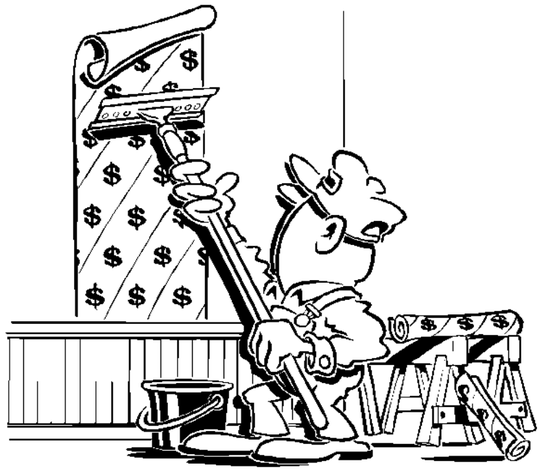
Computer-Graphik I

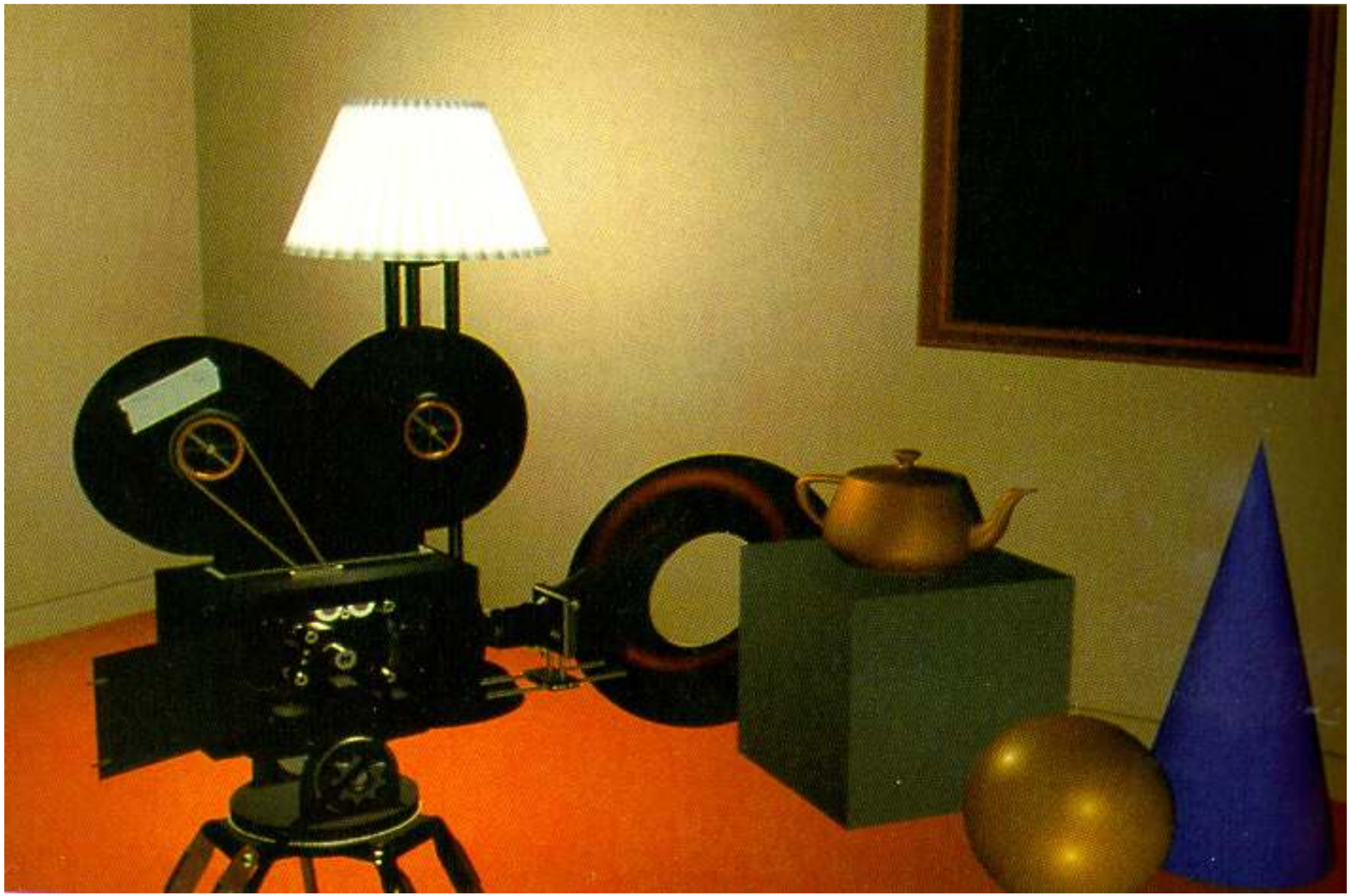
Texturierung



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

Motivation

Was fehlt?



