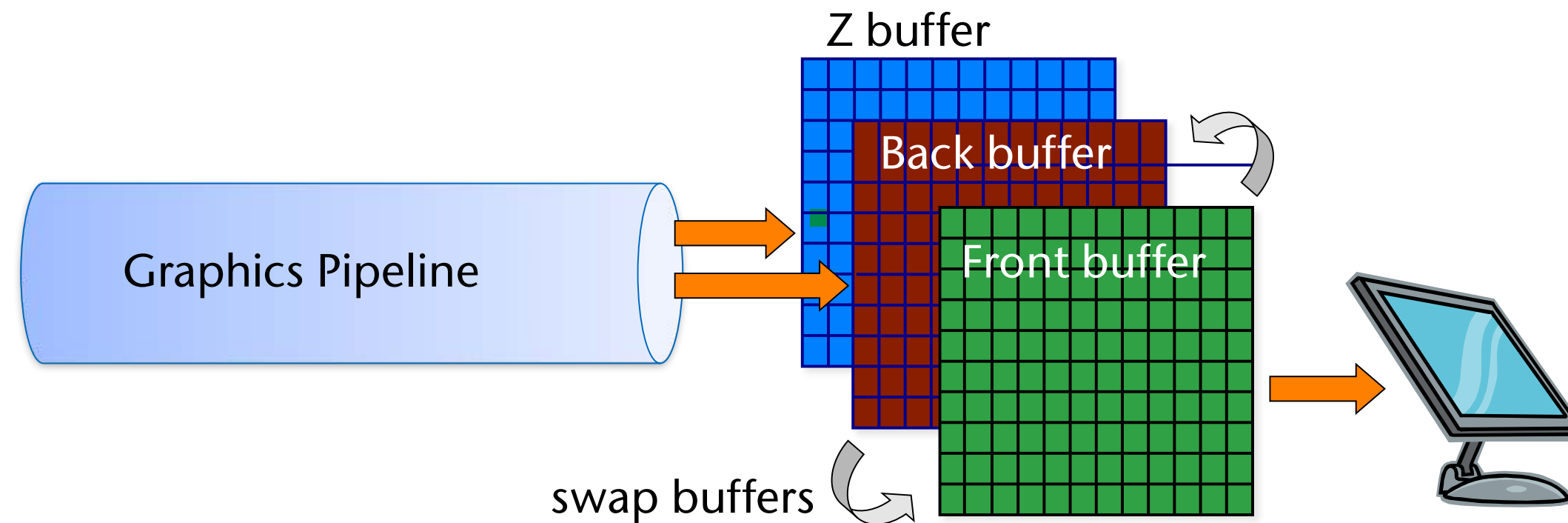
- Beispiel:
 - 8 Bit Farbe pro Pixel
 - 12 Bit breite Color LUT
 - Das ergibt $2^{12} = 4096$ unterschiedliche Farben
 - Jeder Pixel durch 8 Bit dargestellt, kann nur $2^8 = 256$ Farben verwenden
 - Nehme 256 verschiedene Farben aus den möglichen 4096 und speichere sie in der Color LUT
 - 8 Bit Farbwert eines Pixels indiziert einen Eintrag der Color LUT
 - Die gespeicherte 12 Bit Farbe wird letztendlich angezeigt
- Wird heute nur noch selten gemacht, aber an anderer Stelle (in Algorithmen) taucht dieses Verfahren wieder auf ...

Video Showing Display Scan-Outs



Double-Buffering

- Es gibt noch viele weitere Buffer in einem Framebuffer
- Problem beim **Single-Buffering**: **Flickering**
 - Eine Art *race condition*
- Lösung: der **Double-Buffer**
 - **Front Buffer** = Color-Buffer, der vom Display gerade angezeigt wird
 - **Back Buffer** = Color-Buffer, in den gerade gezeichnet ("**gerendert**") wird



Synchronisation mit Vertical Retrace (VSYNC)

- Man kann zu einem bestimmten Zeitpunkt der Video-Hardware sagen, dass jetzt der Back-Buffer "gelten" soll
 - **swapbuffers ()** (in OpenGL) = tauscht die Pointers zu den beiden Buffers
 - Die Video-Hardware liest den (neuen) Front-Buffer direkt nach dem Swap aus, beginnend mit dem Pixel im Buffer, wo sie gerade steht
- Wann darf die Applikation tatsächlich den Swap-Buffers durchführen?
- Bei beliebigem Zeitpunkt
→ **screen tearing**
- Konsequenz: Swapbuffers muss mit VSYNC synchronisiert werden (außer bei GSYNC/freesync)



Tear point

Tear point

Ein Wort zu "swap buffers" und Synchronisation allgemein

- Die Funktion gibt es nicht in OpenGL, nur in der OS-spezifischen Window-Handler-Library: **wglSwapBuffers()**, **aglSwapBuffers()**, **glXSwapBuffers**
- Verwendet man praktisch nie "von Hand" bei Einsatz von high-level GUI-Libraries (Qt, GLUT, GLEW, etc.)
 - Dort liegt die *main loop* (und damit die Kontrolle) immer in der GUI-Library
- Der *Buffer-Swap* muß (normalerweise) mit dem *vertical retrace* (VSYNC) des Monitors synchronisiert werden
- Konsequenz: es kann hohe Zeitverluste durch Synchronisation geben
 - Beispiel: main loop benötigt 1/45 Sekunde = 22 Millisek., Monitor läuft mit 60 Hz → main loop läuft nur mit 30 Hz → die main loop muß am Ende jedes "Applikations-Frames" $33 - 22 = 11$ Millisek. warten!

Example of a Video Player on a PC Showing Serious Tearing



Lösungen

1. VSYNC (vertical synchronization):

Der **swapbuffers** erfolgt nur während des VSYNC (früher "Bildaustastlücke"); wartet also bis zum nächsten Auftreten des VSYNC

- Nachteil:
 - Ursprüngliche Framerate F_G des Renderers (z.B. Spiel) wird gedrosselt auf $F'_G < F_G$, so dass $F'_G \mid F_M$, wobei F_M = Framerate des Monitors
 - **Judder**: bei Film als Input (Film kann nicht "gebremst" werden!)

Beispiel für Judder



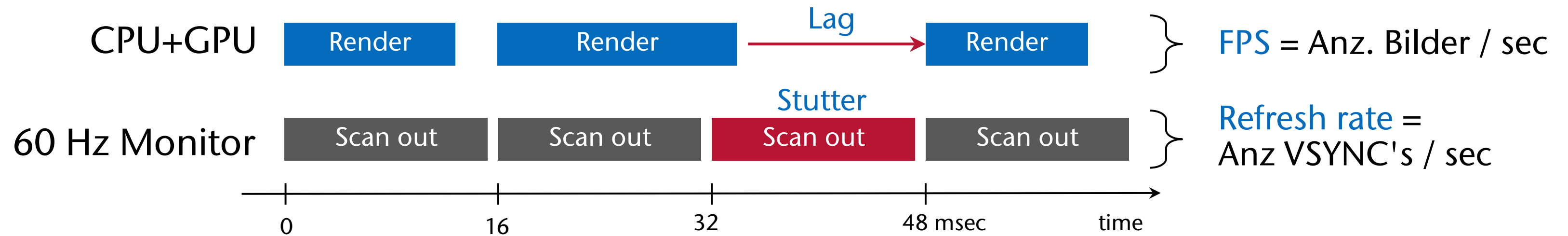
Which Monitor Showed Stuttering?



