

# Interaktive Computergrafik

**Vorlesung im Sommersemester 2017**  
**Kapitel 5: HDR und Tone Mapping**

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



# Inhalt

- ▶ Dynamikumfang
- ▶ Tone Mapping:  
globale und lokale Operatoren
- ▶ (HDR-Aufnahme)
- ▶ (HDR-Displays)

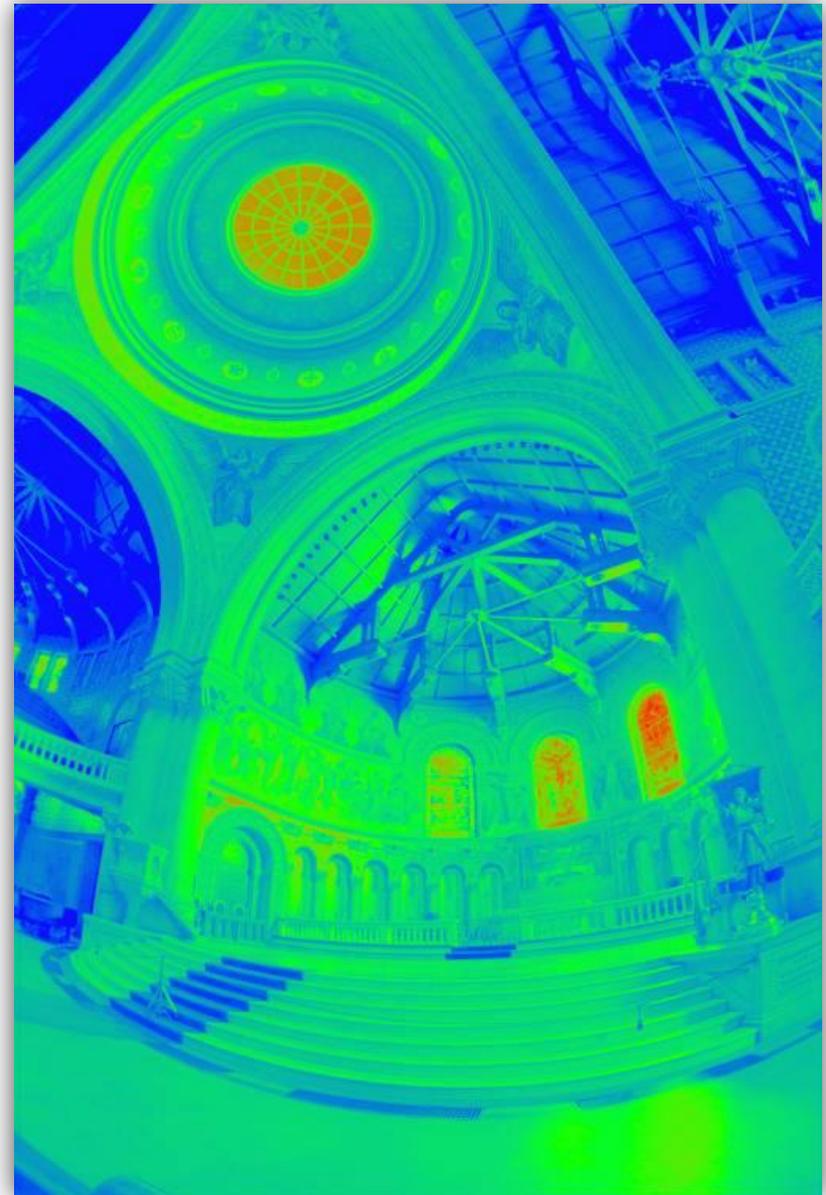


Bild: Paul Debevec

# Tone Mapping – Beispiel



## Dynamikumfang bei Displays

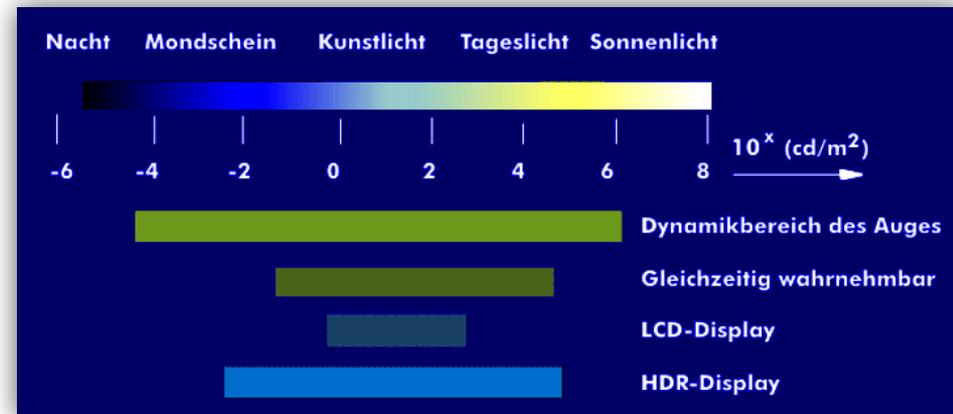
- ▶ ... beschreibt den erreichbaren Kontrast:  $R_d = \frac{I_{max}+k}{I_{min}+k}$
  
- ▶ Beispiele (Werte nur zur Orientierung):
  - ▶ LCD Bildschirm unter schlechten/guten Bedingungen 20:1 bis 100:1
  - ▶ (Foto-)Druck 30:1 bis 80:1
  - ▶ Film (Negative direkt betrachtet) 1000:1
  - ▶ High Dynamic Range Display 4000:1 oder mehr (vgl. neue TV-Standards, OLED-Bildschirme etc.)

# Dynamikumfang



- ▶ Low Dynamic Range (LDR): herkömmliche Bilder, z.B. 8 Bit pro Kanal
  - ▶ die Werte steuern z.B. die Helligkeit des Monitors bzw. Farbe des Druckes, die etwa 2 Größenordnungen abdecken
- ▶ High Dynamic Range (HDR): Bilder mit größerem Wertebereich pro Kanal
  - ▶ die menschliche Wahrnehmung deckt 10 Größenordnungen ab, nach Adaption des Auges noch 5 Größenordnungen!

| Lichtquelle     | Leuchtdichte<br>[lux = $\frac{\text{lm}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$ ] |
|-----------------|---|
| Sterne          | $< 10^{-3}$   |
| Mondlicht       | $< 10^{-1}$   |
| Raumbeleuchtung | $\sim 10^2$   |
| Sonnenlicht     | $> 10^5$  |
| LCD-Monitor     | $\sim 10^2$   |



# Dynamikkompensation, Tone Mapping



- ▶ selbst mit HDR Displays muss der Dynamikumfang für die Darstellung reduziert werden (Größenordnung 4000:1)
  - ▶ mit herkömmlichen Displays muss der Dynamikumfang weiter reduziert werden: Monitor 200:1, Druck 80:1, ...
- ▶ dazu dienen sogenannte **Tone Mapping** Verfahren
  - ▶ Abbilden des HDR-Bildes auf darstellbare Werte
  - ▶ „Komprimierung“ des dynamischen Bereichs
  - ▶ idealerweise unter Berücksichtigung der Eigenschaften der menschlichen Wahrnehmung wie z.B.
    - ▶ Adaption des Auges an die Umgebung
    - ▶ Kontrast-, Helligkeitwahrnehmung
    - ▶ Sichtbarkeit (Blendung, Schleier, Farbsehen, ...)
    - ▶ i.A. ergibt sich daraus eine nicht-lineare Abbildung, oft abhängig von der Umgebung eines Pixels

## Unterscheide Tone Mapping Verfahren nach Verwendung von ...

### ▶ ...globalen Operatoren

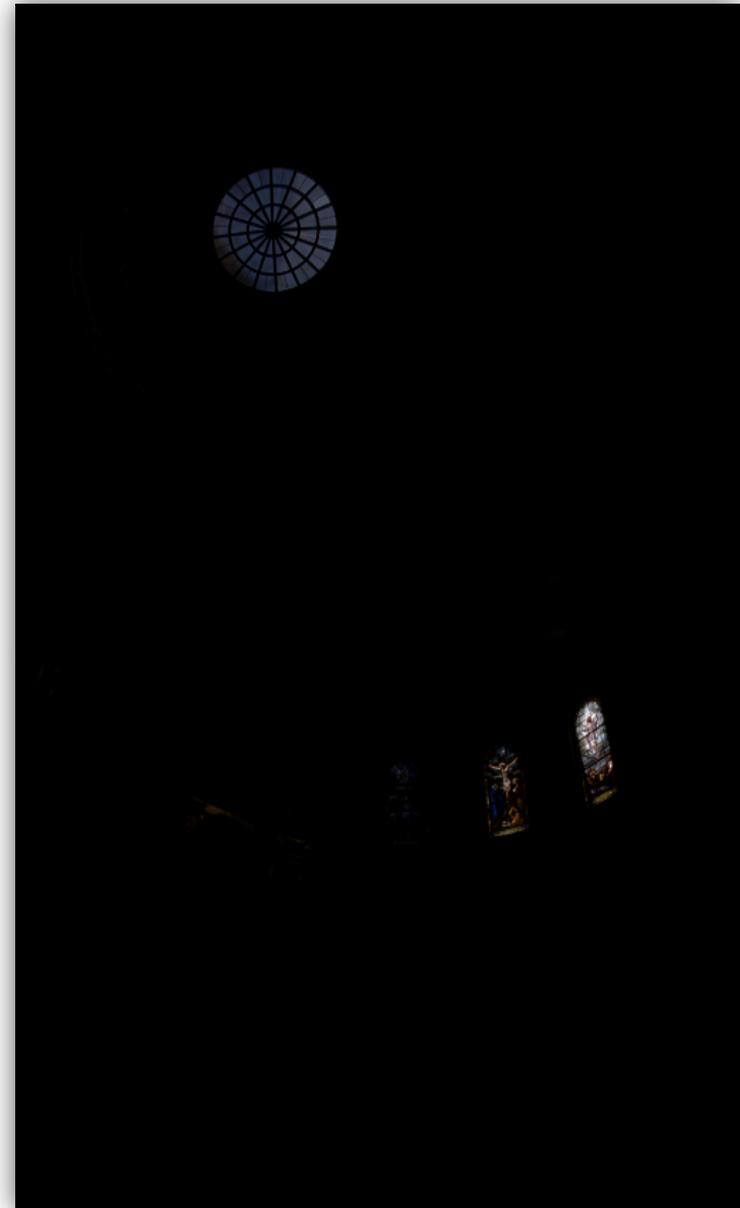
- ▶ basiert auf global ermittelten Bilddaten, z.B. minimale, maximale, durchschnittliche Luminanz
- ▶ verwendet **eine monotone Abbildung**, auf alle Pixel angewendet