"Shutter bug", Pixar

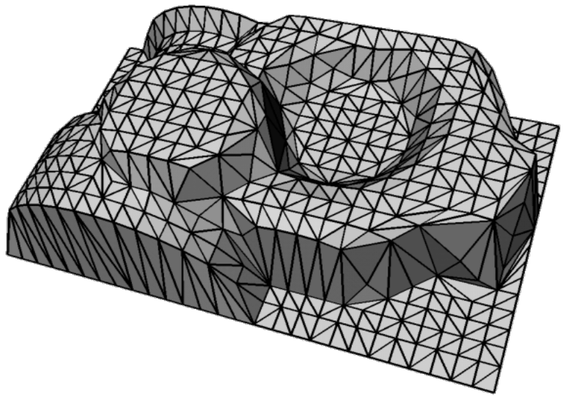
Oberflächendetails

"Shutter bug", Pixar

- Großes Spektrum geometrischer Formen und physikalischer Materialien:
  - Strukturen unebener Oberflächen, z.B. Putzwände, Leder, Schale/Rinde von Orangen, Baumstämme, Maserungen in Holz und Marmor, Tapeten mit Muster, etc.
  - Wolken
  - Objekte im Hintergrund (Häuser, Maschinen, Pflanzen und Personen)
- Solche Objekte durch Flächen nachzubilden ist in der Regel viel zu aufwendig

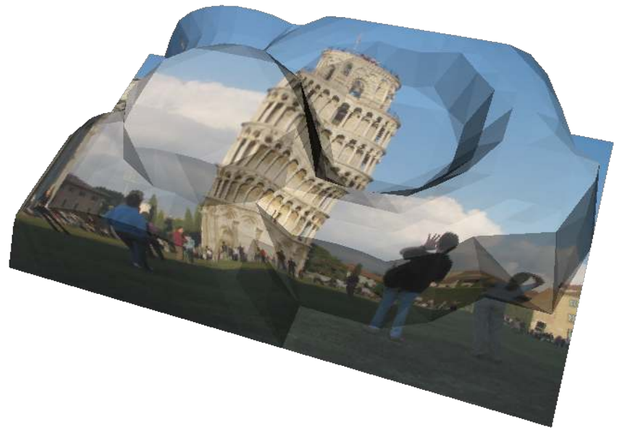
Grundidee der Texturierung

- Ziel: Visuelles Detail trotz grober Geometrie
- Idee: Objekt (grobe Shape) mit Textur (visuelles Detail) "tapezieren"

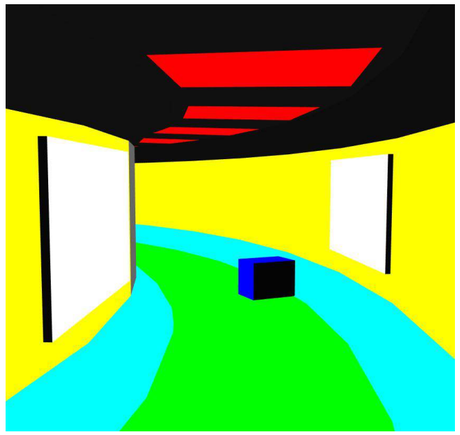


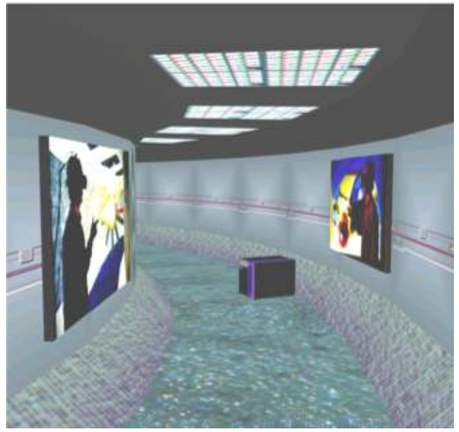
Objekt (Geometrie)

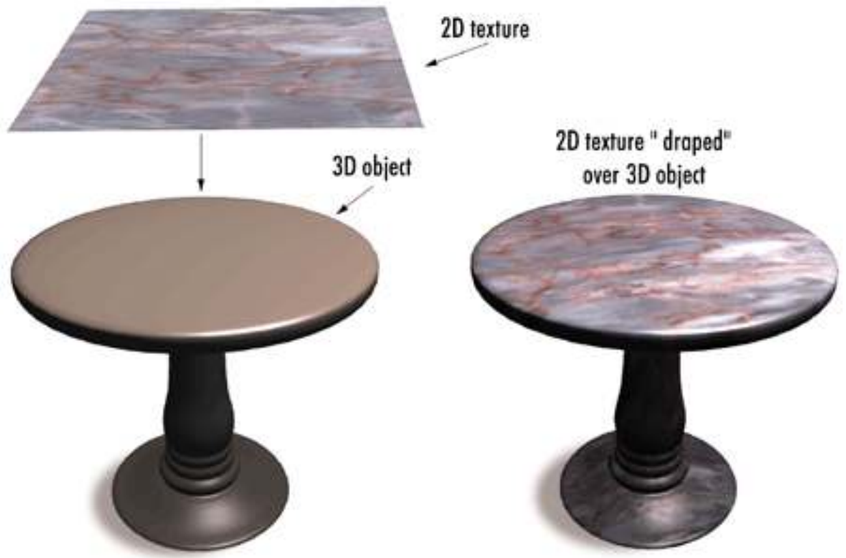
Textur (Farbe)