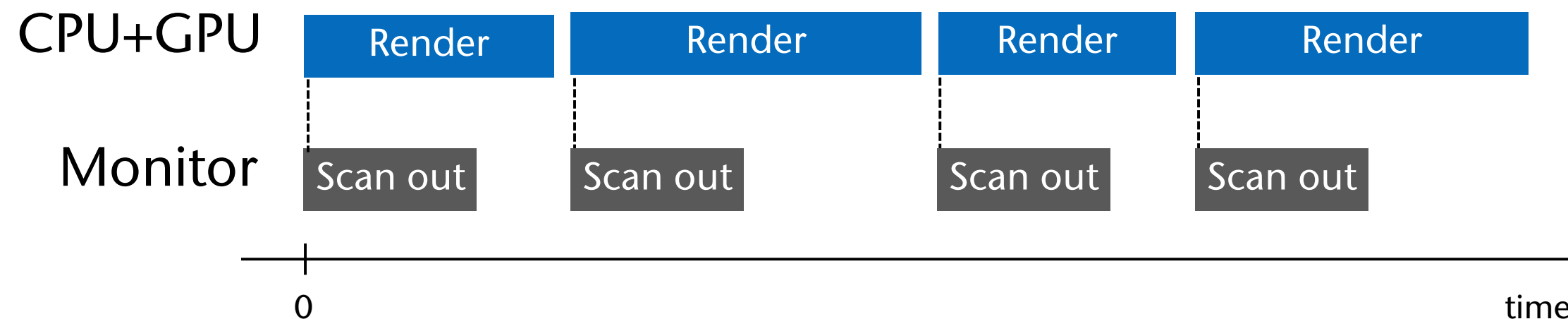
Oder:
[menti.com](https://www.menti.com)
und Code
3587 0466

Fixed Refresh Rate vs Variable Refresh Rate

- Fixed refresh rate (w/ VSYNC): GPU wartet auf VSYNC des Monitors



- Variable refresh rate / adaptive sync: Monitor "wartet" auf GPU

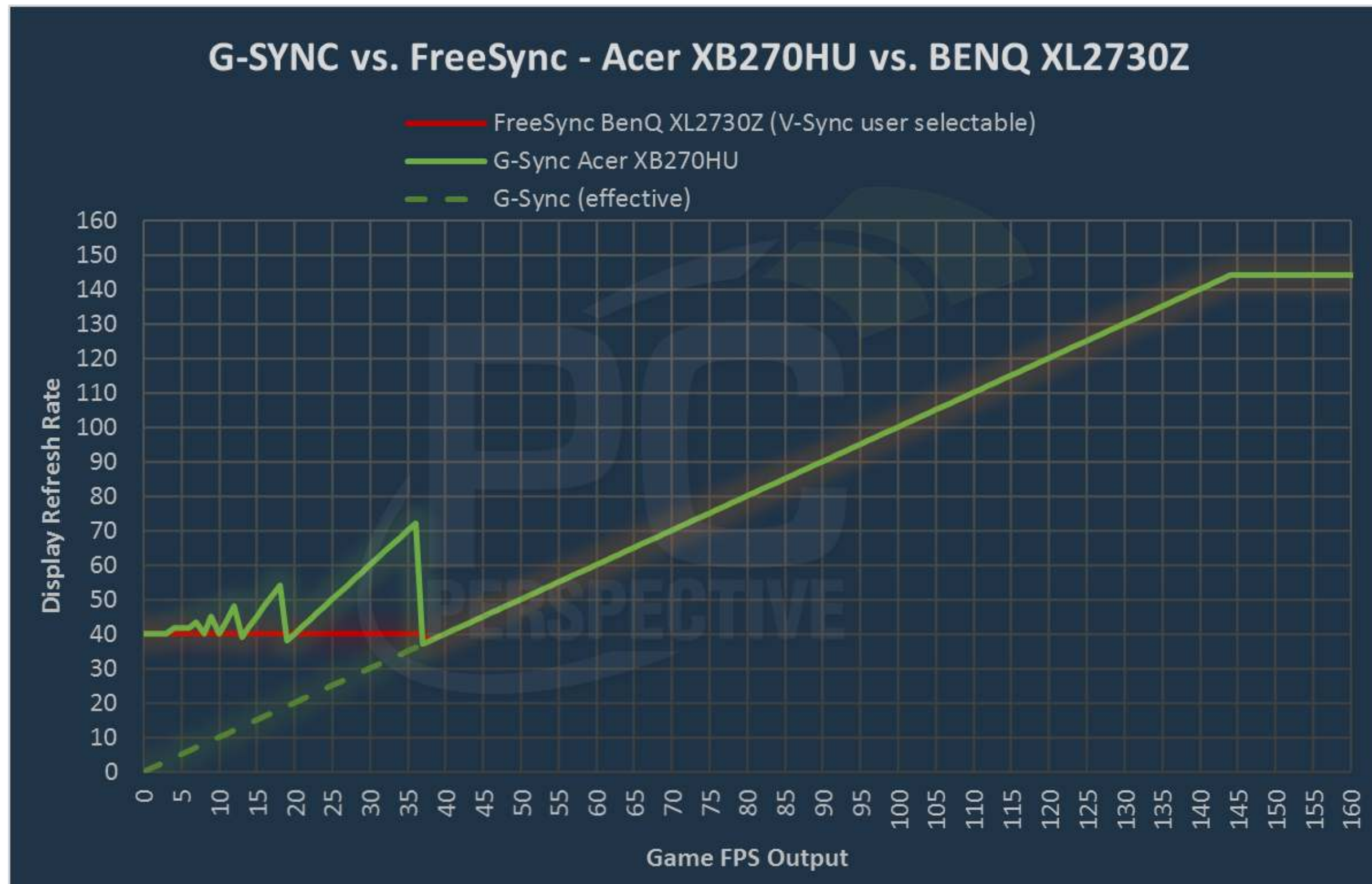


Lösung 2

2. Reverse who waits for whom:

- Monitor waits with vertical retrace, until renderer performs **swapbuffers**
- No problem with LCD's, but spec's for video signals must be adapted!
- Called G-Sync (Nvidia), FreeSync (used by AMD), Adaptive-Sync, variable refresh rate
- Seems to be the best solution currently

Messung der tatsächlichen Refresh-Rate



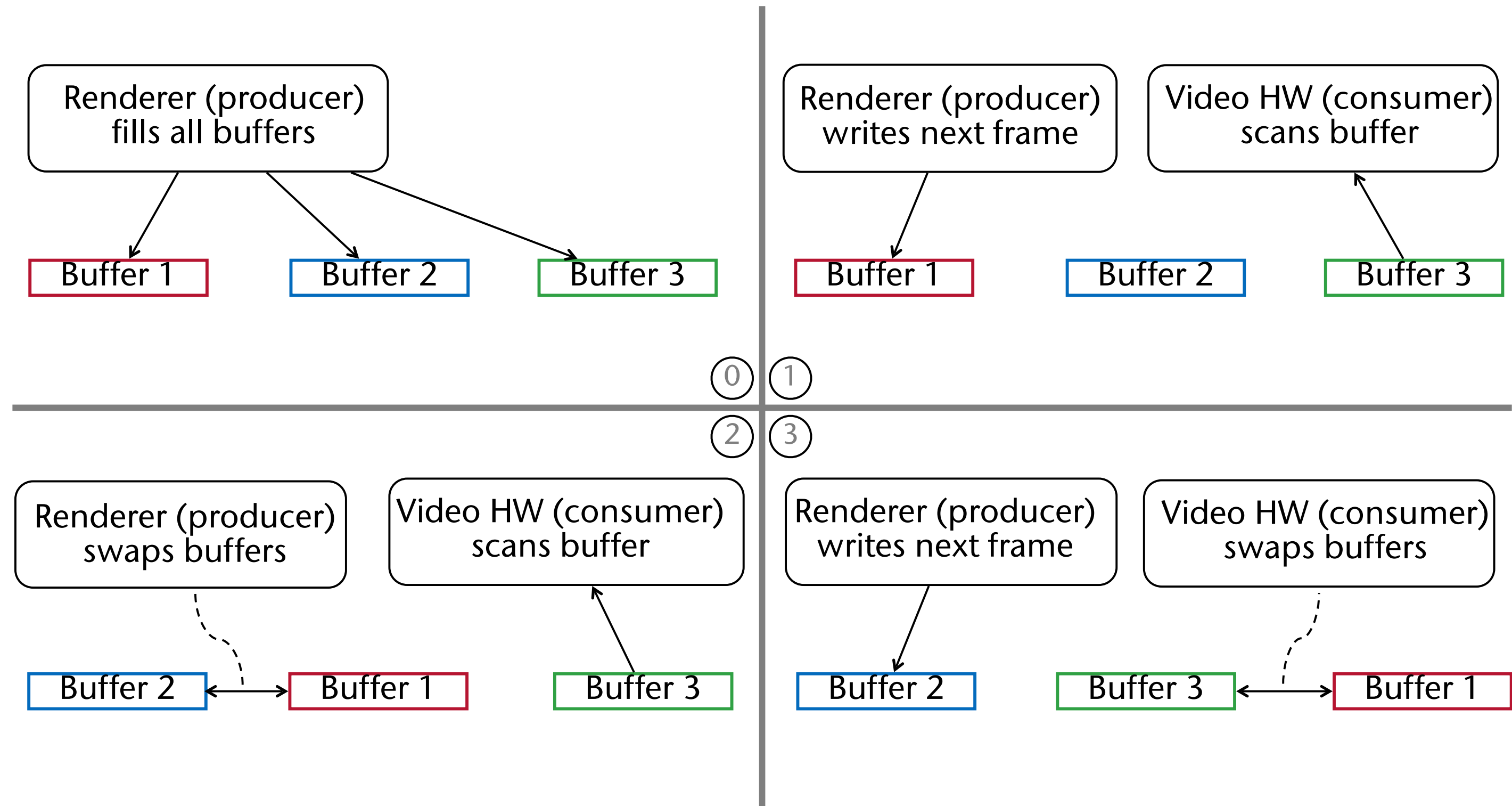
<https://www.pcper.com/reviews/Graphics-Cards/Dissecting-G-Sync-and-FreeSync-How-Technologies-Differ>