### ▶ ...lokalen Operatoren

- ▶ zugrundeliegende Annahme: die menschliche Wahrnehmung passt sich auch lokal an (was auch der Fall ist)
- ▶ man erhält eine **Abbildung in Abhängigkeit von** der Pixel-Helligkeit und **der Nachbarschaft** (die also nicht monoton, gleich für alle Pixel, sein muss)

## Maximum to White

- ▶ trivialer (und genauso schlechter) globaler Operator
  - ▶ suche hellsten Pixel
  - ▶ skaliere Bild linear so, dass dieser Pixel auf maximale Helligkeit des Displays abgebildet wird
- ▶ Probleme
  - ▶  $100 \times$  helleres Licht, gleiches Resultat (gleiches Problem bei mittlerer Helligkeit)
  - ▶ ein einziger heller Pixel kann das ganze Bild verdunkeln



# Globales Tone Mapping

## Lineare Abbildung

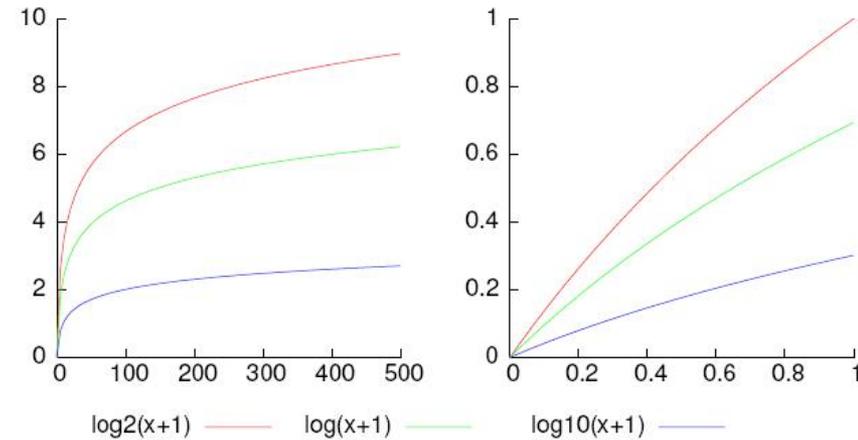
- ▶ das Eingabebild hat einen Kontrast von 10000:1, das Display ca. 100:1
- ▶ lineare Abbildung auf darstellbare Werte, zu helle Pixel gesättigte Werte



# Globales Tone Mapping

## Logarithmische Abbildung

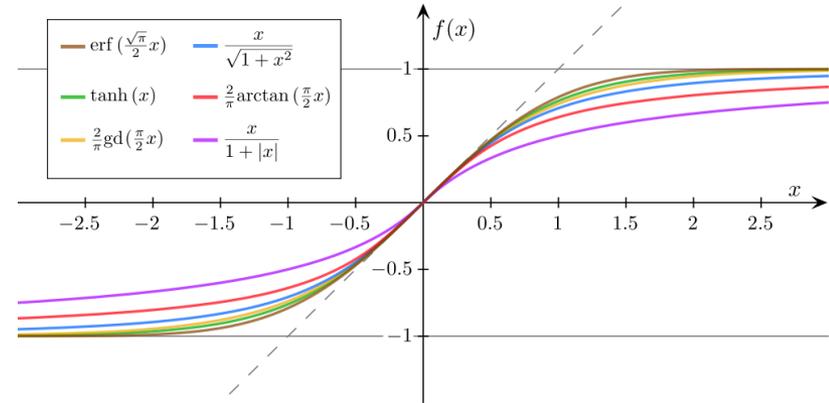
- ▶ Abbildung der Helligkeiten auf Pixelwerte durch eine logarithmische Funktion
- ▶ Nachempfinden der Schwärzungskurve eines Kamerafilms
- ▶ empirisch – welche Basis?
- ▶ Probleme: Details in hellen Bereichen verschwinden



# Globales Tone Mapping

## Sigmoidfunktionen

- ▶ die Neuronenaktivität aufgrund eines Reizes lässt sich mit einer Sigmoidfunktion beschreiben  
⇒ verwende diese für Tone Mapping



- ▶ z.B. Michaelis-Menten Funktion  $L_d = \frac{L^n}{L^n + \sigma^n}$
- ▶  $\sigma$  verschiebt Kurve links/rechts,  $n \approx 1$

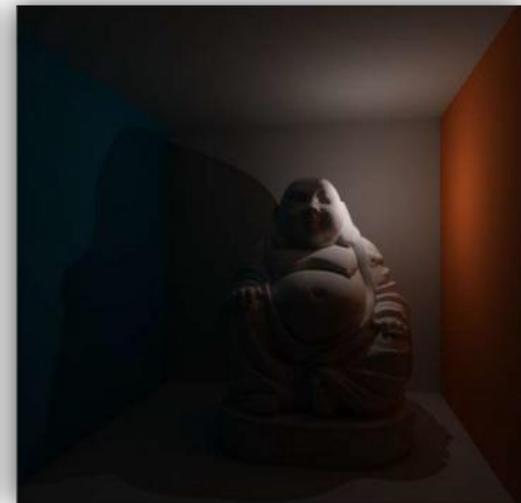
Bilder: Thorsten Grosch



$\sigma$  klein



$\sigma$  mittel



$\sigma$  groß

# Tone Mapping und Luminanz/Chrominanz

- ▶ es ist wichtig das Tone Mapping in einem Farbraum durchzuführen der Luminanz und Chrominanz trennt, z.B.  $xyY$
- ▶ sonst ändert eine **nicht-lineare** Abbildung auch den Farbton
- ▶ Beispiel:  $R = 1, G = 0.25, B = 0.0625$  und Abbildung  $t(x) = \sqrt{x}$ 
  - ▶  $\Rightarrow R' = 1, G' = 0.5, B' = 0.25$
  - ▶ die rote Primärfarbe dominiert den Farbton jetzt weniger

Bilder: Thorsten Grosch



Unabhängiges Tone Mapping für jeden RGB Farbkanal

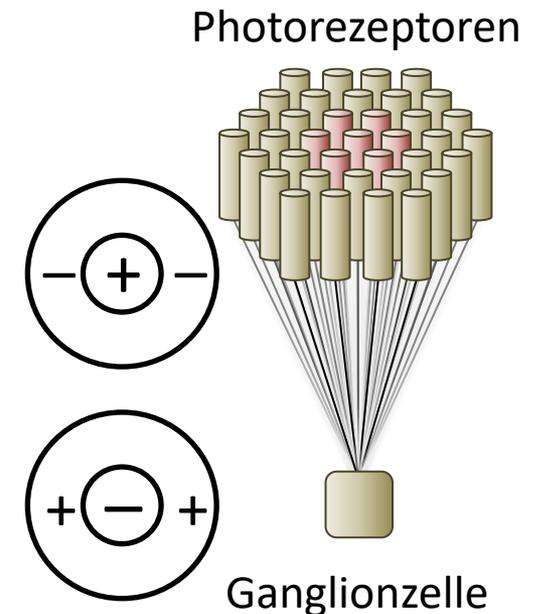


Tone Mapping nur auf Luminanz  
 $RGB \rightarrow xyY \rightarrow xyY' \rightarrow R'G'B'$