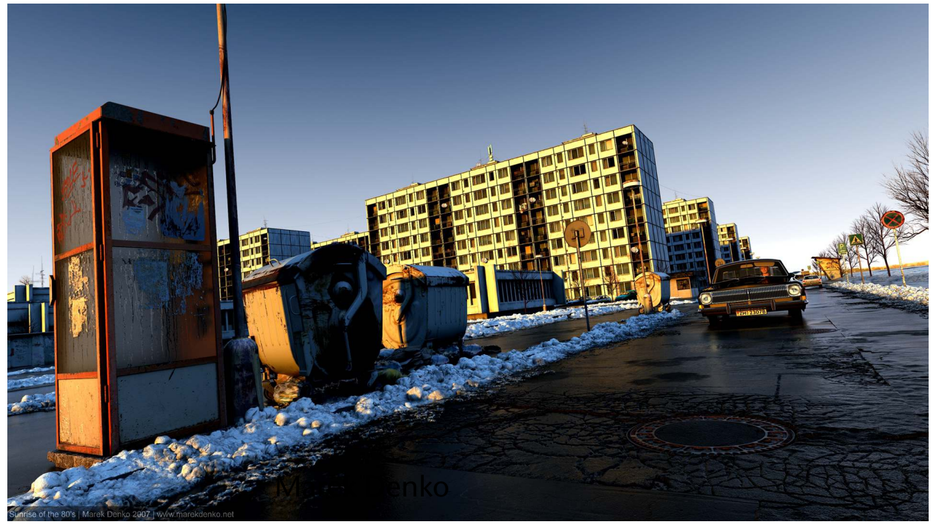


Weitere Beispiele









Eine "Kaustik-Textur" verstärkt den Unterwassereindruck

Übersicht

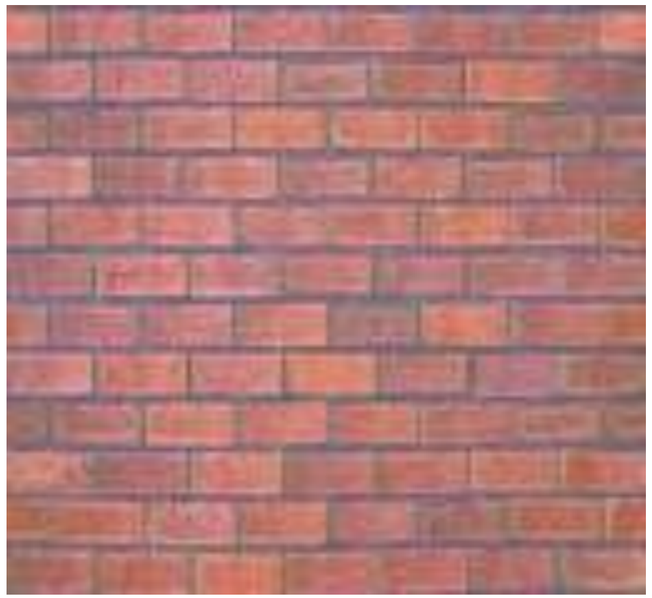
- Kategorien von Texturen: diskret oder prozedural
- Dimension der Texturen: 1D, 2D, 3D, (4D)
- Wichtige Punkte bei den diskreten 2D-Texturen:
  1. Interpolation der Texturkoordinaten
  2. Anwendung der Textur auf die Beleuchtung o. a. Oberflächeneigensch.
  3. Parametrisierung der Fläche
  4. Filterung
- Wie funktioniert es in OpenGL
- Environment-Mapping

Texturen kommen in verschiedenen Dimensionen

- Textur kann als Funktion einer, zweier oder dreier Koordinaten, oder als Funktion einer Richtung gesehen werden:

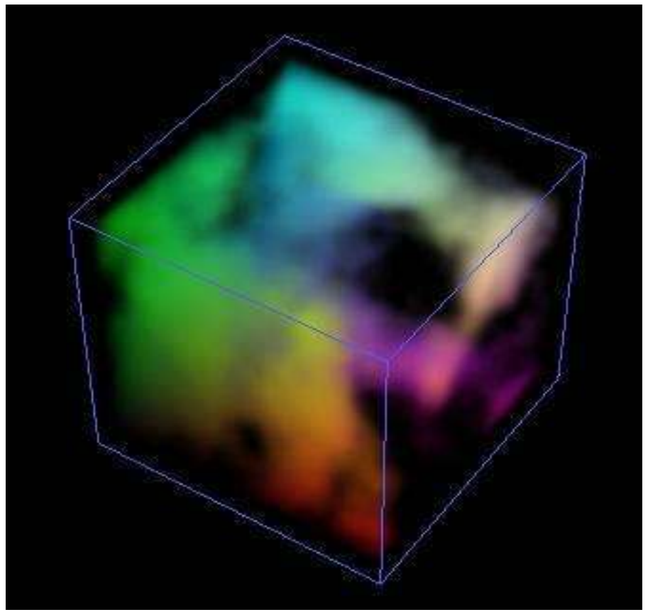
1D Textur

2D Textur



Cubemap Texturen

3D Textur



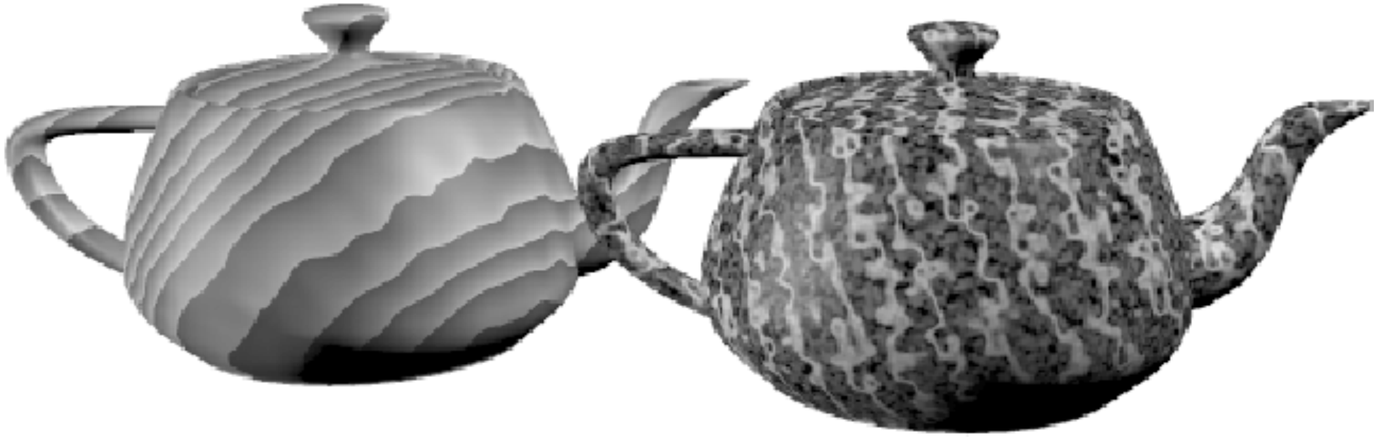
Einfacher Fall: 3D-Texturen

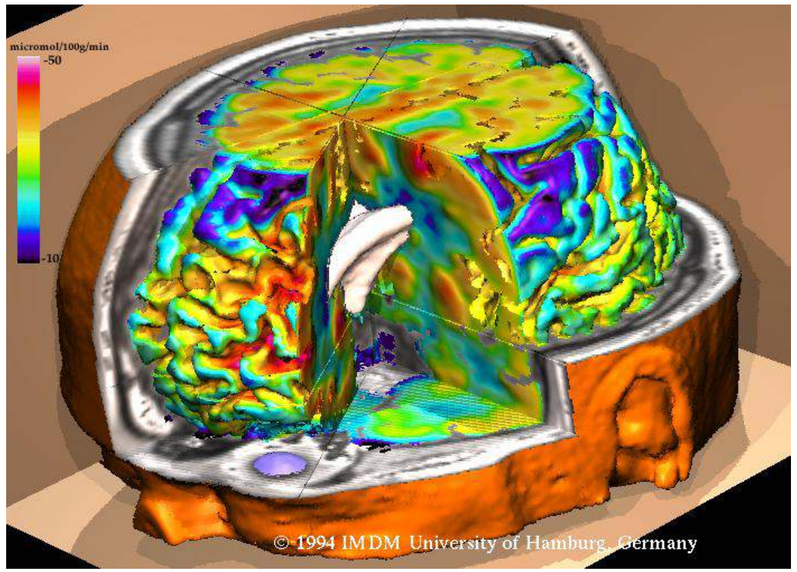
- Die lokalen Koordinaten der Objekt-Oberfläche (*x,y,z*) indizieren direkt die Textur:

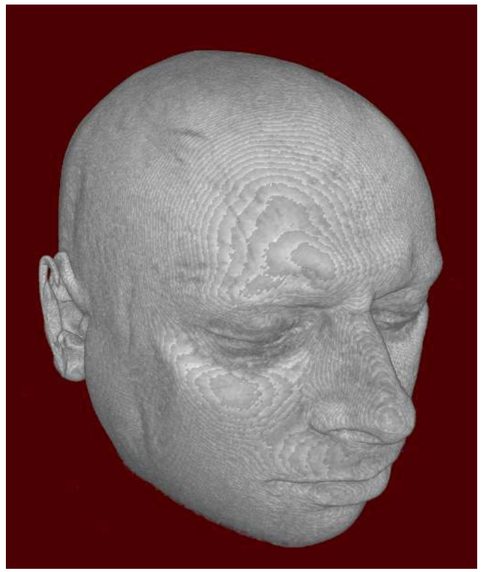
$$(r, g, b) = C_{\text{tex}}(x, y, z)$$

- Die Textur ist also an jedem Punkt im Raum definiert (theoretisch)
- Das Objekt wird quasi aus dem Texturvolumen "herausgeschnitzt"
- 3D-Texturen nennt man auch Festkörper-Texturen (z.B. Holz und Marmor) *("solid texture")*

Beispiele




micromol/100g/min
-50
-10
© 1994 IMDM University of Hamburg, Germany



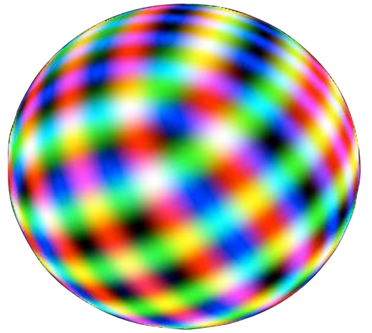
Diskrete und prozedurale Texturen

- Eine diskrete 3D-Textur = 3-dimensionales Array C[u,v,w]
  - C[u,v,w] = Vektor mit 3 Farbkomponenten = ein "Texel" (*tex*ture *el*ement)
  - Pro Pixel benötigt man 3 Texturkoordinaten (*u,v,w*) zum Indizieren in das Array
- Prozedurale Texturen werden an jeder Stelle im Raum aus einer mathematischen Funktion oder einem Algorithmus berechnet:

$$C_{tex}(x, y, z) := f(x, y, z)$$

- Einfaches Beispiel für eine prozedurale 3D-Textur:

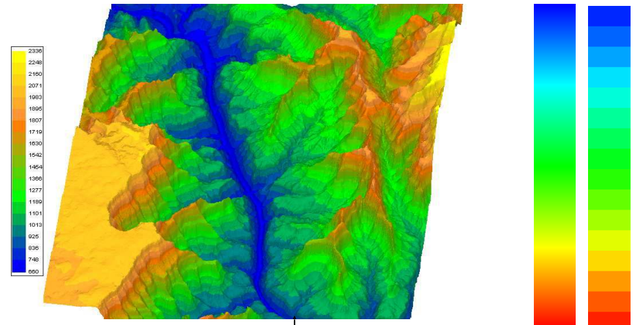
$$C = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(1 + \sin(\frac{\pi}{w_x} P_x)) \\ \frac{1}{2}(1 + \sin(\frac{\pi}{w_y} P_y)) \\ \frac{1}{2}(1 + \sin(\frac{\pi}{w_z} P_z)) \end{pmatrix}$$



- Vorteile der prozeduralen Texturen:
  - Speicheraufwand ist minimal
  - Texturwerte können an jeder Stelle (u,v), bzw. (x,y,z) berechnet werden
  - Texturen sind im gesamten Raum definiert (kein Wrap-Around / Clamping)
  - Optimale Genauigkeit (kein Runden von Koordinaten, keine Interpolation)
- Nachteile:
  - Schwer zu erzeugen (selbst für Experten)
  - Mindestens Grundkenntnisse der Fourier-Synthese, bzw. fraktaler Geometrie erforderlich
  - Komplexere Texturen sind nahezu unmöglich
  - Kosten rel. viel Zeit (Echtzeit?)

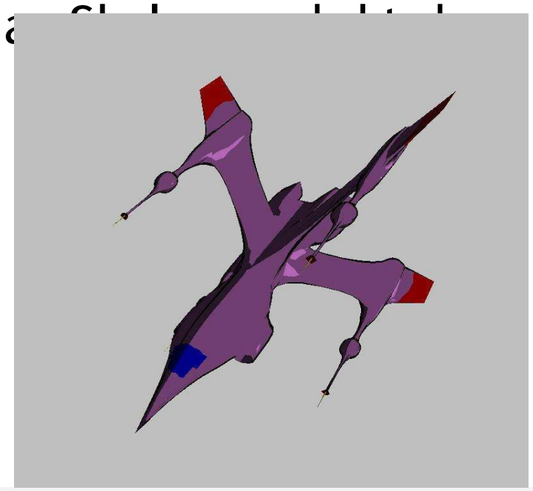
1D Texturen

- In der Visualisierung möchte man oft einen Parameter durch Falschfarbendarstellung intuitiv erfassbar machen
  - z.B. Höhe auf einem Terrain, Temperatur ...
  - Verwende dazu eine 1D-Textur mit einer Farbskala
  - Parameter (z.B. Höhe = y-Koord.) → 1D-Textur-Koord.