Effects of Tearing and Stuttering vs GSYNC

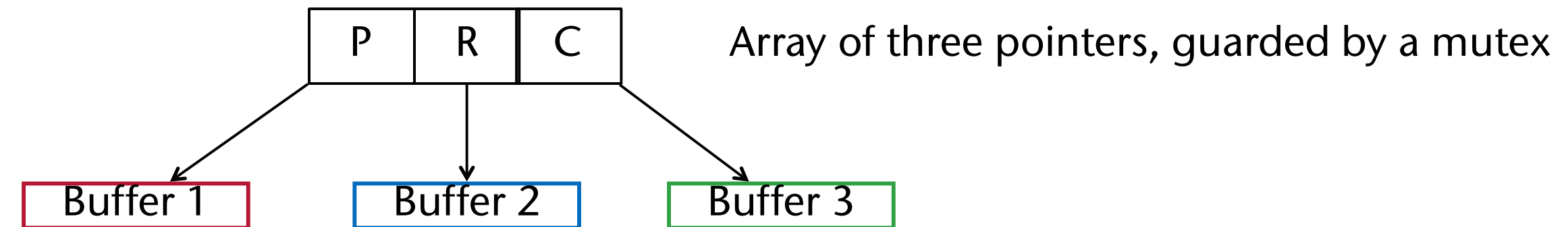


Lösung 3

3. Triple buffering:



- Array for holding the 3 pointers to the 3 buffers:



- Important: during swapping pointers to the buffers, the renderer (producer) and/or the video HW (consumer) must acquire the lock (mutex) that guards access to the array of 3 pointers!
- Note: the monitor might miss one or more frames, if the renderer is faster than the monitor → slight stutter?

Weitere Synchronisationen

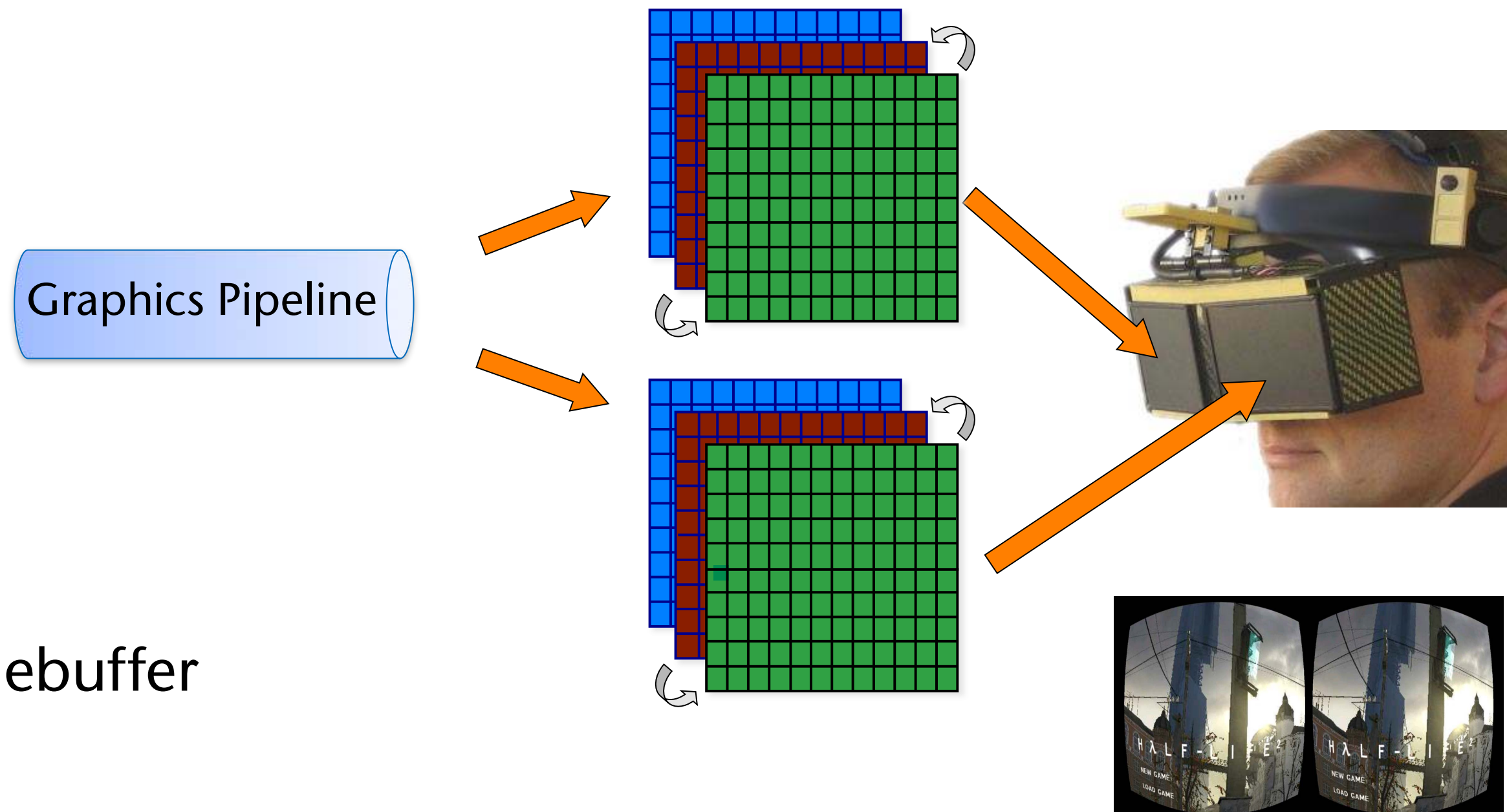
- Bei Setups mit mehreren PCs/Graphikkarten für 1 Display (z.B. Powerwall) muß der Swap-Buffers aller Renderer auf allen PCs miteinander synchronisiert werden → **Swaplock**
 - Wird typischerweise durch einen **Barrier** in Software implementiert
- Damit dies das gewünschte Resultat produziert, muß der VSYNC aller Monitore (oder Projektoren) miteinander synchronisiert werden → **Genlock**
- Fazit: noch mehr Synchronisationsverluste

Ähnliches Problem im Film

- Filme von einer Framerate in eine andere konvertieren
 - Z.B. alte SW-Filme (16 FPS) auf 24 FPS konvertieren
- Exzellentes Beispiel: Peter Jackson's "They Shall Not Grow Old"

Für Stereo-Rendering: Quad Buffers

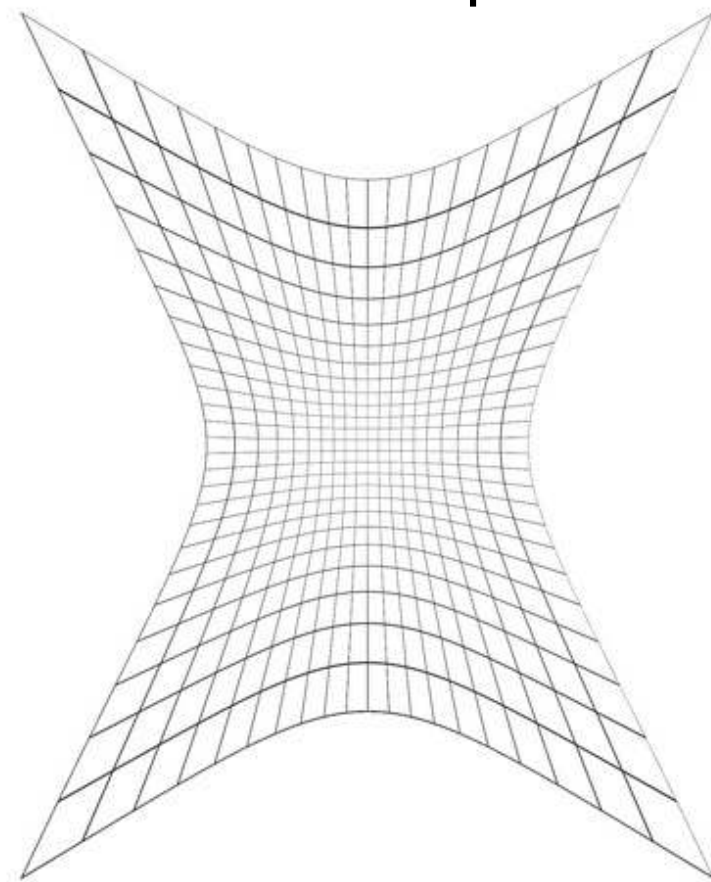
- Für Stereo- (3D-) Rendering muß man 2 unterschiedliche Bilder generieren:
je eines für das linke bzw. rechte Auge
- Eine Lösung:
2 Front buffers,
2 back buffers
(und 2 Z-Buffer!)
- Andere Lösung:
"side-by-side stereo" =
doppelt so breiter Framebuffer