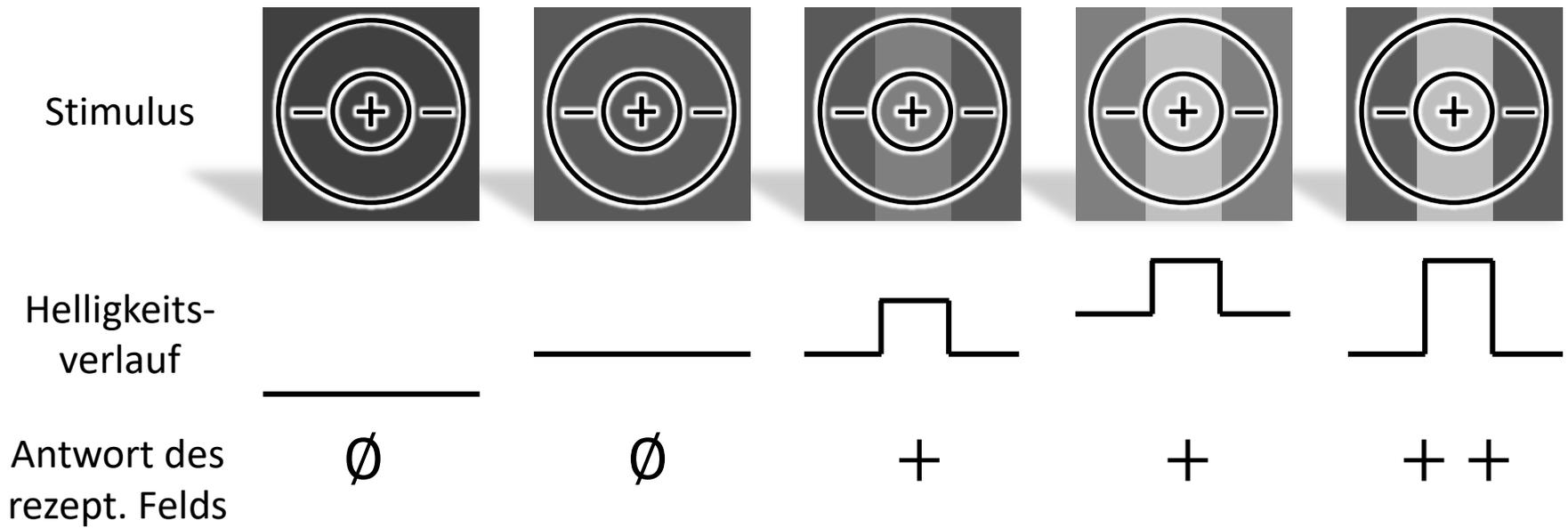
# Lokales Tone Mapping

## Rezeptive Felder

- ▶ warum lokale Operatoren? Vorverarbeitung im Auge ist ebenfalls lokal!
- ▶ Weiterleitung der Signale über ca. 1 Mio. Ganglienzellen (Nervenknoten)
  - ▶ Verschaltung der ca. 126 Mio. Photorezeptoren zu rezeptiven Feldern  
ON: Exzitation im Zentrum, Inhibition in der Peripherie  
OFF: Exzitation in der Peripherie, Inhibition im Zentrum
  - ▶ dieses Verschaltungsprinzip nennt man „laterale Inhibition“:  
Signale benachbarter Zellen hemmen  
Reizweiterleitung
- ▶ Verschaltung von Intensität oder Farbdifferenzen
- ▶ erkennen Kanten/Orientierung und Texturen

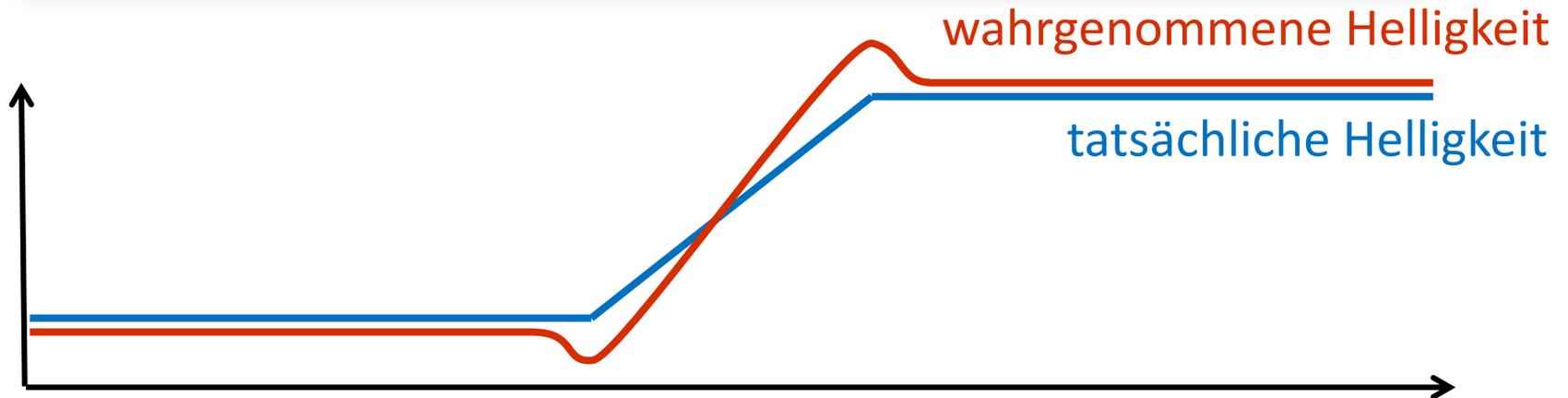
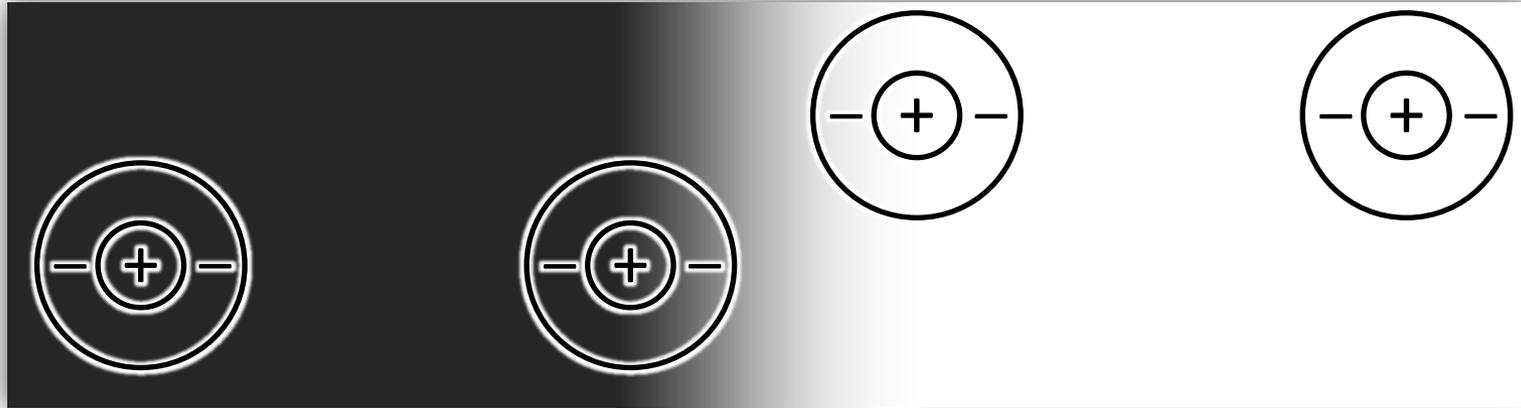


# Rezeptive Felder



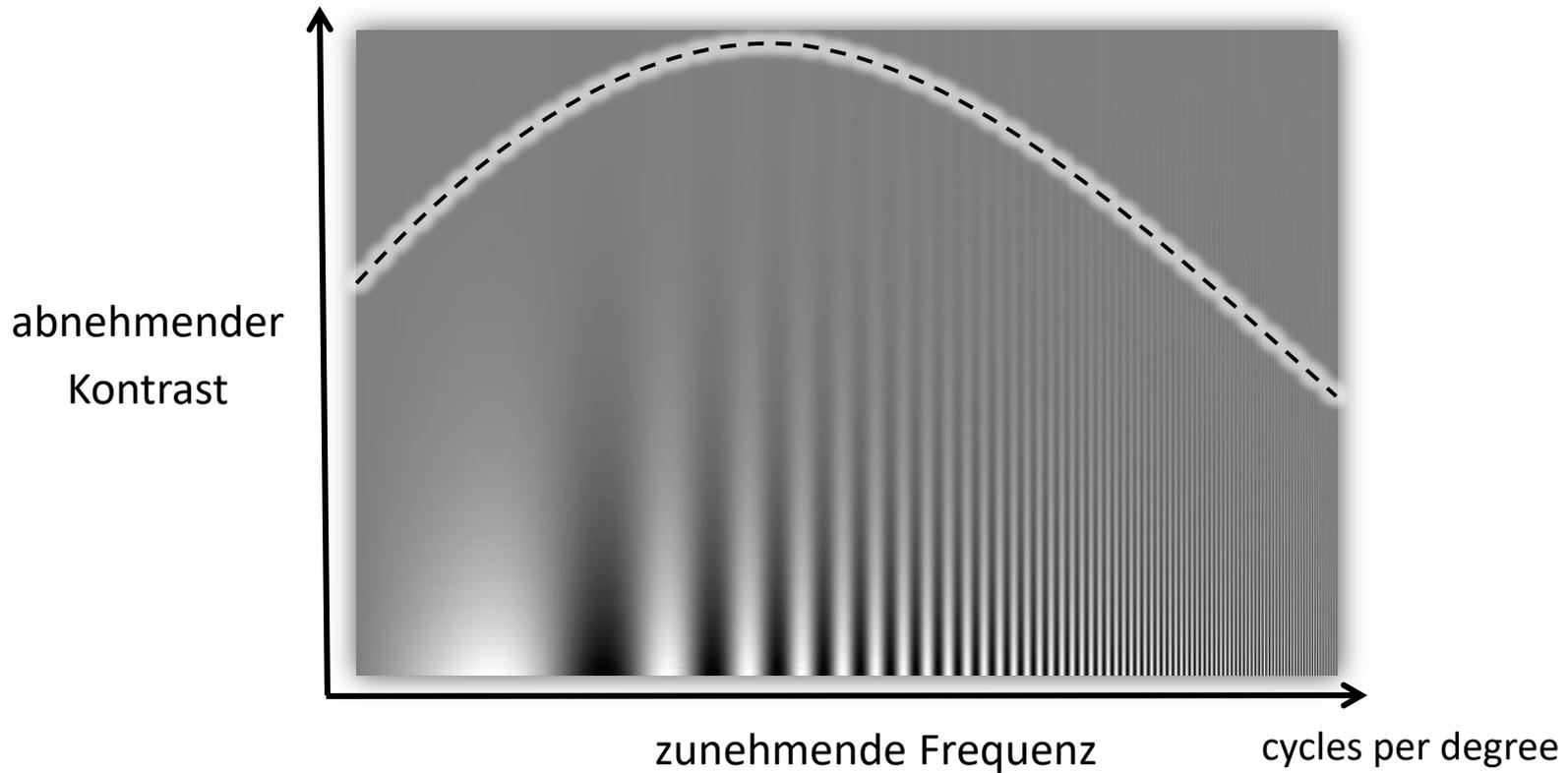
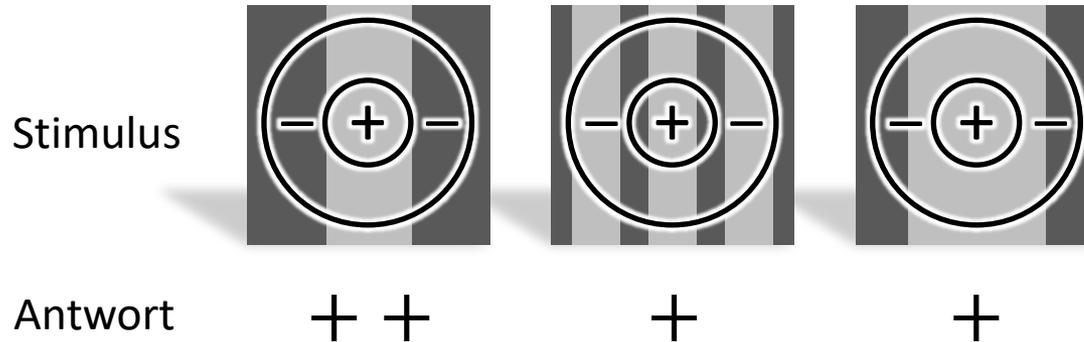
# Rezeptive Felder

