




Computer-Graphik II

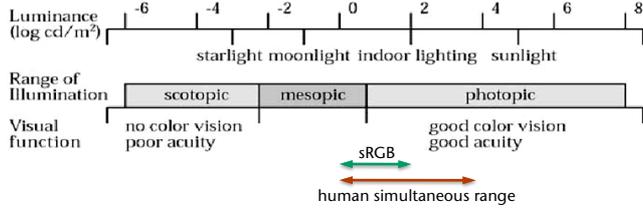
Tone Mapping / Tone Reproduction

G. Zachmann
Clausthal University, Germany
cg.in.tu-clausthal.de




Motivation

- Definition:
 - Der **Dynamikbereich** (*dynamic range*) eines Bildes ist das Kontrastverhältnis zwischen dem hellsten und dunkelsten Teil
 - Der **Dynamikbereich** eines Displays bzw. optischen Sensors ist das Verhältnis der hellsten darstellbaren bzw. wahrnehmbaren Leuchtdichte zur dunkelsten
- Der Dynamikbereich des menschlichen Sehsystems (Human Visual System, HVS):



Luminance (log ccd/m²)

Range of Illumination

Visual function

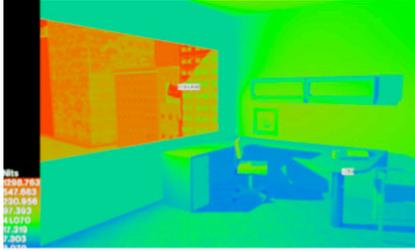
human simultaneous range

sRGB

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 2

Quellen von High Dynamic Range Images (HDRI)

- Ray-Tracing: physikalisch korrekte synthetische Bilder
- Photographie:
 - mehrere Aufnahmen mit verschiedenen Belichtungszeiten
 - Ineinander "blenden" (benötigt kalibrierte Antwortkurve der Kamera)




G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 3

Darstellung von HDR-Bildern

- Verwende entweder HDR-Displays ...
- ... oder LDR-Displays; dann benötigt man:
 - **Tone mapping/ tone reproduction** = Abbildung des potentiellen "high dynamic range" (HDR) von realen Leuchtdichten auf eine "low dynamic range" (LDR) eines Displays mit begrenzter Leuchtdichtenbandbreite.



G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 4

Resultat des naiven Mappings



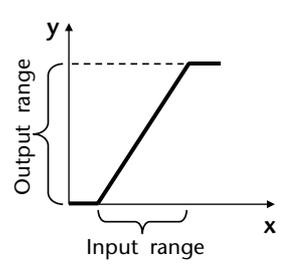
Divide by Max Clamp to 1 Exp. mapping

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 7

Graustufentransformationen

- Betrachte zunächst reine "Punktooperationen":
 - $y = T(x)$
 - T heißt **Transferfunktion**
 - Völlig unabhängig von Nachbarpixeln
- Beispiele:

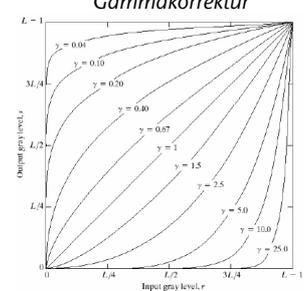
Lineare Skalierung



Output range

Input range

Gammakorrektur



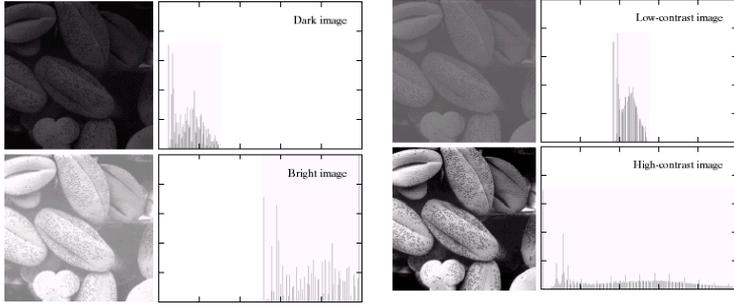
Output gray level, r

Input gray level, r

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 8

Das Luminanz-Histogramm

- Unbalanciertes Histogramm nutzt nicht den vollen dynamischen Wertebereich aus
- Balanciertes Histogramm ergibt ein angenehmeres Bild und gibt den Inhalt wesentlich besser wieder



G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 9

- Das Histogramm eines Bildes enthält wertvolle Informationen über die Graustufen
- Es enthält **keine räumlichen** Informationen
- Alle folgenden Bilder haben exakt das gleiche Histogramm!