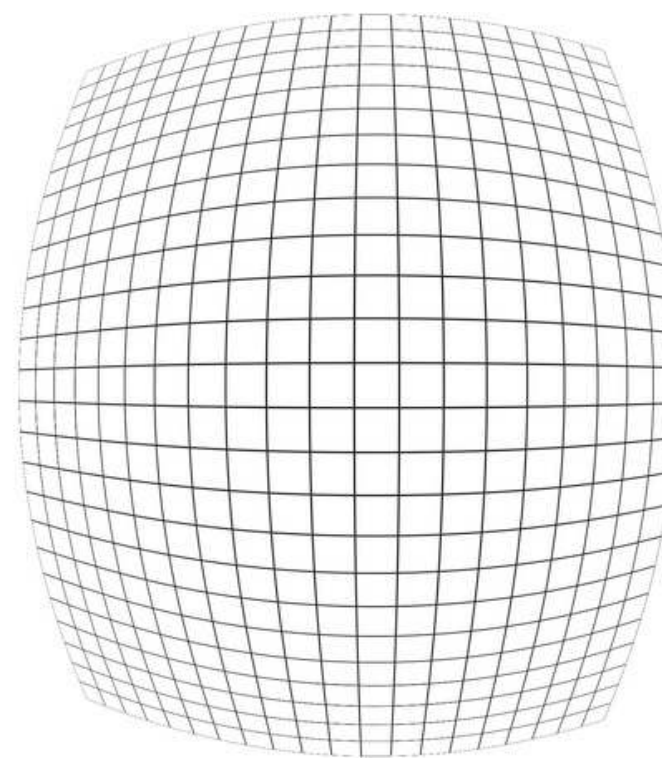
Exkurs: Pre-Warping in HMDs

- Heutige Head-Mounted Displays (HMD) verzerren das Bild (*pincushion effect*)
- Lösung: Bild im Framebuffer vorverzerren (*pre-warping*) mittels *barrel distortion*
- Resultat:

What the HMD produces

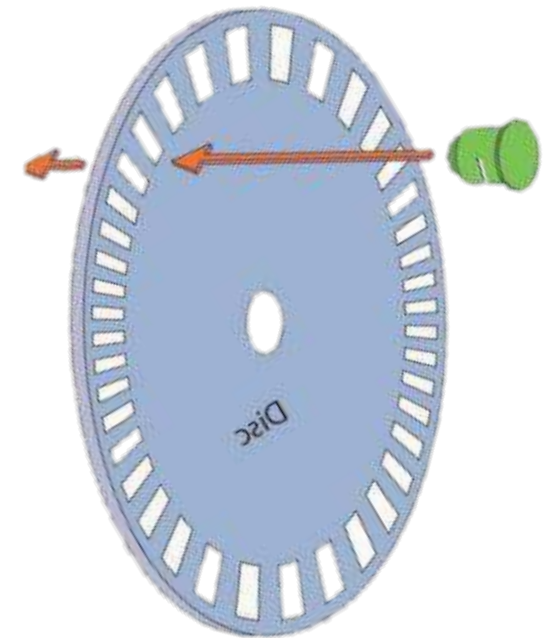


Pre-distortion in renderer



An Important Human Factor: Flicker Fusion

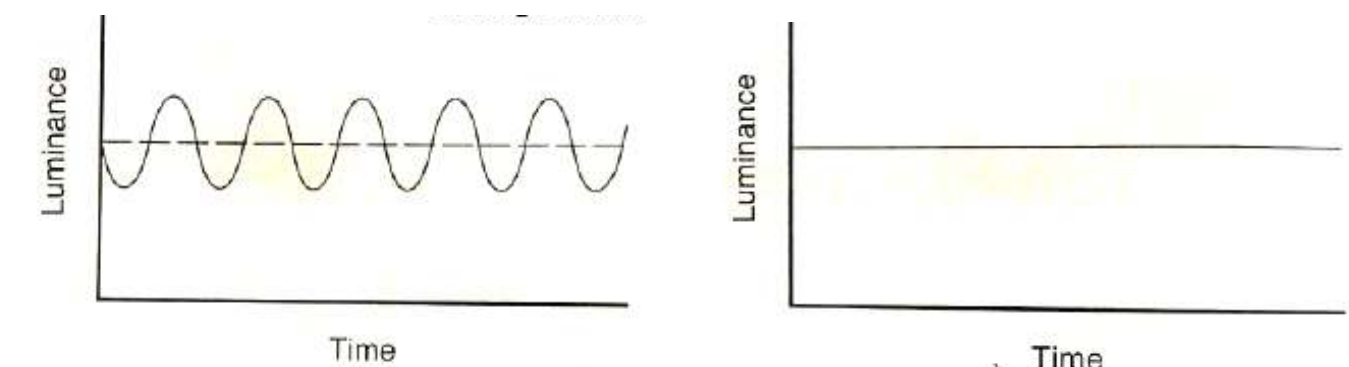
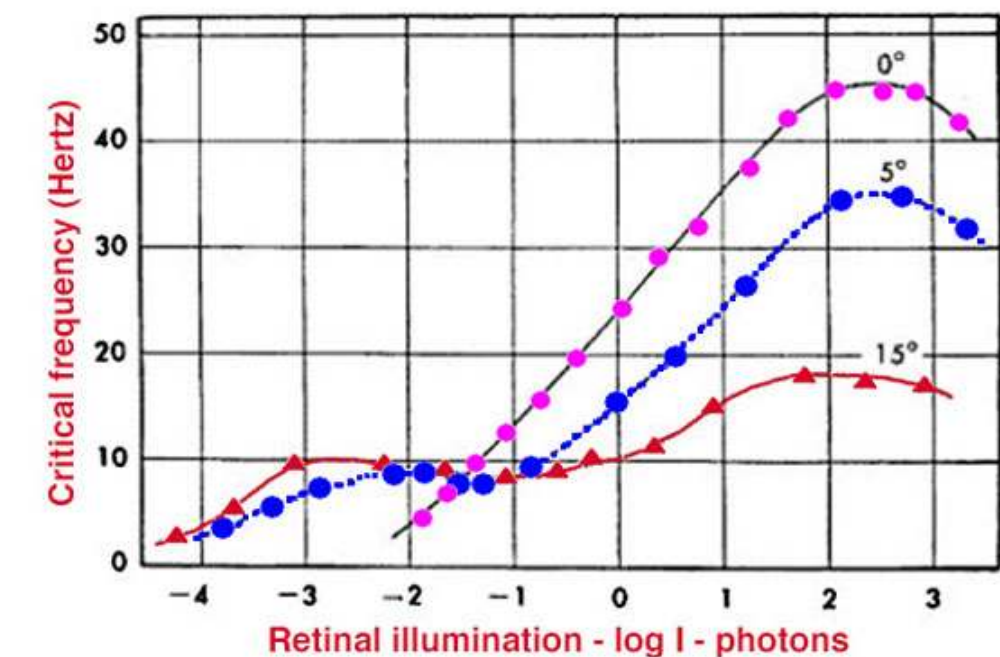
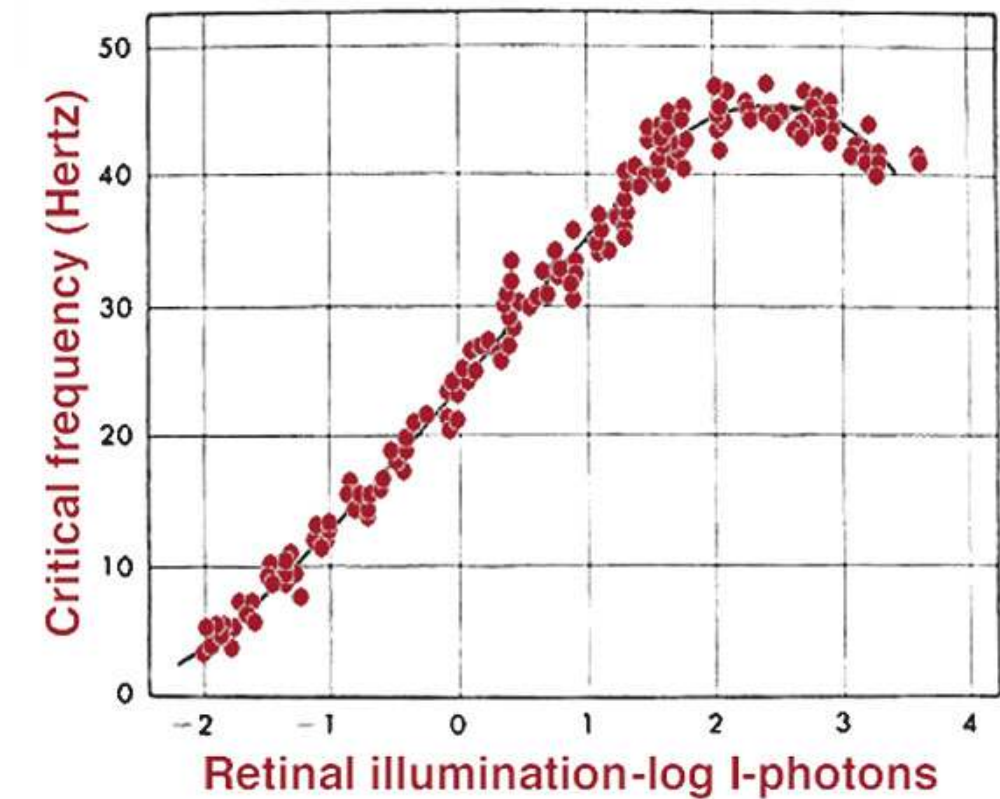
- Experiment:
 - Light source is intercepted by a sectored wheel
 - Low rotation frequency $\rightarrow$ sensation = on/off light
 - Medium frequency $\rightarrow$ sensation = flicker (rapid fluctuations in brightness)
 - Frequency $>$ critical fusion frequency $\rightarrow$ sensation = continuous brightness
 - A.k.a. critical flicker frequency (CFF)
- Factors influencing the critical frequency of fusion:
 - Brightness: higher brightness = higher frequency needed
 - Contrast (high/low brightness)
 - Region on the retina: periphery = lower frequency needed
 - Background/surrounding brightness
 - Arousal, anxiety, exhaustion, age, fatigue (more fatigue = lower frequency)