## Kontrastverstärkung



# Rezeptive Felder

## Contrast Sensitivity Function (CSF)



# Tone Mapping: globale vs. lokale Operatoren



- ▶ das Eingabebild hat einen Kontrast von 10000:1, das Display ca. 100:1
- ▶ hier dargestellt: eine lineare Abbildung auf darstellbare Werte (zu helle Pixel haben gesättigte Werte)



# Naïve Technik: Gamma Kompression

- ▶ einfache (nicht lineare), globale Dynamikreduktion:
  - ▶  $X \rightarrow X^\gamma$ , z.B. mit  $\gamma = 0.5$
  - ▶ die Farben sind wieder ausgewaschen, weil keine Luminanz-Chrominanz-Trennung vorgenommen wurde



# Gamma Kompression der Luminanz



- ▶ durch Trennung erhalten wir die Farben, aber Details noch verwaschen
  - ▶ hier: Intensität  $I = (R + G + B)/3$  und Farbbild  $R' = R/I$ ,  $G' = G/I$ , ...
  - ▶ Ziel: wir wollen hohe Frequenzen in der Luminanz erhalten, aber in hellen Bereichen findet eine (zu) starke Kompression statt

Intensität



Gamma nur für Intensität

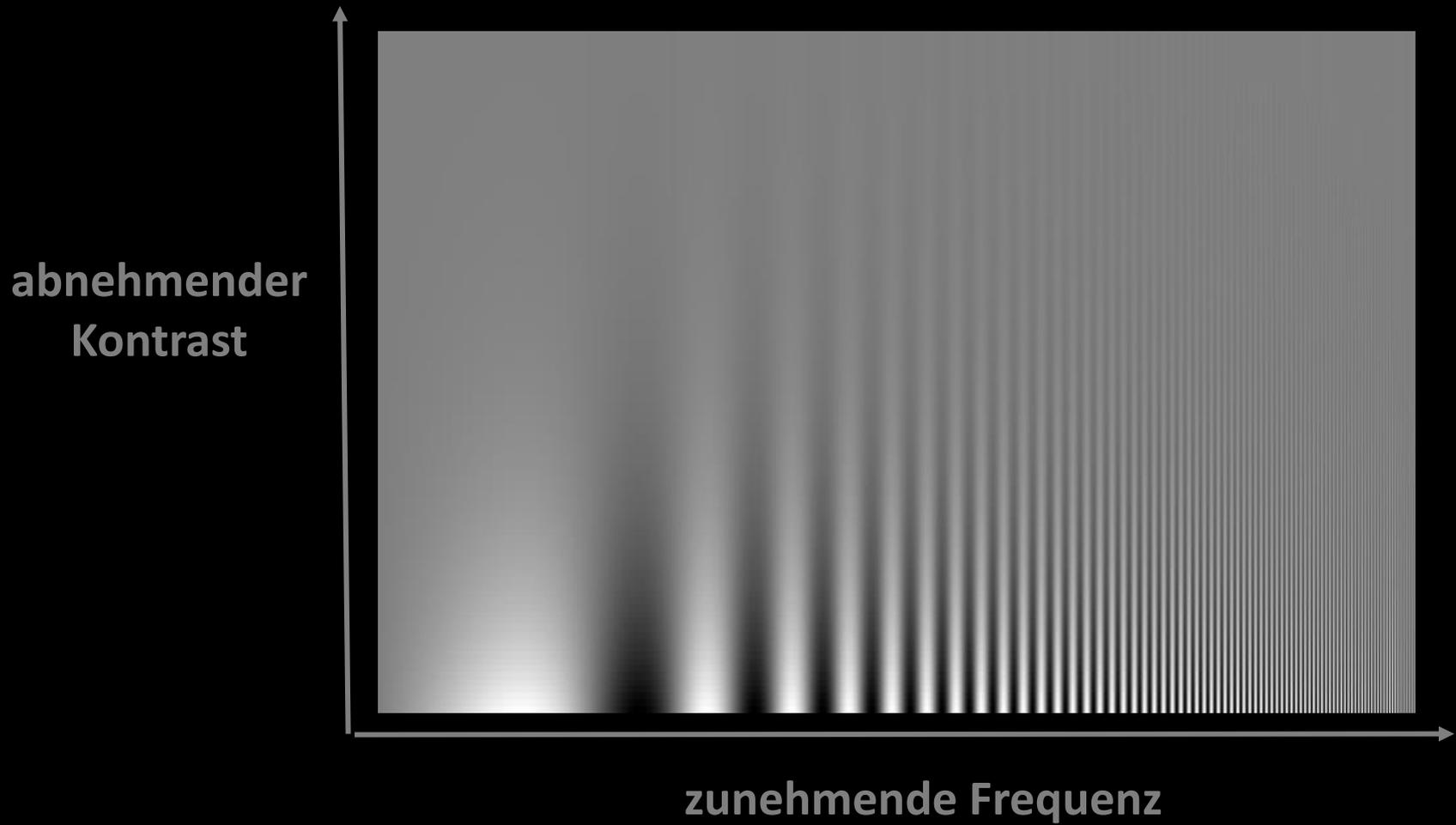


Farbe



# Contrast Sensitivity Function (CSF)

► Kontrastsensitivitätsfunktion für Luminanz



# Contrast Sensitivity Function (CSF)



## CSF der Luminanz und Chrominanz

- ▶ Luminanz:
  - ▶ geringe Sensitivität bei niedrigen Frequenzen
  - ▶ mittlere und etwas höhere Frequenzen sind wichtig
- ▶ Ansatz: reduziere Dynamikumfang durch verminderten Kontrast bei niedrigen Frequenzen *in der Luminanz*, Details in Chrominanz bleiben erhalten
- ▶ Abhängigkeit von Auflösung, Betrachterabstand (cpd)