G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 10

Interpretation des Histogramms

- Behandle Pixel als **unabhängige, gleichverteilte Zufallsvariablen** (*i.i.d. random variables = independent, identically distributed RVs*)
- Histogramm = diskrete Approximation der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (*probability density function, PDF*)

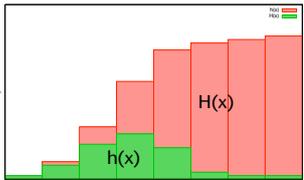
G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 13

Diskrete vs. kontinuierliche Formulierung

$L = \text{Anzahl Levels}$
 $x \in 0, \dots, L - 1$

Histogramm: $h(x) = \text{Anz. Pixel mit Level } x$

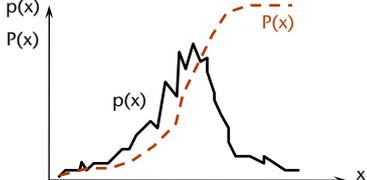
Kumulatives Histogramm:
$$H(x) = \sum_{u=0}^x h(u)$$



$x \in [0, 1]$

PDF: $p(x) = \text{“Dichte” am Level } x$

Cumul. distrib. function (CDF):
$$P(x) = \int_0^x p(u) du$$



G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 14

- Klar ist:

$$H(L-1) = \sum_{u=0}^{L-1} h(u) = \text{Anzahl Pixel } N$$

- Deswegen wird oft $h(x)$ bzw. $H(x)$ mit $\frac{1}{N}$ normiert
- Die Wahrscheinlichkeit, daß das Ereignis " $X \leq x$ " eintritt, ist

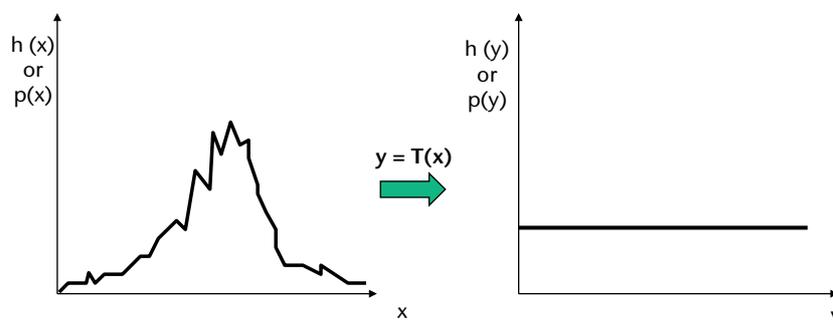
$$P[X \leq x] = P(x) = \int_0^x p(u) du$$

bzw.

$$P[X \leq x] = P(x) = \frac{1}{N} \sum_0^x h(u)$$

Histogram Equalization

- Gegeben: eine Zufallsvariable X mit bestimmter PDF p_X
- Gesucht: Funktion T , so daß die Zufallsvariable $y = T(x)$ eine gleichverteilte PDF $p_Y \equiv \text{const}$ hat
- Diese Transformation heißt **Histogram Equalization**



- Behauptung: die Transferfunktion

$$y = P(x) = \int_0^x p(u) du$$
 leistet genau diese Histogramm-Equalization

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 17

1. Beweisvariante

- Zu zeigen: die CDF

$$P_Y(y) = y$$
- Beweis durch Einsetzen:

$$\begin{aligned}
 P_Y(y) &= P[Y \leq y] \\
 &= P[T(X) \leq y] \\
 &= P[P_X(x) \leq y] \\
 &= P[x \leq P_X^{-1}(y)] \\
 &= P_X(P_X^{-1}(y)) \\
 &= y
 \end{aligned}$$