- **Ferry-Porter Law:** $CFF \sim \log(\text{luminance})$

$$CFF = a \log(L) + b$$

- Consequence from plot: 60 Hz update rate
- CFF is different for rods and cones :
 - Proportion of rods and cones depends on distance from fovea (see 5° and 15° in plot)
- **Talbot-Plateau Law:**
perceived brightness of fused temporally modulated stimulus = perceived brightness of stimulus with *average* luminance



Frameless Rendering

- Annahme: die Anzahl der Pixel im Frame ist der bestimmende Faktor für die Rendering-Zeit (→ "fill limited")
 - Ist z.B. der Fall bei wenigen Polygonen und großem Display; oder bei Ray-Tracing
- Idee: verwende das alte Frame wieder, und erneuere nur einige, zufällig ausgewählte Pixel
 - Konsequenz: es gibt keinen Double-Buffer mehr
 - Wenn die Szene dann statisch wird, werden sukzessive alle Pixel erneuert, und das Bild konvergiert zum "klassisch" gerenderten Bild
- Vorteil: wesentlich geringere Latenz zwischen Kamera-Bewegung und dem Erscheinen eines "neuen Frames" auf dem Display

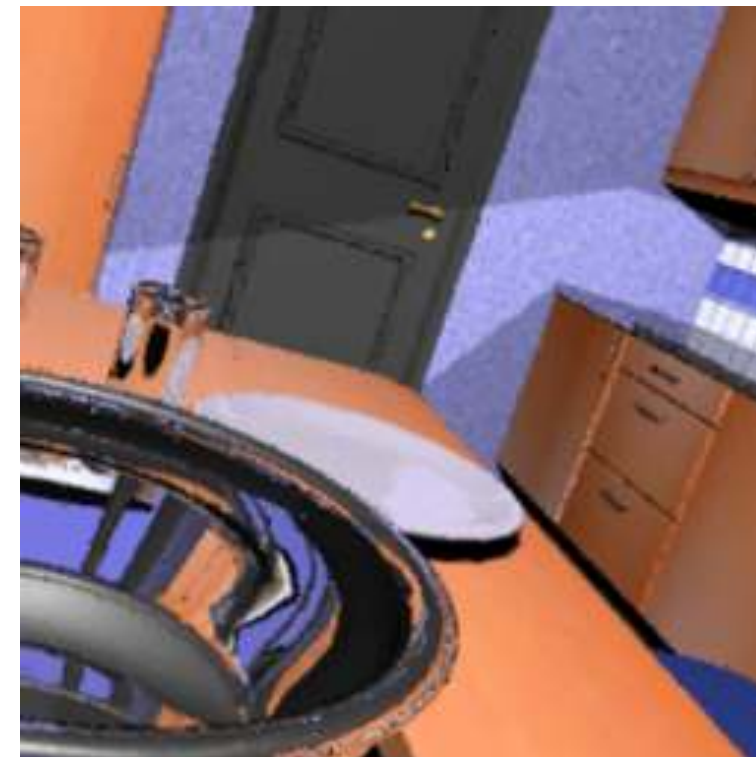
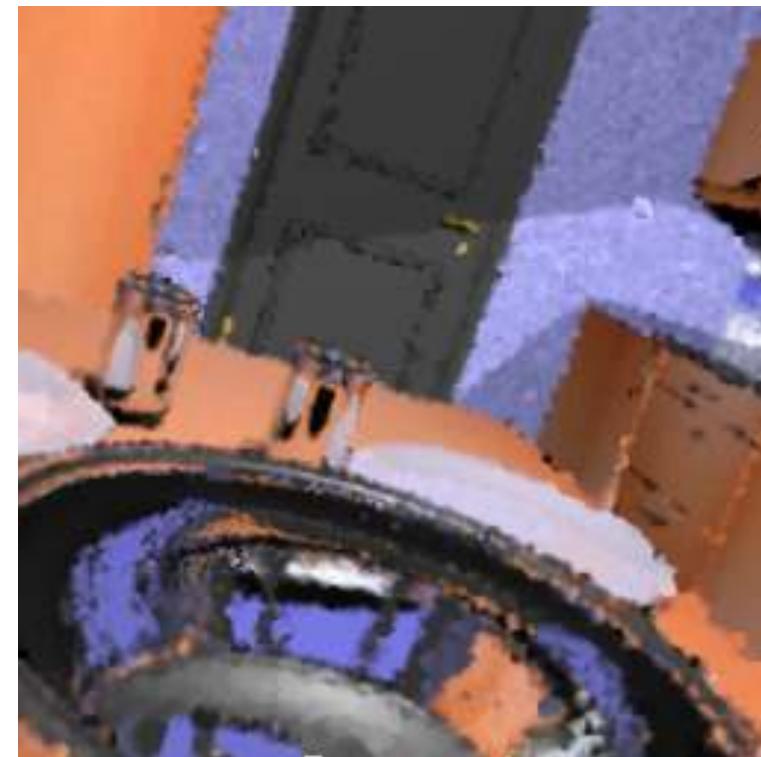
Einfaches
Frameless Rendering



static scene



Temporally Adaptive
Reconstruction



Bitte nicht durch
"look-ahead"
spoilern!



Oder:
[menti.com](https://www.menti.com)
und Code
3587 0466

Die Gammakorrektur (hier nur 1 Kanal)

Was ist hier der Unterschied?