Ergibt Höhenlinien

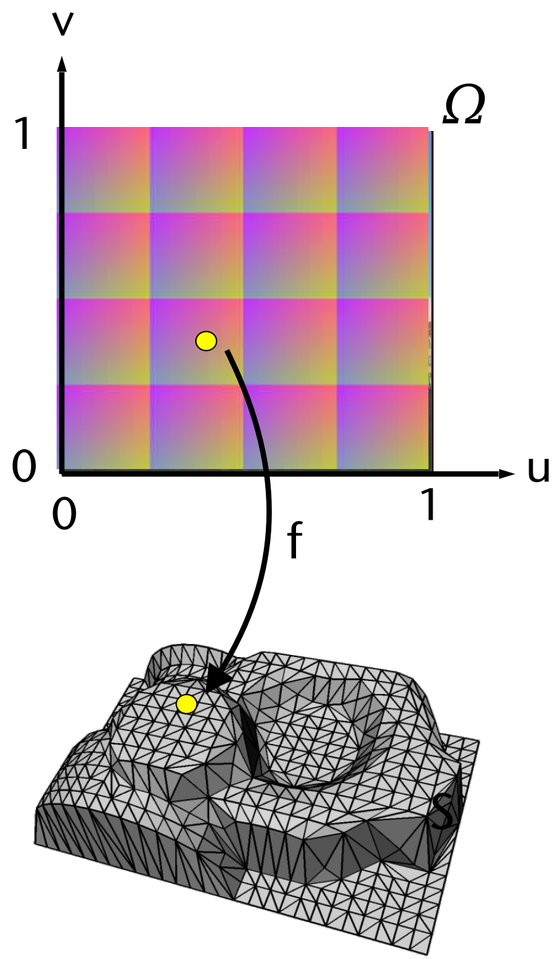
- Toon Shading:
  - Berechne Punktprodukt des Licht- und des Normalenvektor oder da
    View- und des Normalenvektors
  - Verwende dieses als Index in die Farbtabelle (1D-Textur)



Formale Definition von 2D-Texturen

- Zu texturierendes Objekt S = Dreiecks-Mesh
- Textur :=
  1. Parameterraum Ω (parametric domain)
  2. Pixelbild oder Funktion (diskret bzw. prozedural)
  3. Parametrisierung / Mapping = Abbildung f zwischen Textur und Objekt:

$$f : \Omega \leftrightarrow S$$



- Texturierung ist ein 2-stufiger Prozeß
  1. Inverses Mapping: $(u, v) = f^{-1}(x, y, z)$
  2. Farbe: $(r, g, b) = C_{\text{tex}}(u, v)$