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 18

2. Beweisvariante

- Sei X eine stetige Zufallsvariable
- Sei $Y = T(X)$ (Y ist also auch stetige ZV)
- Sei T diff'bar und monoton wachsend
- Damit existiert T' und T^{-1}
- Da T alle $x \leq s \leq x + \Delta x$ auf $y \leq t \leq y + \Delta y$ abbildet, gilt

$$\int_x^{x+\Delta x} p_X(s) ds = \int_y^{y+\Delta y} p_Y(t) dt$$
- Für kleine Δx gilt also

$$p_Y(y) \Delta y \approx p_X(x) \Delta x \quad p_Y(y) \approx p_X(x) \frac{\Delta x}{\Delta y}$$

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 19

- Wenn $\Delta x \rightarrow 0$, dann wird die Gleichung exakt:

$$p_Y(y) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} p_X(x) \frac{\Delta x}{\Delta y} = p_X(x) \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta y / \Delta x}$$

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{T(x + \Delta x) - T(x)}{\Delta x} = T'(x)$$
- Zusammen:

$$p_Y(y) = \frac{T_X(x)}{T'(x)}$$

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 20

- Jetzt noch $x = T^{-1}(y)$ einsetzen ergibt

$$p_Y(y) = \frac{p_X(T^{-1}(y))}{T'(T^{-1}(y))}$$

- Nebenresultat: wir wissen jetzt, wie man Verteilungsfunktionen umrechnen muß, wenn eine Zufallsvariable eine Funktion einer anderen Zufallsvariable ist.
- Zurück zur Histogramm-Equalization ...

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 21

- Gesucht ist T , so daß

$$p_Y(y) \equiv 1$$

- Einsetzen liefert

$$\frac{p_X(T^{-1}(y))}{T'(T^{-1}(y))} = 1$$

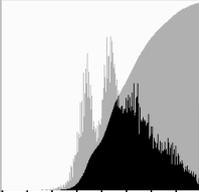
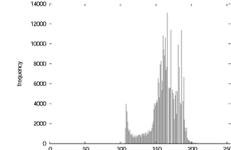
$$T'(T^{-1}(y)) = p_X(T^{-1}(y))$$

- Einsetzen von $x = T^{-1}(y)$ liefert $T'(x) = p_X(x)$
- Gesucht war T , also noch integrieren :

$$T(x) = \int_0^x T'(u) du = P_X(x)$$

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 22

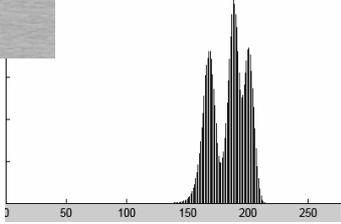
Beispiele

Orig. Bild	Histogramm	Resultat
		
		
		