Ohne Gammakorrektur



Mit Gammakorrektur

Nichtlineare Transferfunktionen

- Begriffe:
 - Die **wahrgenommene(!) Helligkeit** = eine **physiologische** Größe
 - Die **Intensität I** = eine **physikalische** Größe
 - **Dynamikbereich (dynamic range)** = Verhältnis max. / min. Intensität

1. Die Nichtlinearität im Auge:

- Beobachtung: eine Folge von Intensitäten $I_0, I_1, \dots, I_k$ wird als **linear wahrgenommen** gdw.

$$\forall j : \frac{I_{j+1}}{I_j} \equiv \text{const.}$$

- Aufgabe: k Intensitätsstufen I_j so im Intervall I_{min} bis I_{max} verteilen, dass die wahrgenommenen Helligkeitsstufen **linear** verlaufen
 - In der Praxis oft: $k+1 = 2^8 = 256$ oder $k+1 = 2^{12} = 4096$

- Lösung: geometrische Folge

- $I_0 = I_{\min}$, $I_1 = r \cdot I_0$, $I_2 = r \cdot I_1 = r^2 \cdot I_0$, $\dots$, $I_j = r^j \cdot I_0$

- $I_{\max} / I_{\min}$ kann man messen $\rightarrow r = \left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}} \right)^{1/k}$

- Korrektur der wahrnehmungspsychologischen Nicht-Linearität:

- Gegeben: j = Pixel-Wert im Framebuffer, $j = 0, \dots, k$

- Bestimme: $I_j = r^j \cdot I_{\min}$

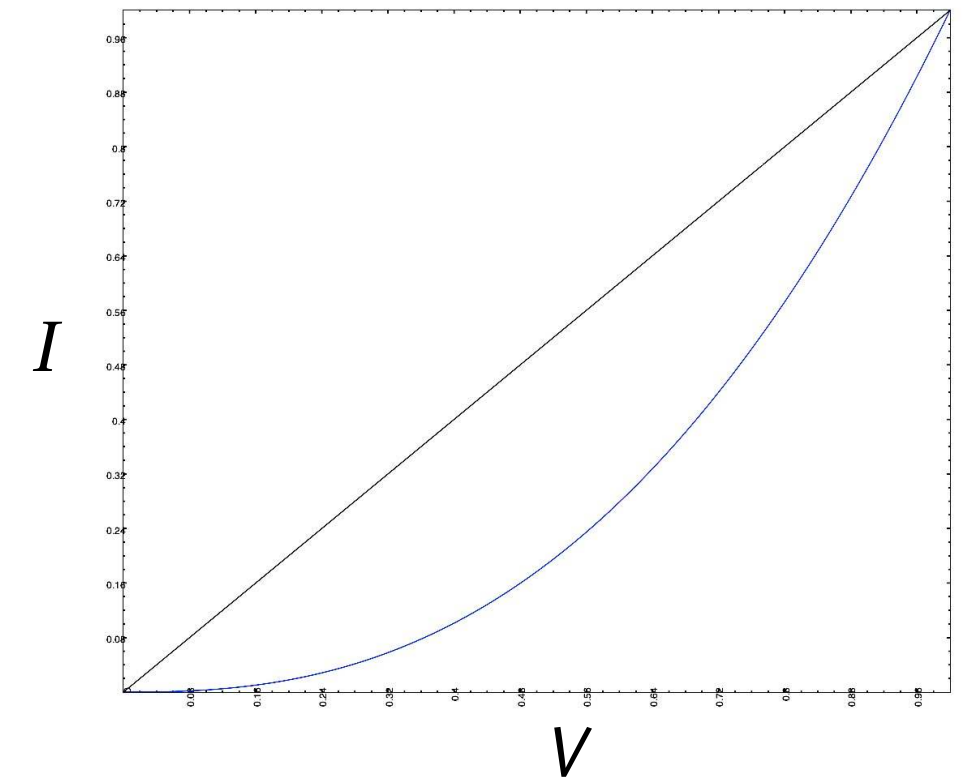
- Evtl. in Color-LUT ablegen (als Preprocessing / in HW)

2. Die Nichtlinearität im Monitor:

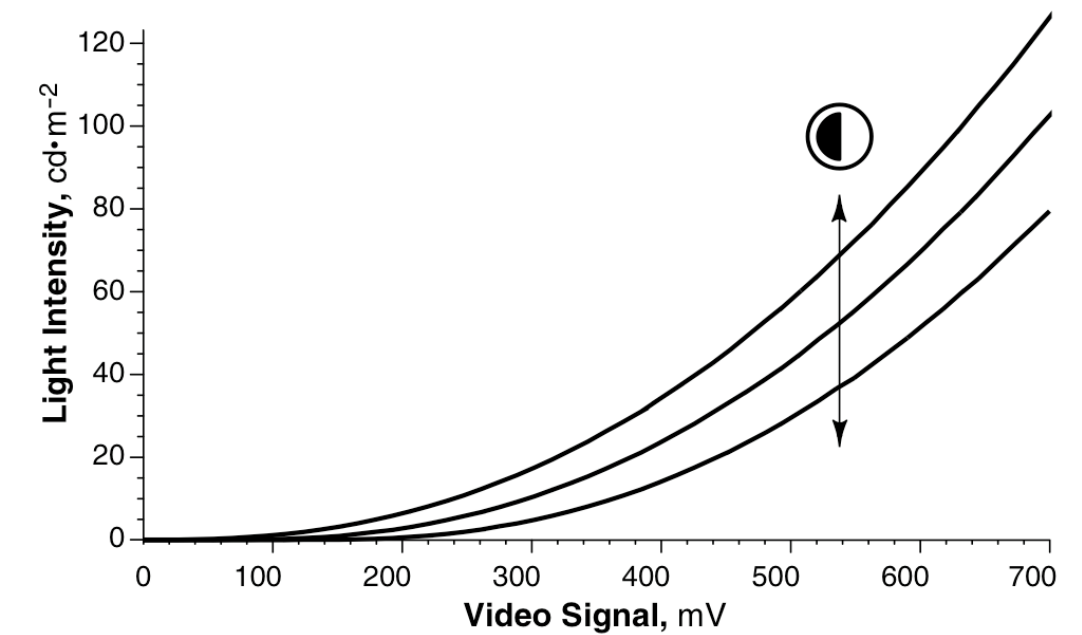
- Beobachtung: bei Eingangsspannung V liefert ein Monitor eine Ausgangsintensität I (an einem Pixel) von

$$I = I_{\max} \left(\frac{V}{V_{\max}} \right)^\gamma$$

- Typischer Wert ist $\gamma = 2.5$
- Die **Gamma-Korrektur**:
 - Gegeben I_j
 - Bestimme: $V_j = \left(\frac{I_j}{I_{\max}} \right)^{1/\gamma} \cdot V_{\max}$
 - Passiert nach der DA-Konvertierung auf Rechnerseite (oder gleichzeitig)



- Bemerkung: "Contrast"-Knopf am Monitor ändert einfach das Gamma des Monitors



- Wahrnehmungspsychologische Korrektur "für Arme":

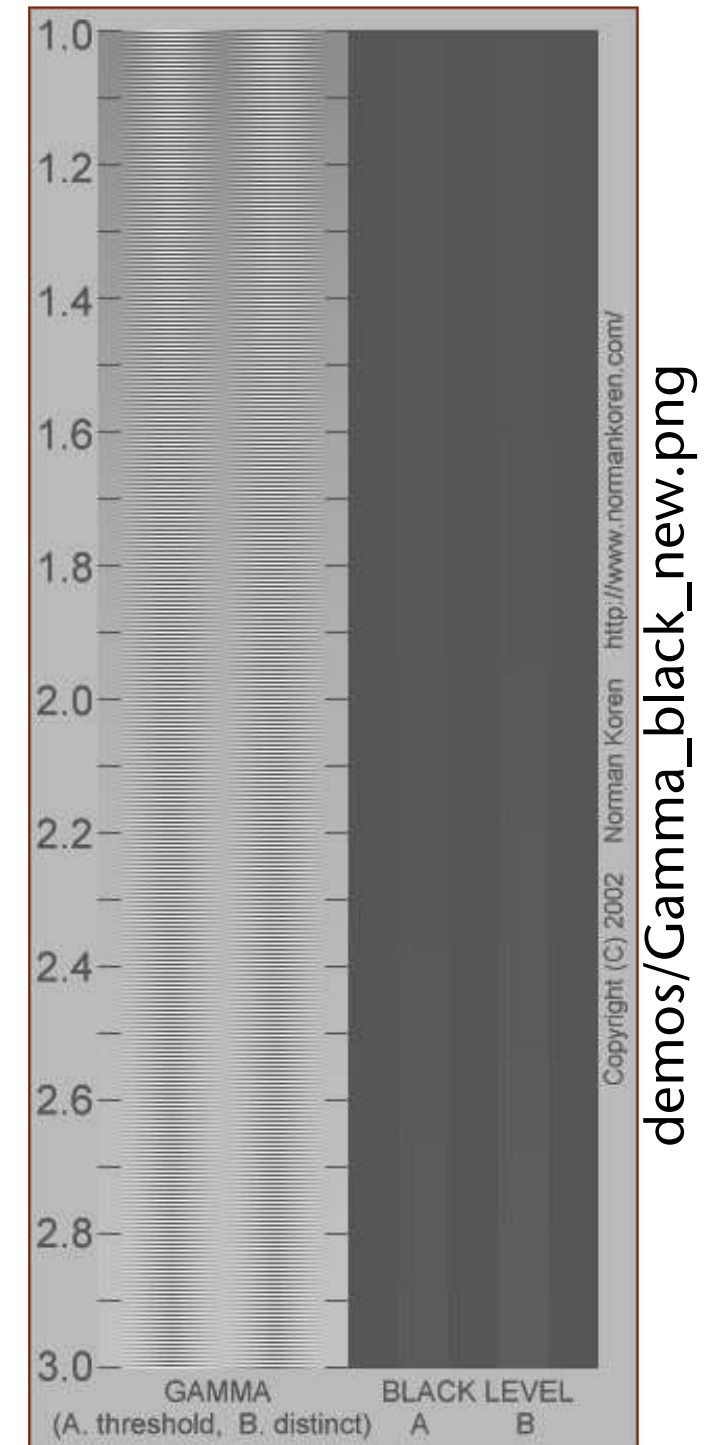
- Approximiere $I_j = r^j \cdot I_{\min}$