2D-Texturierung

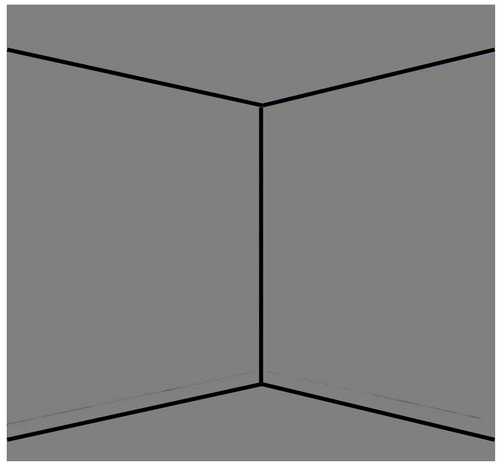
3D-Texturierung

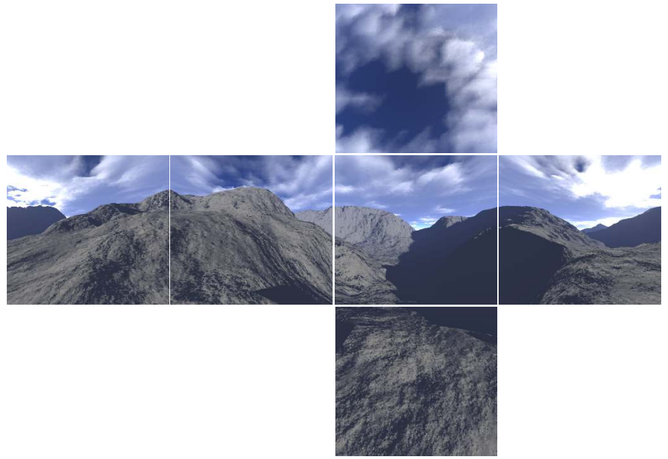
Diskrete 2D-Texturen

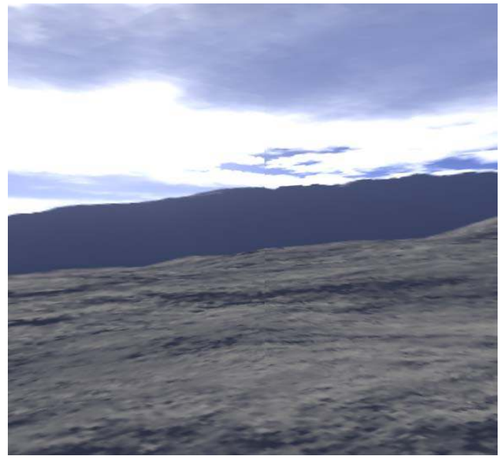
- Vorteile:
  - Vorrat an Bildern nahezu unerschöpflich
  - Erzeugung ist einfach (z.B. Photographie)
  - Anwendung auf eine Oberfläche ist sehr schnell
- Nachteile:
  - Kontext (Sonnenstand, Schattenwurf, etc.) stimmt meist nicht
  - Bilder hoher Auflösung haben großen Speicherbedarf
  - Fortsetzung meist sehr kompliziert
  - Beim Vergrößern und Verkleinern treten Artefakte auf (s. Mipmapping)
  - Verzerrung beim Mapping auf beliebige 3D Oberflächen

Einfaches Beispiel: die *Skybox*

- Die Umgebung einer virtuellen Szene modelliert man oft durch einen Würfel mit entsprechenden Texturen