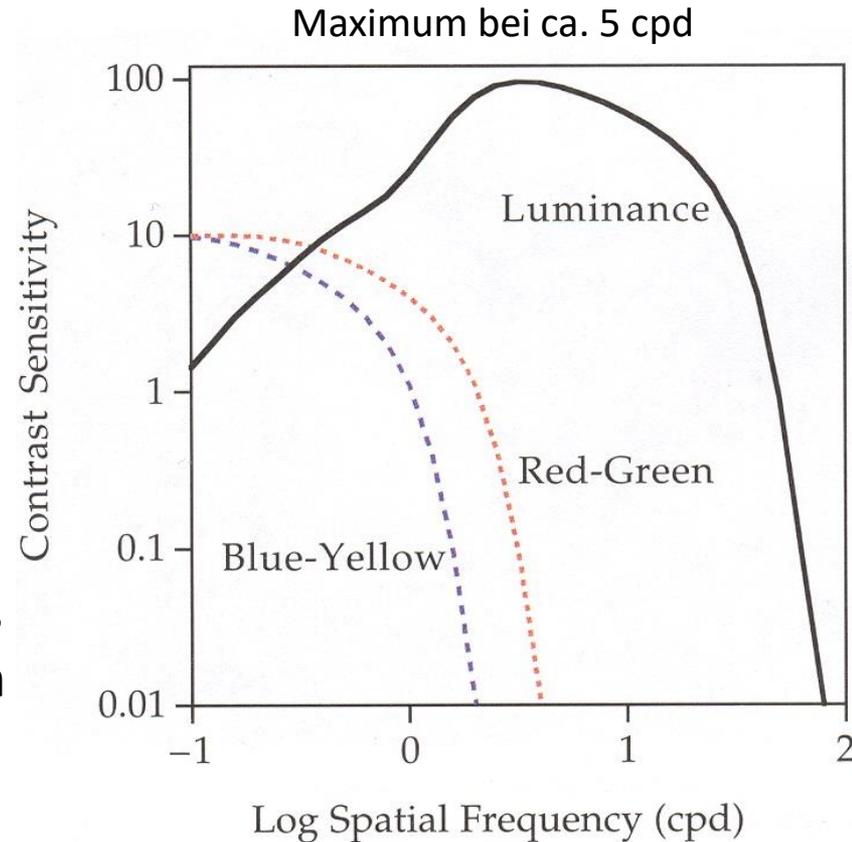
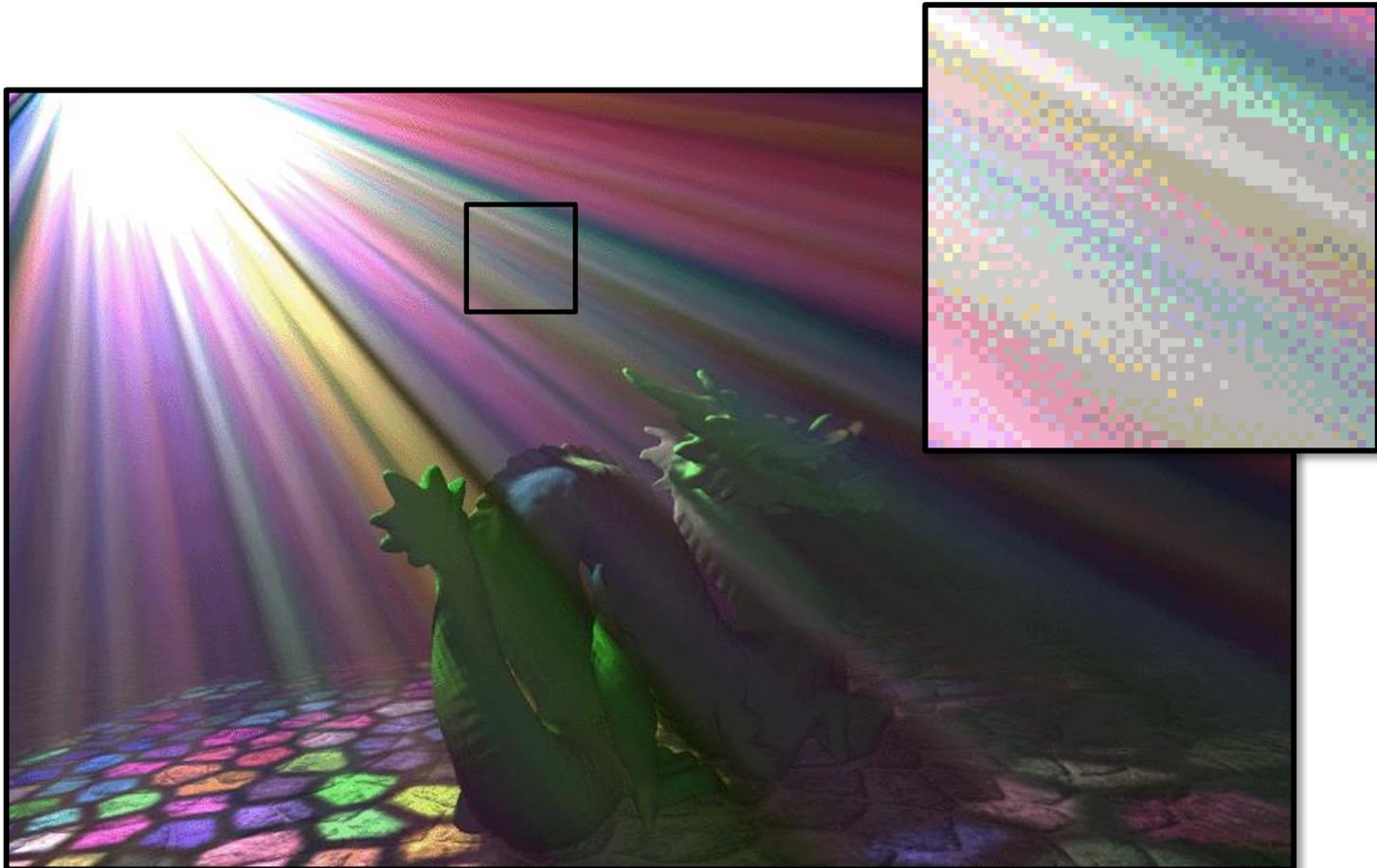


Figure 1-18. Spatial contrast sensitivity functions for luminance and chromatic contrast.

cpd=cycles per degree

# Randnotiz: Dithering

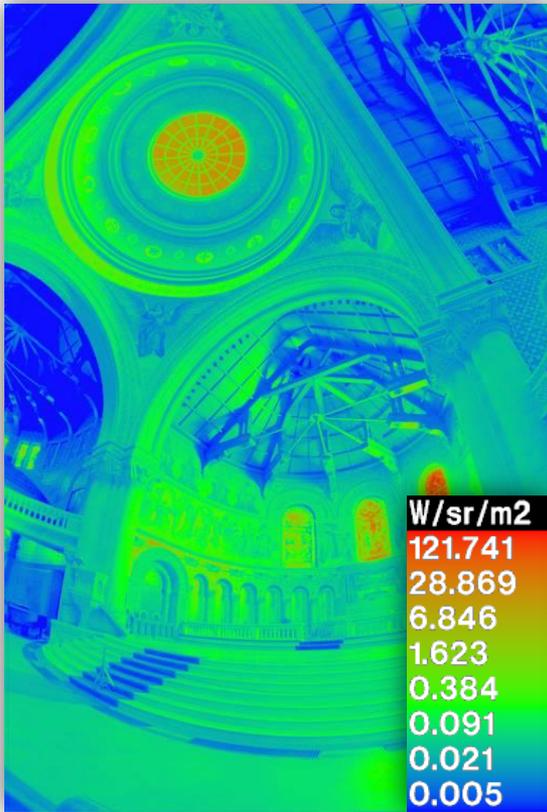
- ▶ Fehlerdiffusion (Dithering): fehlende Farben durch bestimmte Anordnung der verfügbaren Farben nachbilden
- ▶ geringe Sensitivität und räumliche Auflösung bei Chrominanz führen zu Wahrnehmung als Mischfarben



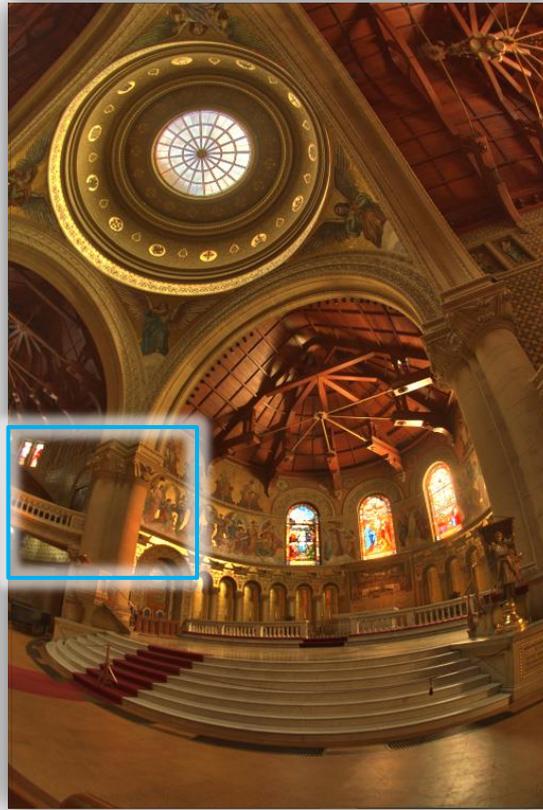
# Lokales Tone Mapping

## Grundidee

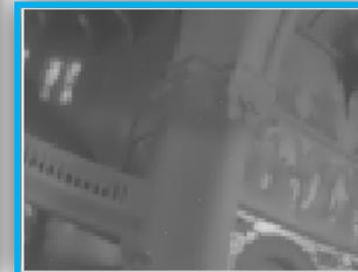
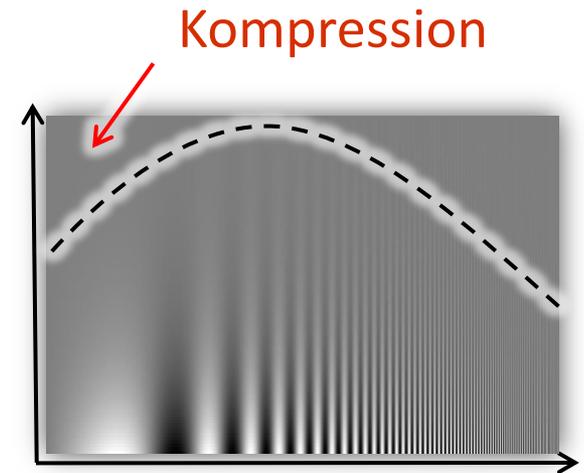
- ▶ trenne Luminanzsignal in großflächigen Verlauf und Details, reduziere Dynamikumfang in ersterem



Dynamic Range  
20000 : 1



Dynamic Range  
250 : 1



„large-scale“



„detail“

# Erster einfacher lokaler Tone Mapping Operator



- ▶ Kontrastreduktion nur bei niedrigen Frequenzen, höhere Frequenzen bleiben erhalten (nach Oppenheim 1968, Chiu et al. 1993)
- ▶ niederfrequentes Bild durch Faltung  $f'(x) = [g * f](x)$  mit einem Tiefpassfilter (z.B. Gauß-Filter)

Niederfreq.  $f'(x)$



Reduktion bei niedrigen Frequenzen, also  $f'(x)$



Hochfreq.  
 $f(x)/f'(x)$



Farbe



# Erster einfacher lokaler Tone Mapping Operator



- ▶ Probleme sind sog. Halo-Effekte an starken Kanten
  - ▶ an diesen Stellen enthält das Bild hohe Frequenzen/Sprünge
  - ▶ an diese Stellen müssen wir auch den Dynamikumfang reduzieren  
→ diese Kanten müssen mit in das entsprechende Teilbild!

Niederfreq.