durch
$$I_j \approx \left(\frac{j}{k} \right)^\gamma \cdot I_{\min}$$

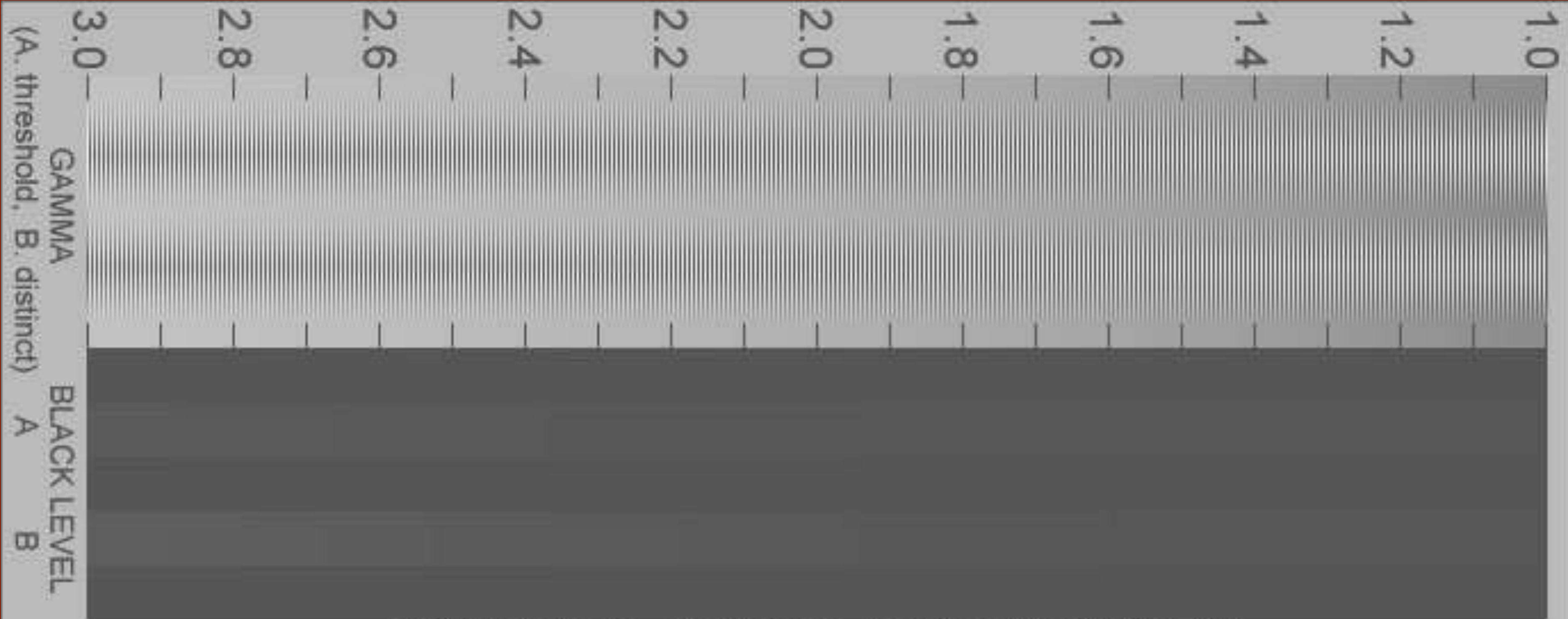
- Damit wird
$$V_j = \left(\frac{I_j}{I_{\max}} \right)^{1/\gamma} \cdot V_{\max} \approx \left(\frac{\left(\frac{j}{k} \right)^\gamma \cdot I_{\min}}{I_{\max}} \right)^{1/\gamma} \cdot V_{\max} = j \cdot c$$