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 23

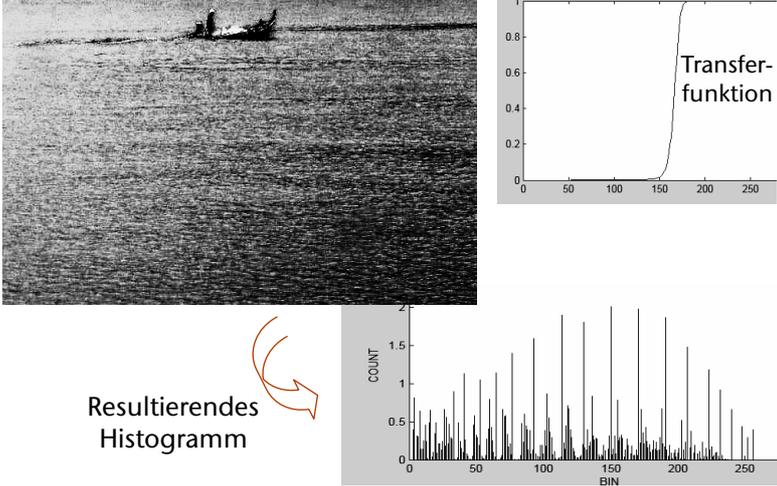
Problem der Histogramm-Equalization

- Problem: ein schmales Histogramm

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 24

Ergebnis: unerwünschter Kontrast



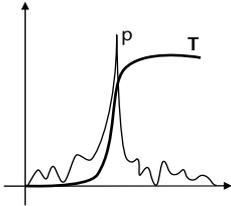
The image shows a grayscale photograph of a boat on a body of water. To the right of the image is a graph labeled 'Transferfunktion' showing a step function that is zero until approximately x=150, then rises sharply to 1. Below the image is a histogram labeled 'Resultierendes Histogramm' with 'COUNT' on the y-axis (0 to 2) and 'BIN' on the x-axis (0 to 250). The histogram shows a distribution of pixel values across the bins.

Resultierendes Histogramm

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 25

Tone Reproduction nach Ward et al. [1997]

- Problem der Histogramm-Equalization:
 - Sehr steile Abschnitte der Transferfunktion T können sichtbares Rauschen hervorrufen
- Idee: beschränke die Steigung von T
- Algo:
 1. Bestimme das Histogramm h
 - Erinnerung $h \approx p = T'$
 2. Clampe zu große Bins auf einen Wert $\alpha \cdot \frac{N}{B}$, wobei $\alpha \approx 0.5 \dots 1.5$, $N = \text{Anzahl Pixel}$, $B = \text{Anzahl Bins}$
 3. Setze $N' = \sum_{i=0}^{L-1} h(x_i)$
 4. Wiederhole ein paar Mal.



The graph shows a probability density function p (a sharp peak) and a transfer function T (a curve that rises and then levels off). The x-axis represents pixel intensity and the y-axis represents probability or count.

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 26

Exkurs: Das Weber-Fechner-Gesetz [~1850]

- Experimenteller Befund:
 - Die "just noticeable difference" (JND) eines Stimulus (z.B. Gewicht) hängt von der Stärke des Stimulus ab.
 - Das Verhältnis von JND zu Stärke des Stimulus ist eine (stimulusabhängige) Konstante.
- Mathematische Formulierung:
 - Sei S der Stimulus, ΔS die JND
 - Weber's Gesetz:

$$\frac{\Delta S}{S} = k$$

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 27

- Das Weber-Fechner-Gesetz:
Sei E die Stärke des wahrgenommenen Sinneseindrucks von S ("gefühltes Gewicht").
Dann ist

$$\Delta E = k \frac{\Delta S}{S} \qquad \frac{dE}{dS} = k \frac{1}{S}$$
- Integrieren liefert:

$$E = k \cdot \ln S + c$$
 - Dabei ist c eine Konstante, die den minimaler Stimulus S_0 beschreibt, bei den gerade noch ein Sinneseindruck $E \approx 0$ entsteht:

$$c = -k \cdot \ln S_0$$
- Zusammen:

$$E = k \cdot \ln \frac{S}{S_0}$$

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 28

- Im Fall des Sehnsinnes kann man es noch genauer angeben:

$$\Delta E = \begin{cases} -2.8 & , \log L < -3.9 \\ (0.4 \log L + 1.6)^{2.2} - 2.8 & , -3.9 \leq \log L < -1.4 \\ \log L - 0.4 & , -1.4 \leq \log L < -0.02 \\ (0.3 \log L + 0.7)^{2.7} - 0.7 & , -0.02 \leq \log L < 1.9 \\ \log L - 1.3 & , \log L \geq 1.9 \end{cases}$$

Anwendung im Tone Mapping

- Annahme: zwei benachbarte Pixel im Originalbild haben gerade einen Intensitätsunterschied von der JND, also

$$\Delta L = L_1 - L_2 = J(L_1)$$

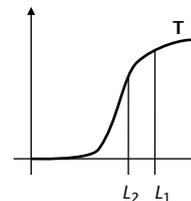
(oBdA ist $L_1 > L_2$)