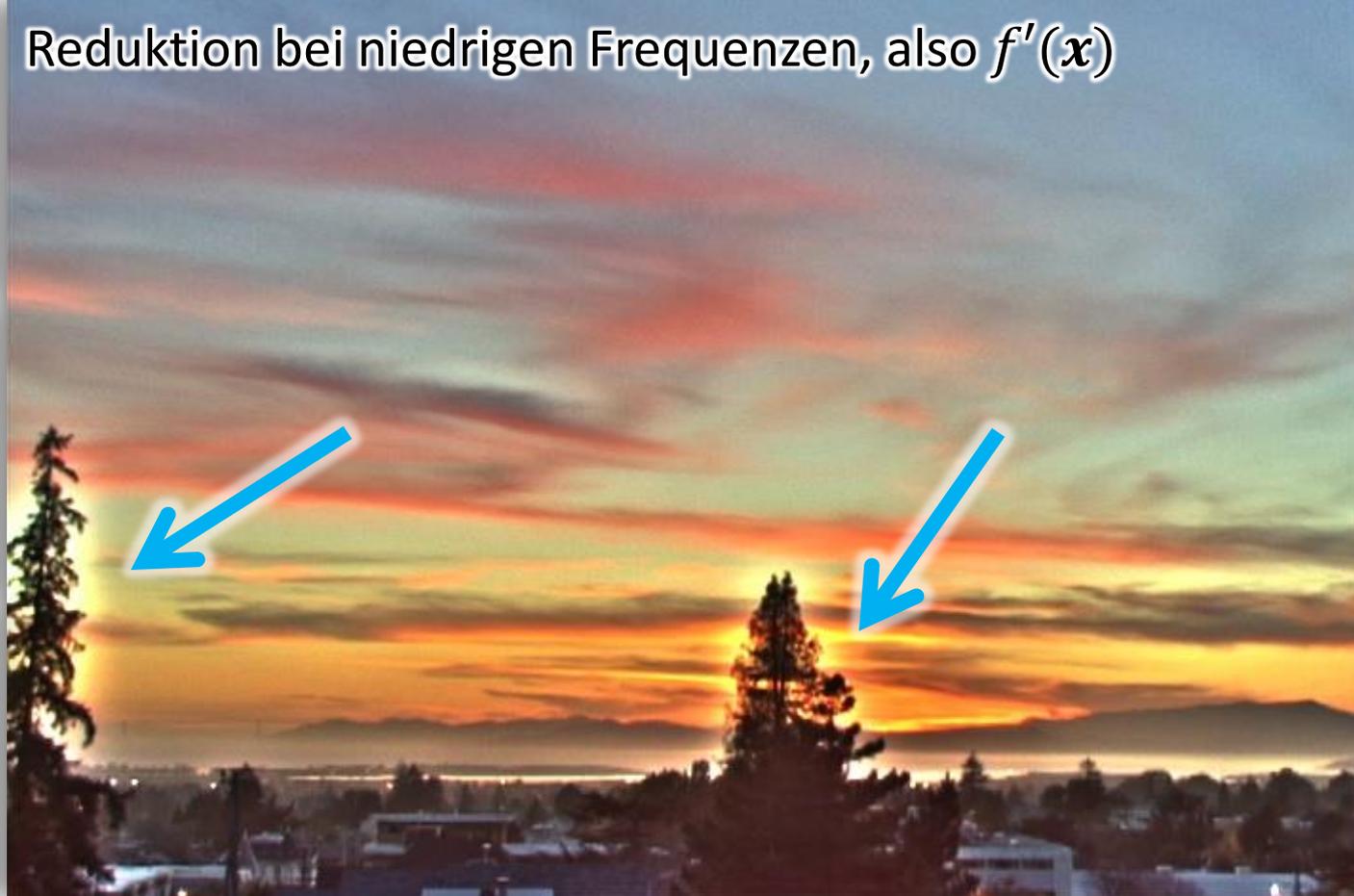


Reduktion bei niedrigen Frequenzen, also  $f'(x)$

Hochfreq.



Farbe



# Lokales Tone Mapping mit Bilateralem Filter

- ▶ Vermeidung von Halo-Artefakten: nehme Kanten in die Komponente auf, deren Dynamikumfang reduziert wird

Large-scale  $f'(x)$



Resultat



Detail  $f(x)/f'(x)$

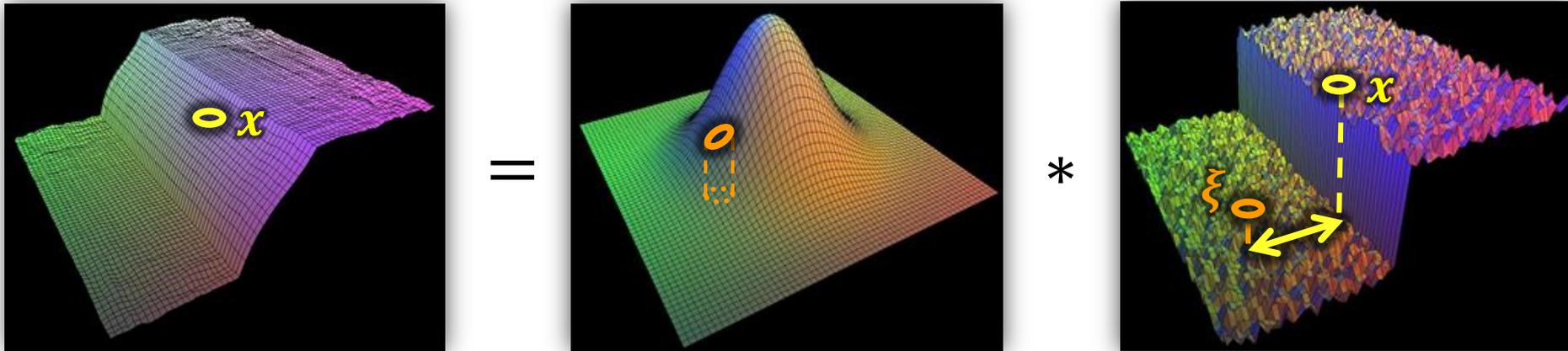


Farbe



# Hintergrund: Gauß-Filter

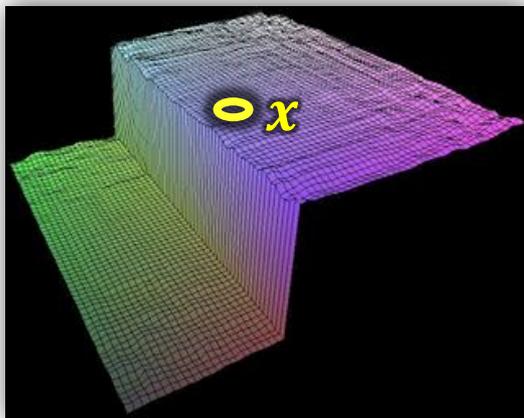
- ▶ Filterung eines 2D-Signals durch Faltung mit einer Gauß-Funktion
  - ▶ diskrete Faltung:  $[g * f](x) = \sum_{\xi} g(x, \xi) \cdot f(\xi)$
  - ▶ Gewicht des Wertes an der Stelle  $\xi$  wird nur durch den Abstand  $\|x - \xi\|$  bestimmt



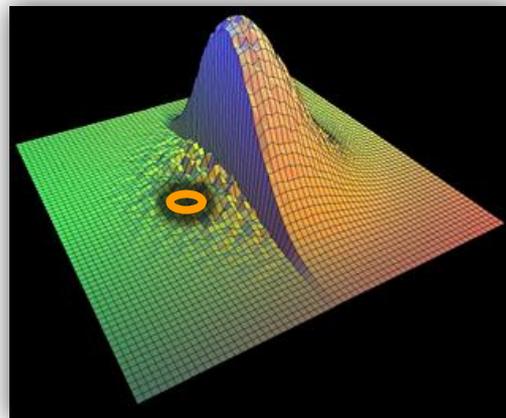
- ▶ wenn wir Details (= Kanten) erhalten wollen, macht es in diesem Beispiel wenig Sinn, den Wert  $f(\xi)$  für  $[g * f](x)$  zu berücksichtigen
- ▶ der Unterschied der Funktionswerte  $f(\xi)$  und  $f(x)$  ist „zu groß“

# Hintergrund: Bilateraler Filter

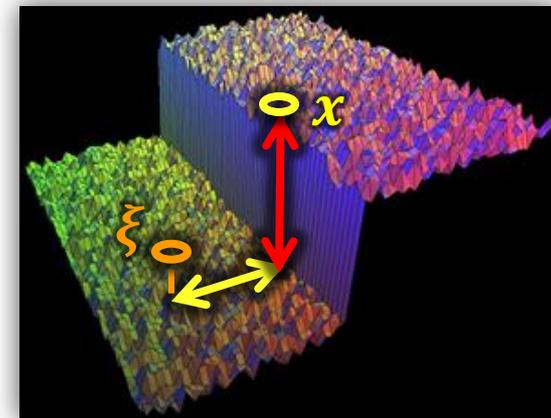
- ▶ Idee: große Differenzen der Werte führen zu kleineren Gewichten bei der Filterung (dann ist es keine echte Faltung mehr)
- ▶ führe eine Penalty-Funktion  $p(\cdot)$  der Intensitätsdifferenz ein [Tomasi and Manduchi 1998]
- ▶ **Bilateraler Filter:**  $f'(x) = \frac{1}{w(x)} \sum_{\xi} g(x, \xi) \cdot p(f(\xi) - f(x)) \cdot f(\xi)$ 
  - ▶ Gewicht des Wertes an der Stelle  $\xi$  wird
    - ▶ durch den Abstand  $\|x - \xi\|$  und
    - ▶ die Differenz der (Funktions-)Werte  $f(\xi) - f(x)$  bestimmt
  - ▶ Normalisierungsterm  $w(x) = \sum_{\xi} g(x, \xi) \cdot p(f(\xi) - f(x))$