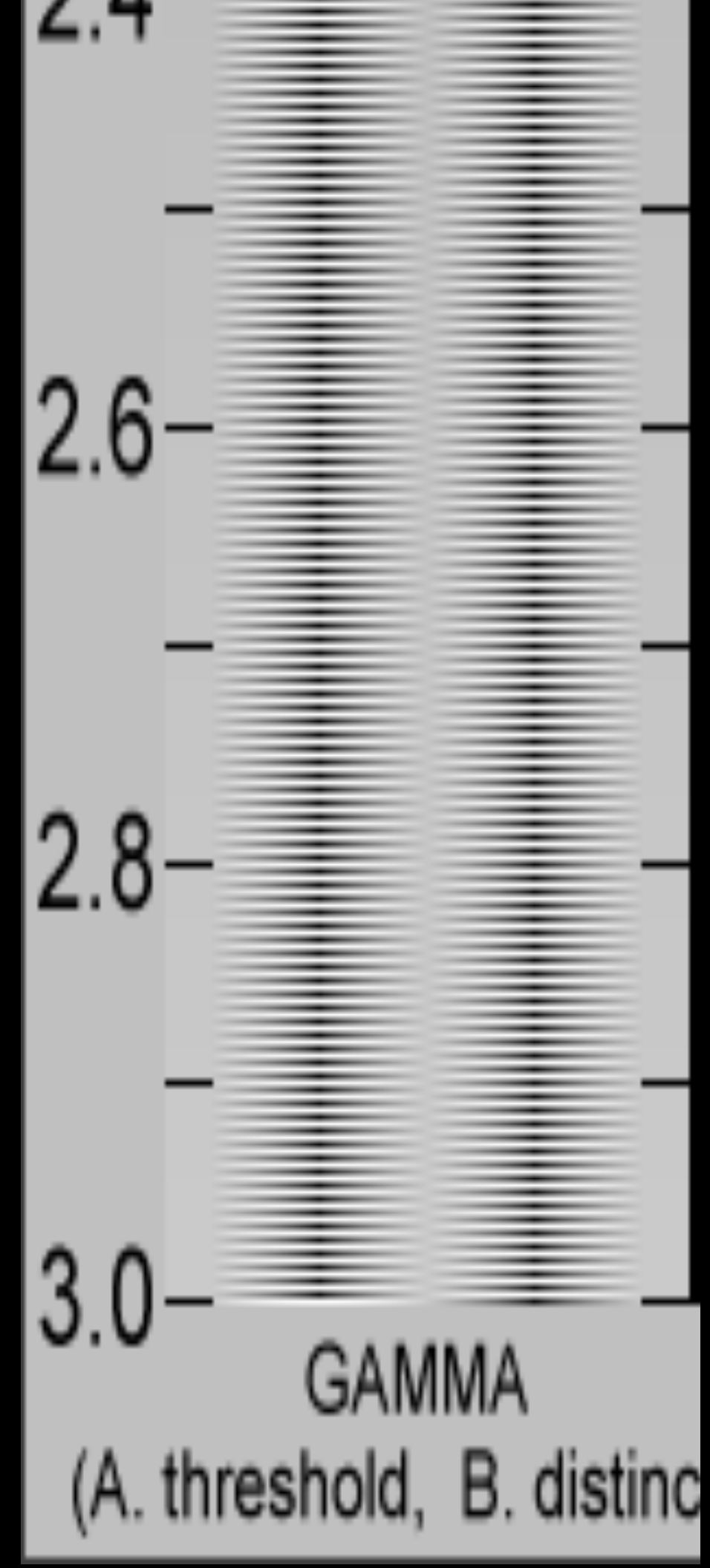
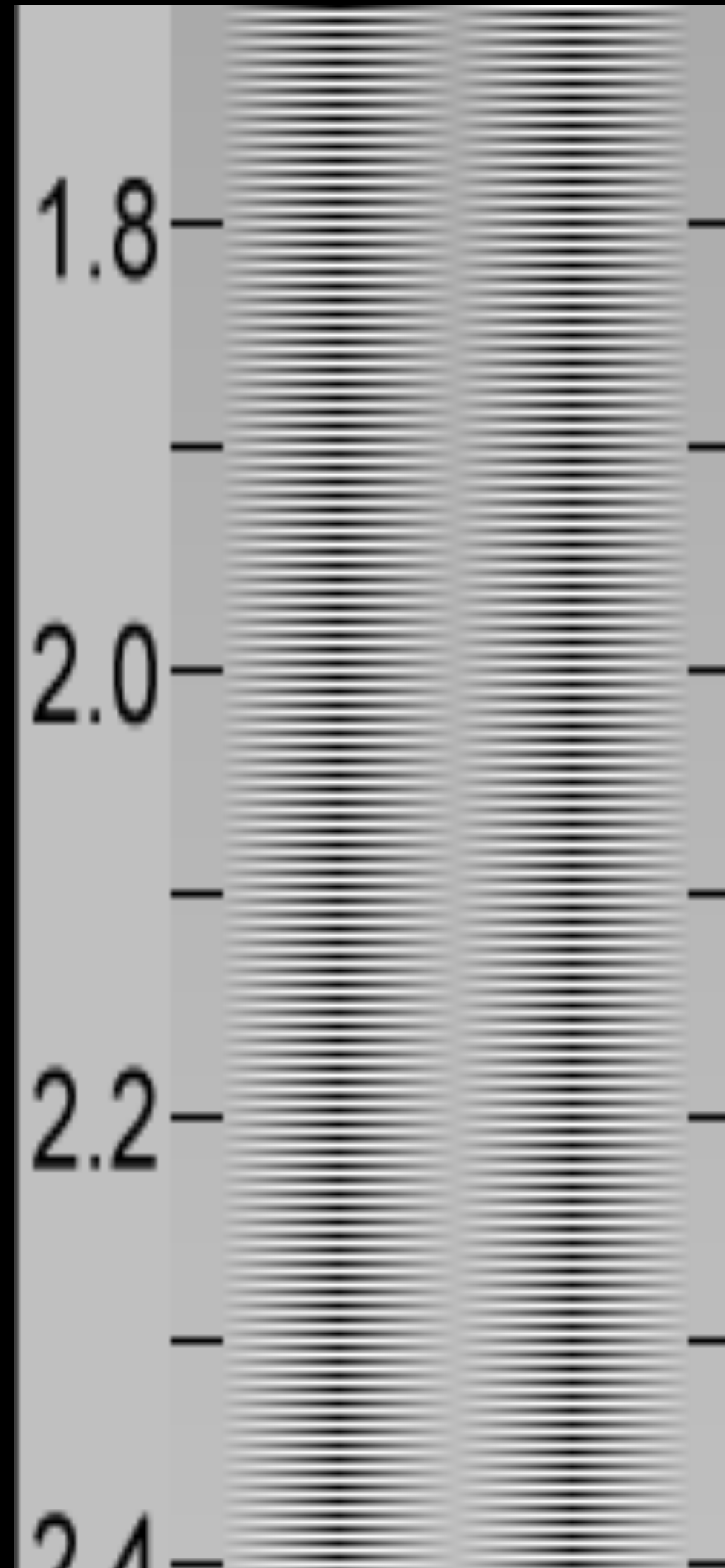
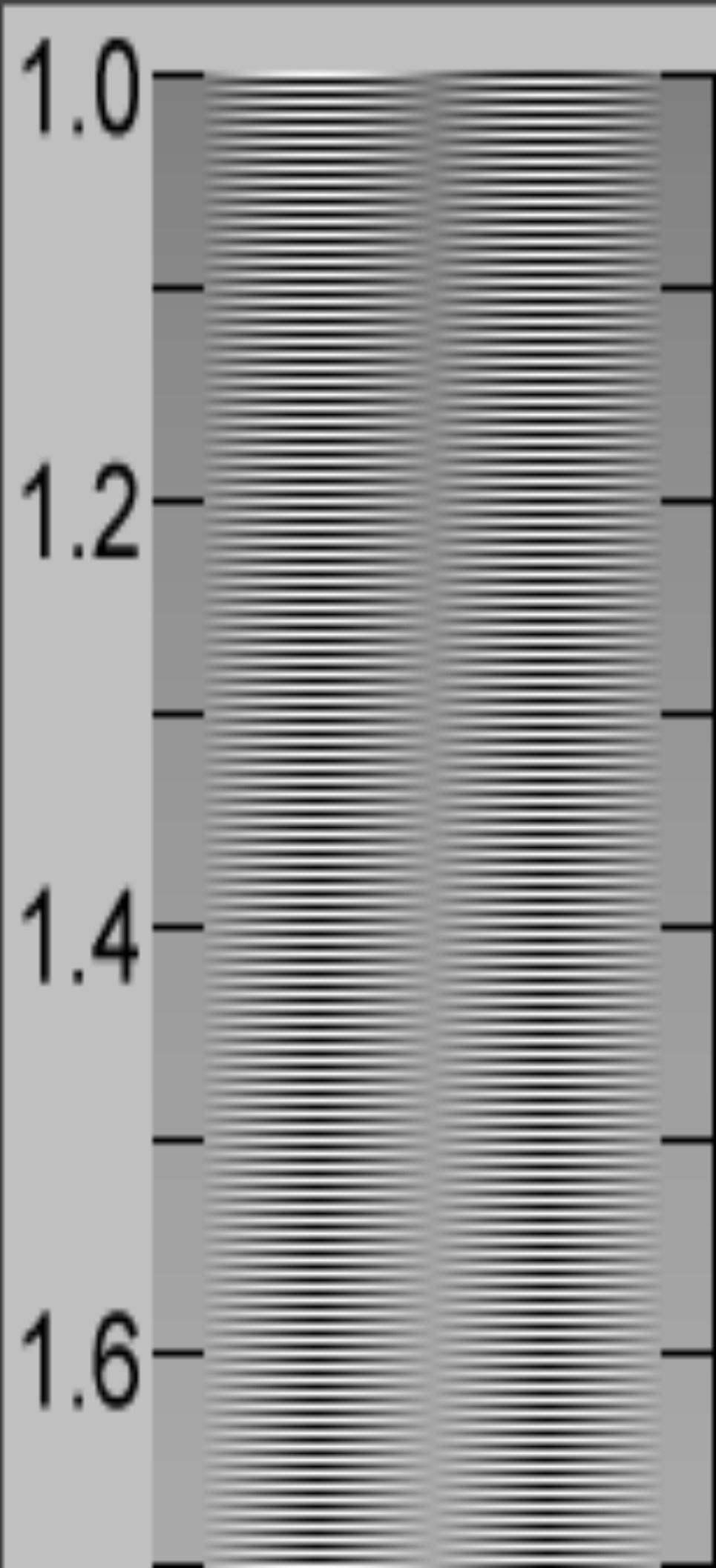
Wie bestimmt man das Monitor-Gamma?

- Achtung: (older / cheap) LCD screens are poorly suited for critical image editing because gamma is extremely sensitive to viewing angle!
 - Testbild zur visuellen Bestimmung des aktuellen Gammas des Gesamtsystems
 - Aktuelles Gamma ist dort, wo ein einheitlicher Grau-Level auf einer horizontalen Linie zu sehen ist
 - Die Methode:
 - Schwarze & weiße Pixel werden — **unabhängig von γ !** — als "Schwarz" bzw. volle Helligkeit wahrgenommen
 - Auge bildet aus der Entfernung daraus einen wahrnehmungspsychologischen(!) Mittelwert
 - Finde den Pixel-Grauwert a , so daß $\frac{1}{2} = a^\gamma$
- Führe das für verschiedene γ durch und eiche damit die Skala



S.a. VL-Homepage





Das Chaos & die Lösung

- Das Chaos (jahrzehntelang):
 - Verschiedene Monitor- und System-Gammas
 - Unklarheit darüber, an welcher Stelle in der Pipeline die Gamma-Korrektur gemacht werden soll:
 - Im Bild? (manche Tools haben das Bild schon gamma-korrigiert abgespeichert!)
 - In der Software? (= vor dem sog. Frame-Buffer, d.h., im Browser, Video-Spiel, Photoshop, ...)
 - In der Graphikkarte? (= beim Auslesen und Konvertieren des Frame-Buffers)
 - Im Monitor? (= vor der Ansteuerung der CRT-Kanone / der LCD-Transistoren)
- Die Lösung: *ICC Color Profiles*
 - Speichern Info, ob das Bild schon gamma-korrigiert wurde, und – falls ja – mit welchem Gamma (speichern noch viel mehr, u.a. den Farbraum)
 - Kann man in moderne Bildformate einbetten (z.B. JPG, TIF, PNG)