- Gesucht ist eine Transferfunktion T , so daß diese Bedingung eine Invariante ist, also

$$T(L_1) - T(L_2) \leq T(J(L_1))$$

- Umformen:

$$p(L_1) = T'(L_1) \approx \frac{T(L_1) - T(L_2)}{L_1 - L_2} \leq \frac{J(T(L_1))}{L_1 - L_2} = \frac{J(T(L_1))}{J(L_1)}$$



- Algorithmus:

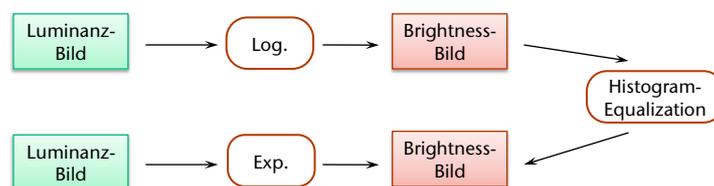
1. Berechne das Histogramm
2. Berechne das kumulative Histogramm, d.h., T
3. Clampe alle Bins, so daß

$$h(i) \leq \frac{J(T(L_i))}{J(L_i)}$$

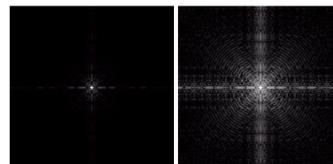
wobei L_i der Intensitätslevel von Bin i ist

4. Wiederhole ein paar Mal

- Nebenbemerkung: das Weber-Fechner-Gesetz ist auch der Grund, warum die Histogramm-Equalization bzw. das Tone-Mapping sehr oft im sog. "Log-Space" durchgeführt wird



Fourier-Spektrum
eines Bildes
vor und nach dem Log.



Beispiel



G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08

Tone Mapping 33

Weitergehende Ideen

- Problem: diese Methode verhindert $\Delta L > J(L)$ auch zwischen Pixeln, die **nicht** benachbart sind
 - Idee: clamp nicht das Histogramm, sondern jedes Pixel individuell unter Berücksichtigung der Nachbar-Pixel
 - Lokaler Tone-Mapping-Operator (TMO)
 - Führt wieder zu anderen Problemen (z.B. sog. "Halos")
- Weitere Beschränkungen des Human Visual Systems (HVS):
 - Blendung (glare): starke Lichtquellen in der Peripherie reduzieren Kontrastempfindlichkeit des Auges
 - Skotopisches / mesopisches Sehen: bei niedriger Luminanz nimmt die Farbempfindlichkeit stark ab
 - Ebenso nimmt räumliches Auflösungsvermögen ab
 - Könnte man im TMO ausnutzen

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08

Tone Mapping 34

Erzeugen eines Grauwertbild-Histogramms

- Gegeben: Grauwertbild (= Textur)
- Ziel: Histogramm als 1D-Textur
 - Jedes Texel = ein Bin
- Problem: "Verteilen" auf Bins
 - Ziel-Adresse eines Fragment-Shaders ist ja fest
- Erste Idee:
 - Pro Pixel im Originalbild einen Punkt (GL_POINT) "rendern",
 - im Vertex-Shader das entsprechende Bin ausrechnen (statt Transf. mit MVP-Matrix),
 - die "Koordinate" dieses Bins als Koordinate des Punktes setzen
- Problem:
 - Hohes Datenübertragungsvolumen CPU → GPU
 - Z.B.: $1024^2 \times 2 \times 4$ Bytes = 8 MB zusätzlich zum 1024^2 -Bild

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 35

Enter ... the Geometry Shader [Nov 2006]