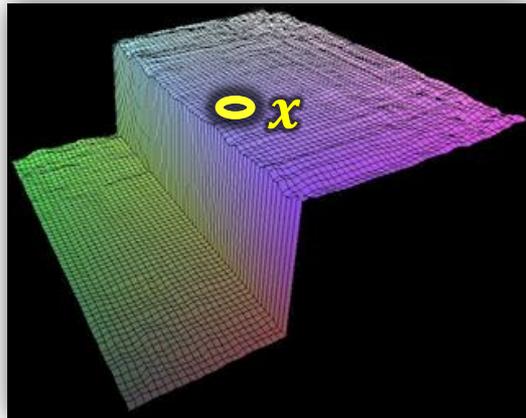
=



\*

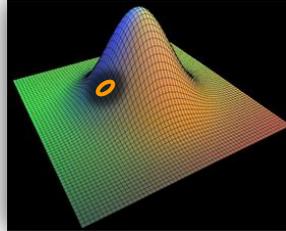


# Beispiel: Bilateraler Filter

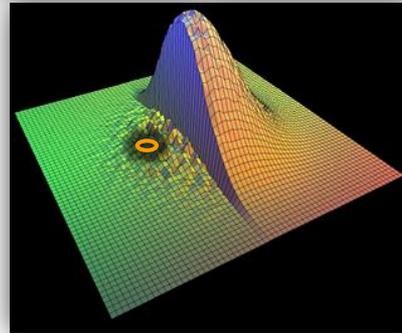
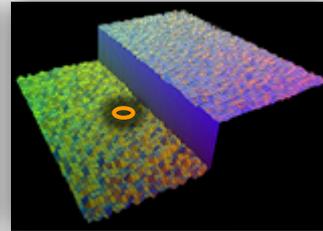


$f'(x)$

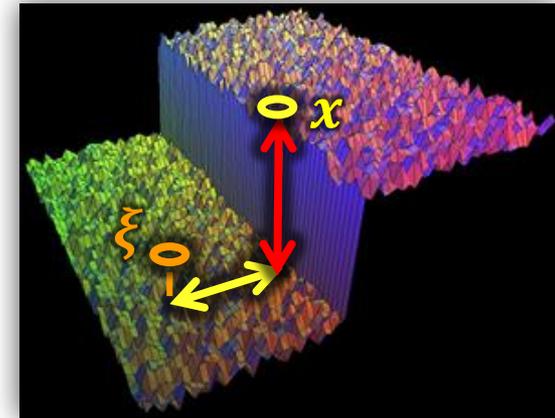
$$g(x, \xi)$$



$$p(f(\xi) - f(x))$$



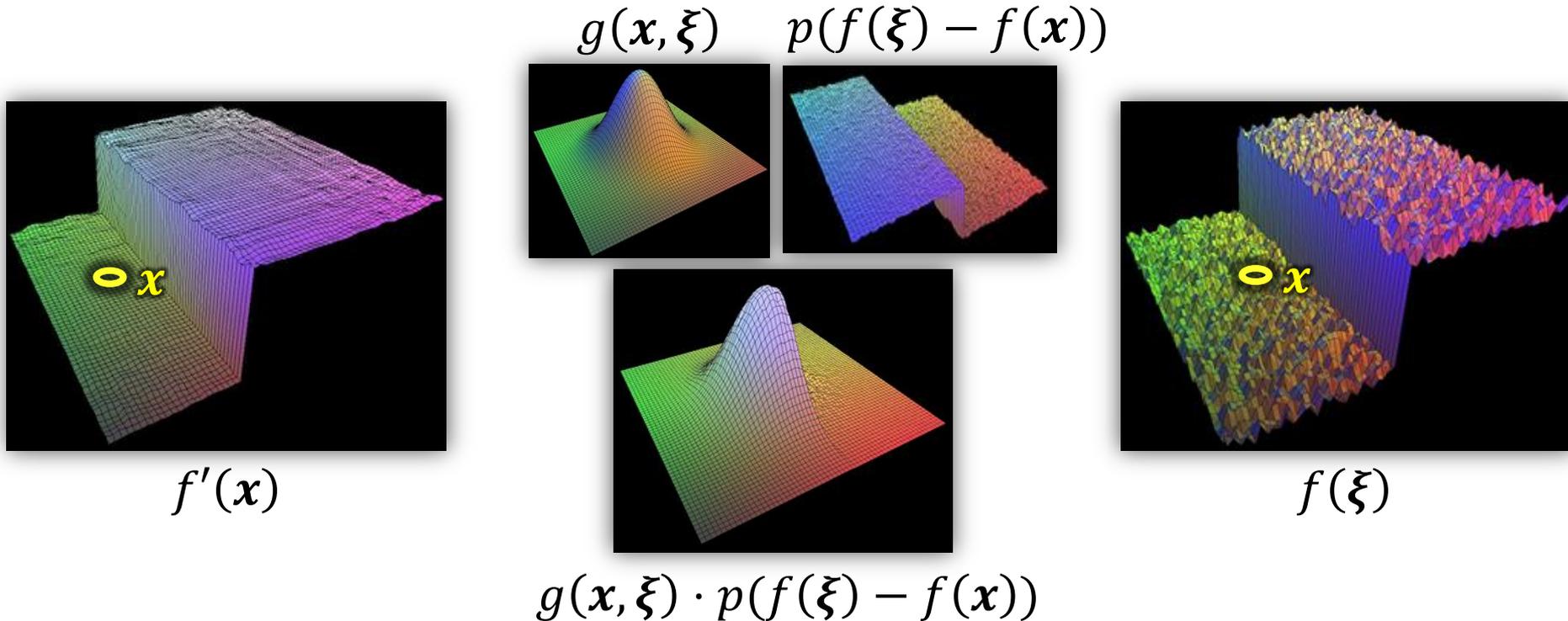
$$g(x, \xi) \cdot p(f(\xi) - f(x))$$



$f(\xi)$

# Beispiel: Bilateraler Filter

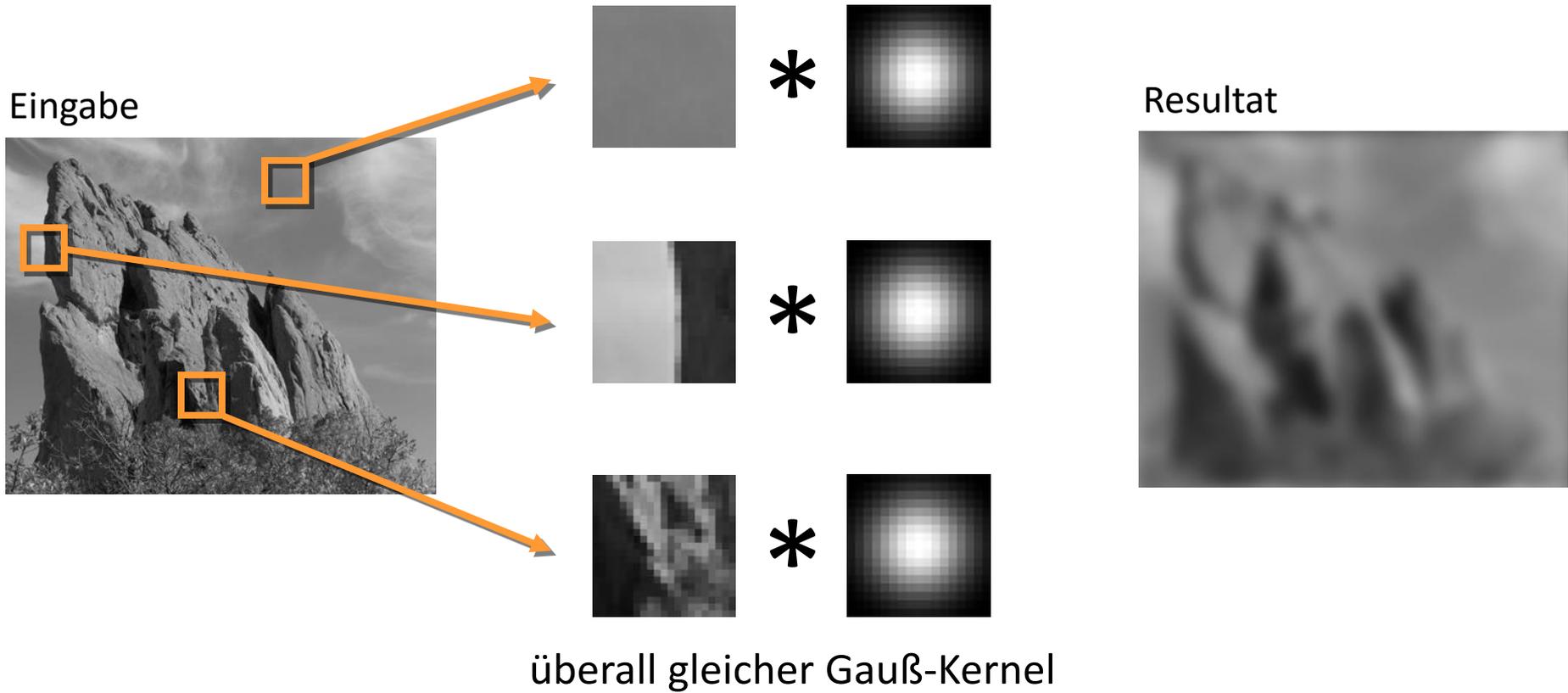
- ▶ die Gewichte sind für jede Stelle  $x$  unterschiedlich



- ▶ eine alternative Vorstellung des bilateralen Filters: man betrachtet dreidimensionale Abstände (3. Dimension ist der Funktionswert)