- Eine dritte Shader-Art:

```

graph LR
    subgraph Host_Commands [Host Commands]
        glBegin[glBegin(GL ...)]
        glEnable[glEnable, glLight, ...]
        glVertex[glVertex]
        glTexImage[glTexImage]
    end
    subgraph Pipeline
        VP[Vertex Processing] --> AP[Assemble Primitives]
        AP --> GP[Geometry Processing]
        GP --> ARP[Assemble And Rasterize Primitive]
        ARP --> FP[Fragment Processing]
        FP --> PFO[Per-Fragment Oper.]
        PFO --> FBO[Frame Buffer Oper.]
        FBO --> FB[Frame Buffer]
        FB --> Display[Display]
        FB --> RBC[Read Back Control]
    end
    subgraph Memory
        SM[Status Memory]
        TM[Texture Memory]
    end
    glBegin --> SM
    glEnable --> SM
    SM --> VP
    SM --> AP
    SM --> GP
    SM --> ARP
    SM --> FP
    SM --> PFO
    glTexImage --> TM
    TM --> VP
    TM --> AP
    TM --> GP
    TM --> ARP
    TM --> FP
    RBC --> TM
  
```

- Doku: http://www.opengl.org/registry/specs/NV/geometry_shader4.txt

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 36

Funktionsweise des Geometry Shaders

- Applikation generiert irgendwelche Primitive (Points, Lines, Triangle-Fans, etc.)
- Vertex-Shader transformiert diese (immer ein Vertex auf einmal)
- Geometry-Shader bekommt von der Assembly-Stufe Primitive
 - Nur GL_POINTS, GL_LINES, GL_TRIANGLES (+ 2 weitere)
- Geometry-Shader gibt neue Primitive aus
 - Nur GL_POINT, GL_LINE_STRIP, GL_TRIANGLE_STRIP
 - Muß nichts mit der eingegebenen Geometrie zu tun haben
 - Anzahl kann (fast) beliebig sein, ist unabhängig von der Anzahl der eingegebenen Primitive
- Typ der Input-/Output-Geometrie muß vorab festgelegt werden
- Zugriff auf OpenGL-State und Texturen wie üblich

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 37

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Output des Vertex-Shaders: 	<ul style="list-style-type: none"> Input des Geometry-Shaders: 	<ul style="list-style-type: none"> Output des Geometry-Shaders:
<code>gl_Position →</code>	<code>gl_PositionIn[] →</code>	<code>gl_Position</code>
<code>gl_Normal →</code>	<code>gl_NormalIn[] →</code>	<code>gl_Normal</code>
<code>gl_TexCoord →</code>	<code>gl_TexCoordIn[] [] →</code>	<code>gl_TexCoord[]</code>
...		

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 38

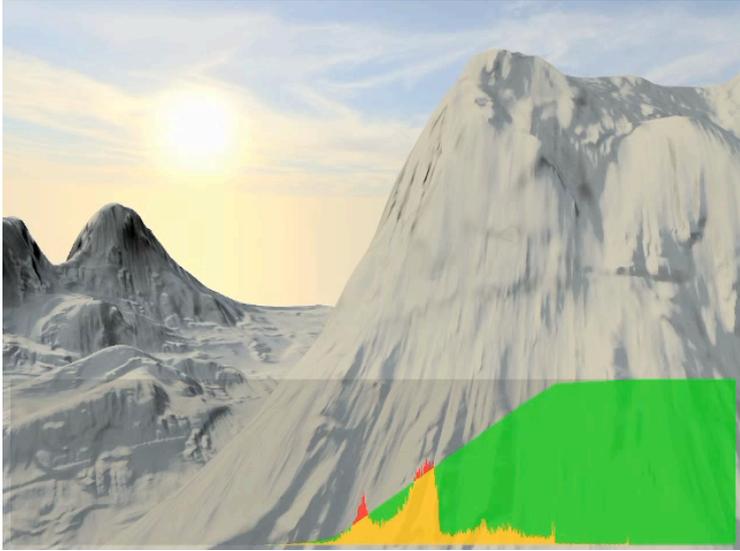
Histogramme mit Geometry-Shader

- Ein Quad in der Applikation rendern
- Vertex-Shader ist (fast) leer
- Der Geometry-Shader ...
 - läuft durch das Bild,
 - erzeugt für jedes Pixel ein Point-Primitiv mit der x-Koordinate = Bin , y=0
- Fragment-Shader ...
 - nimmt die Points,
 - gibt Farbe (1,0,0,0) aus,
 - an der Position (x,0)
- Fragment-Operation ...
 - ist auf Blending eingestellt mit `glBlendFunc (GL_ONE ,GL_ONE) =` Akkumulation (aktuelle Karten können das auch mit FP-FBOs)




G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 39

Video



Thorsten Scheuermann, Justin Henzley, 2007.
 Graphics Product Group, Advanced Micro Devices Inc.

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 40

Berechnung der Transferfunktion auf der GPU

- Erinnerung: *parallel prefix sums* bzw. *summed area tables*

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 41

High-Dynamic Range Imaging in der Photographie

- Waren sogar zuerst da [Charles Wyckoff, 1930-40]
- Inzwischen alles in Photoshop & Co. integriert

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 42

Beispiele



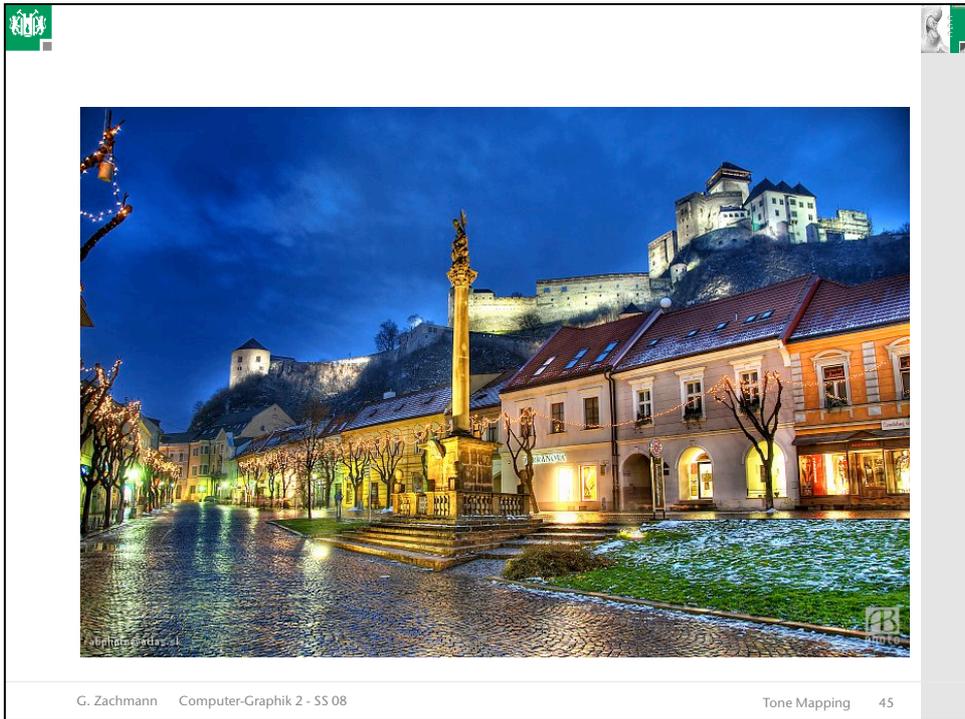
G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 43

This slide features a slide title 'Beispiele' in the top left corner. The main content is a large photograph of a cityscape taken from an elevated perspective during sunset. The sky is filled with large, dark, heavy clouds that are illuminated from below, creating a dramatic contrast with the bright orange and yellow light of the setting sun. The city below is partially obscured by a dense forest of green trees in the foreground. The buildings in the mid-ground are lit up, and the overall scene is captured with a high-contrast, cinematic quality.



G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Tone Mapping 44

This slide features a large photograph of a city skyline at night. The scene is dominated by numerous tall skyscrapers, many of which are brightly lit with white and yellow lights, creating a stark contrast against the dark night sky. The buildings are densely packed, and the lights from the windows and streetlights create a vibrant, glowing effect. The perspective is from an elevated position, looking down at the city streets and buildings. The overall atmosphere is one of a bustling, modern urban environment.



G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08

Tone Mapping 45