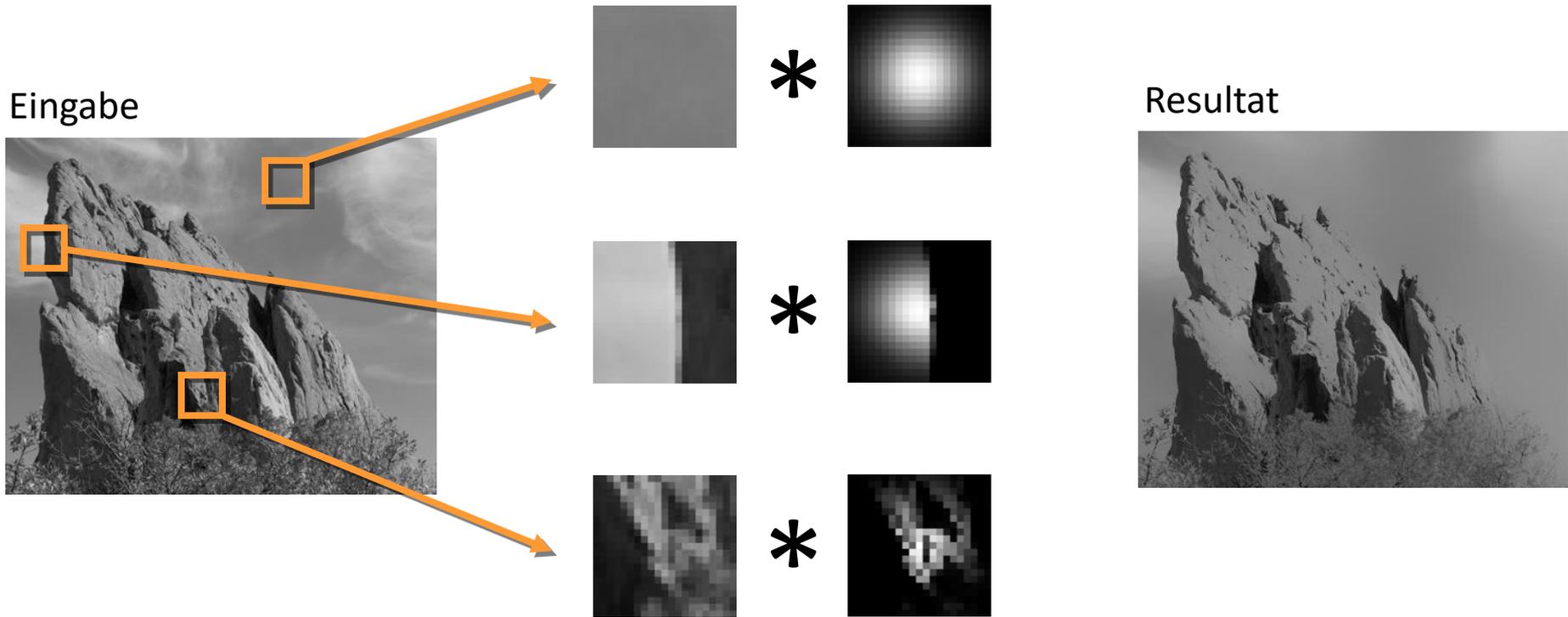
# Beispiele: Gauß vs. Bilateral Filter

▶ Faltung mit einer Gauß-Funktion



# Beispiele: Gauß vs. Bilateral Filter

- ▶ beim bilateralen Filter bleiben Kanten erhalten



Kernel hängt vom Bildinhalt und somit von der Position des Pixels im Bild ab

# Lokales Tone Mapping mit Bilateralem Filter

- ▶ der bilaterale Filter kann eingesetzt werden, um Änderungen der Helligkeit im Detail und großflächige Änderungen zu trennen

- ▶ 
$$f'(x) = \frac{1}{w(x)} \sum_{\xi} g(x, \xi) \cdot p(f(\xi) - f(x)) \cdot f(\xi)$$

Large-scale  $f'(x)$



Detail  $f(x)/f'(x)$



Farbe



Resultat



# Gamma Kompression der Luminanz

▶ ... nochmal zum Vergleich ...

Intensität



Gamma nur für Intensität



Farbe



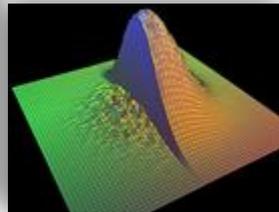
# Lokales Tone Mapping mit Bilateralem Filter



HDR Bild



Intensität



Bilateraler Filter



Large scale



Detail



Kontrastreduktion



Detail erhalten!



Resultat



Farbe



Farbe

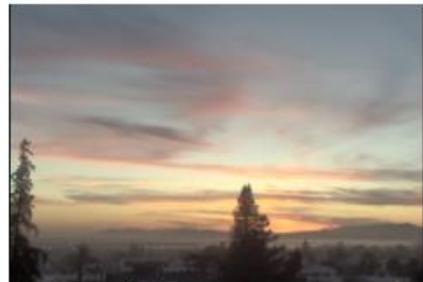
# Welcher Operator funktioniert besser?



Our operator

Bilateral filtering

Trilateral filtering



Histogram adjustment



Photographic tonemapping (global)



Photographic tonemapping (local)



Logarithmic mapping



Adaptive logarithmic mapping



Ashikhmin's operator



Time-dependent adaptation



Revised Tumblin-Rushmeier



Uniform rational quantization

Image data courtesy of Paul Debevec

# Tone Mapping Evaluation



- ▶ Evaluation erfolgt typischerweise durch Benutzerstudien
  - ▶ Ledda et al. 2005  
[http://www.cs.bris.ac.uk/Publications/pub\\_master.jsp?id=2000255](http://www.cs.bris.ac.uk/Publications/pub_master.jsp?id=2000255)
  - ▶ Kuang et al. 2004  
<http://www.cis.rit.edu/fairchild/PDFs/PRO22.pdf>
  
- ▶ ein und dasselbe Verfahren wurde auch schon als bestes und schlechtestes Verfahren bewertet
  - ▶ Grund sind auch unterschiedliche Kriterien, z.B. Wiedergabetreue vs. Präferenz
  
- ▶ Implementationen:
  - ▶ <http://www.mpi-sb.mpg.de/resources/pfstools/>
  - ▶ <http://scanline.ca/exrtools/>
  - ▶ <http://www.cs.utah.edu/~reinhard/cdrom/source.html>
  - ▶ <http://www.cis.rit.edu/mcsl/icam/hdr/>

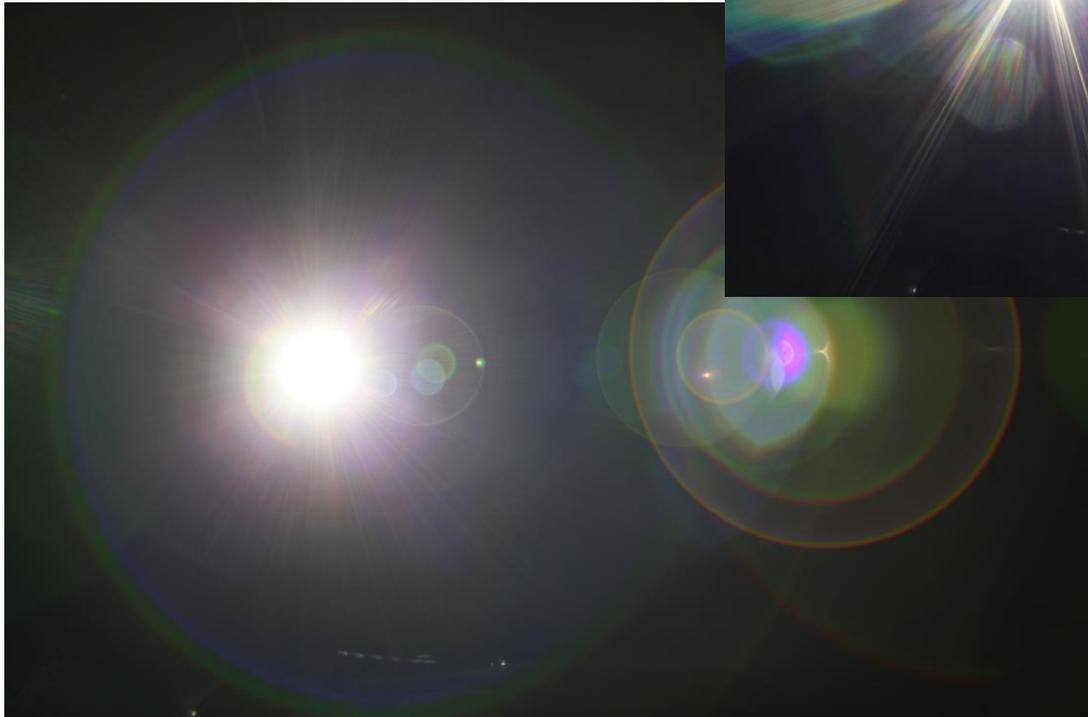
# Fazit – Tone Mapping



- ▶ globale Operatoren (häufig verwendet)
  - ▶ Vorteil: schnell zu berechnen
  - ▶ Nachteil: oft Verlust an Details
  
- ▶ lokale Operatoren (in der Praxis wenig relevant)
  - ▶ Hauptunterschiede: wie wird die Nachbarschaft eines Pixels einbezogen?
  - ▶ typische Probleme: Haloing und Filtergröße (der Ansatz ist richtig, die Parametersuche schwierig)
  
- ▶ ein wichtiger Effekt ist die temporale Adaption des Auges, einfache Umsetzung als globaler Operator:
  - ▶ bestimme mittlere Luminanz des aktuellen Bildes
  - ▶ berechne über die Zeit geglättete Luminanzwerte für Tone Mapping
  - ▶ meist kombiniert mit Blooming

# Tone Mapping und Post Processing

- ▶ Tone Mapping oft kombiniert mit weiteren Post-Processing Schritten
  - ▶ Blooming, Bokeh, ...
  - ▶ Lens Flares
  - ▶ Color Grading  
(v.a. in Videospiele  
und Filmproduktionen)



Bilder: Physically-Based Real-Time  
Lens Flare Rendering, Hullin et al.

# Color Grading

▶ ein weitere Post-Processing Schritt...



# Verwandte Forschung

- ▶ Beispiel: Example-Based Video Color Grading (Bonnell et al.)

<http://people.seas.harvard.edu/~nbonneel/videostyle.pdf>



(a) Color graded input video frame

(b) Re-graded to “D.O.A”

(c) Re-graded to “300”

(d) Re-graded to “Amélie”

# Temporal Glare (Bsp. für weitere perzeptive Effekte)

- ▶ Temporal Glare: Real-Time Dynamic Simulation of the Scattering in the Human Eye, Ritschel et al., Computer Graphics Forum