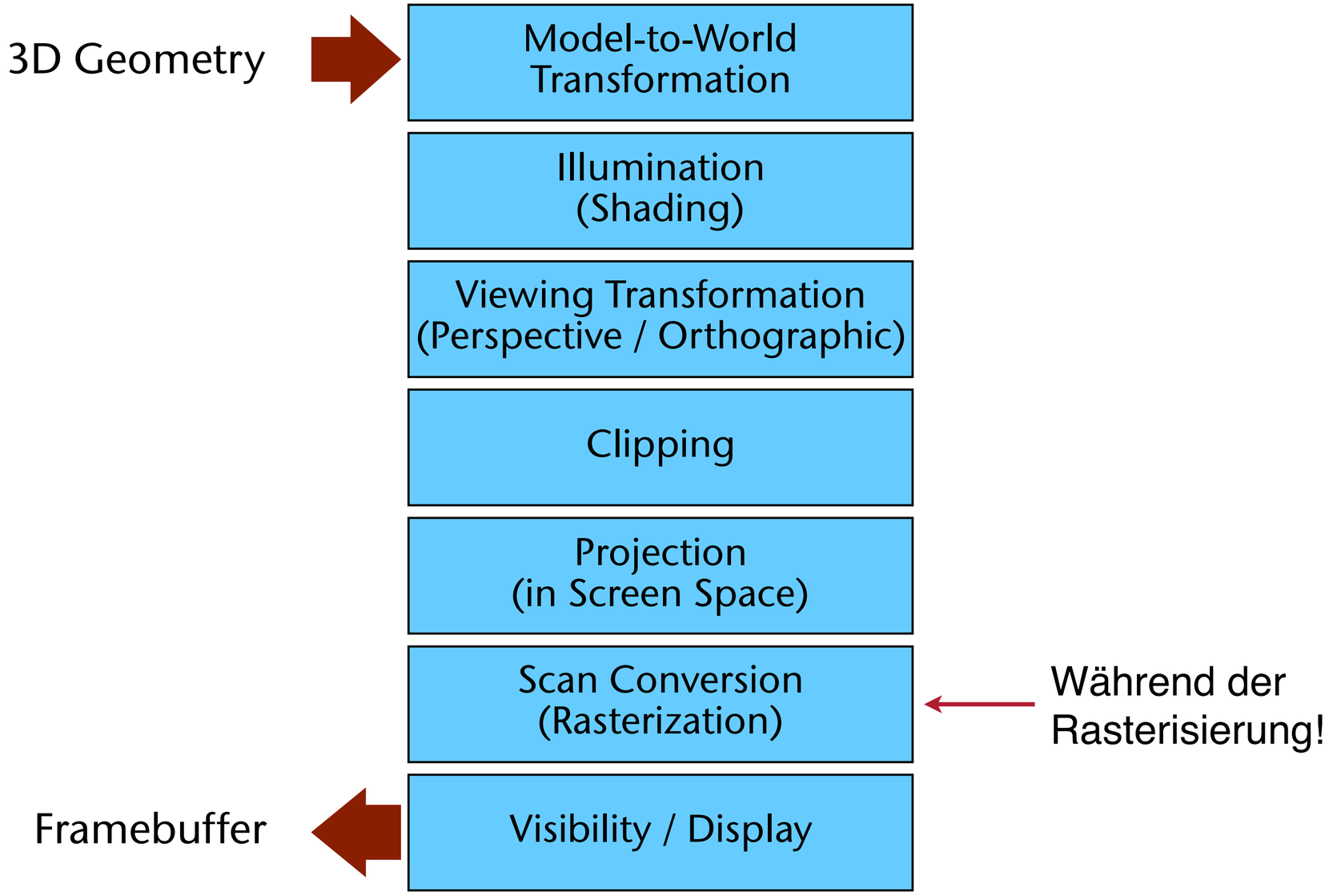


Ohne Skybox

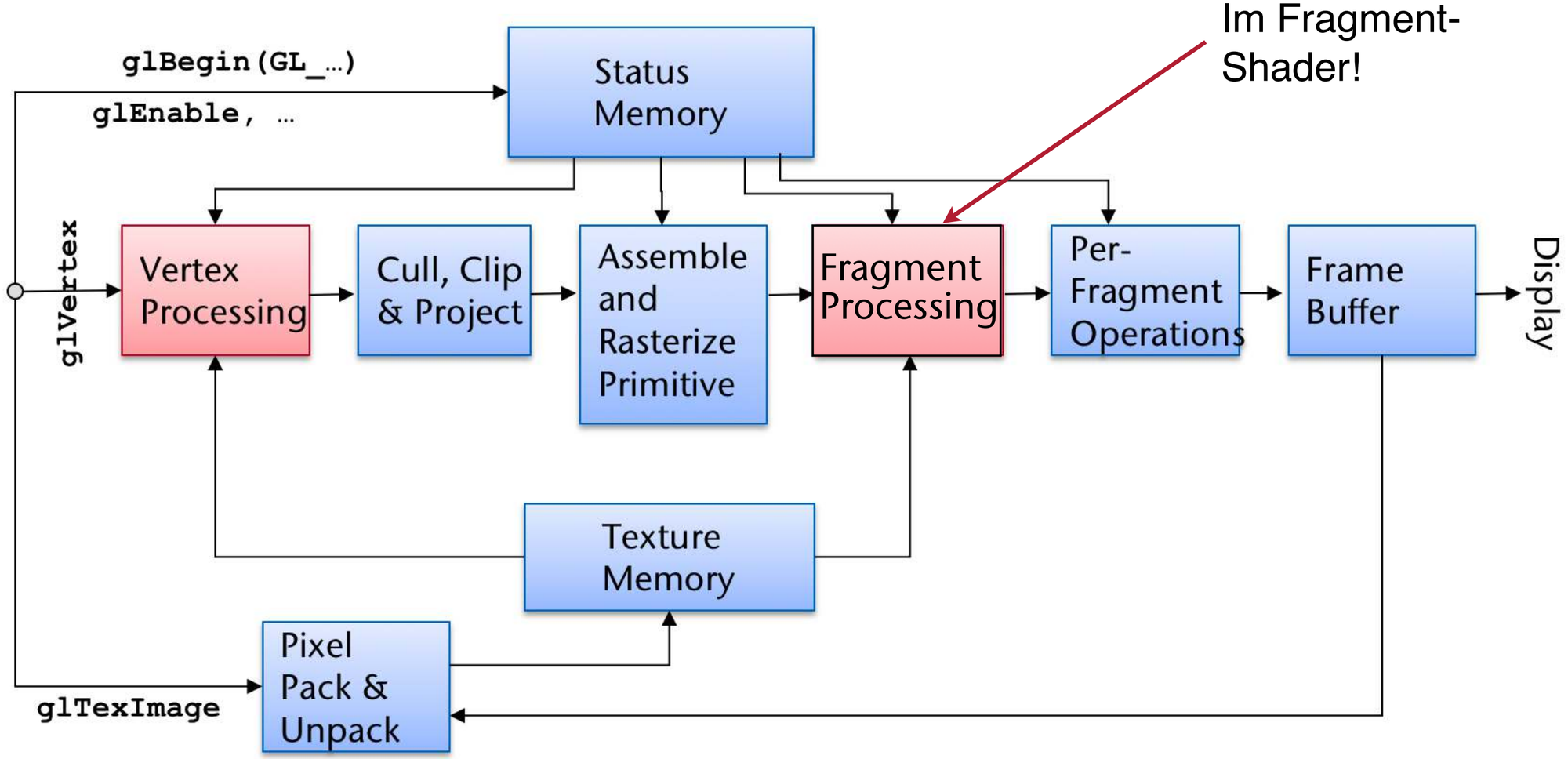
Die Skybox

Vom Boden aus

Wo wird in der (fixed function) Pipeline texturiert?

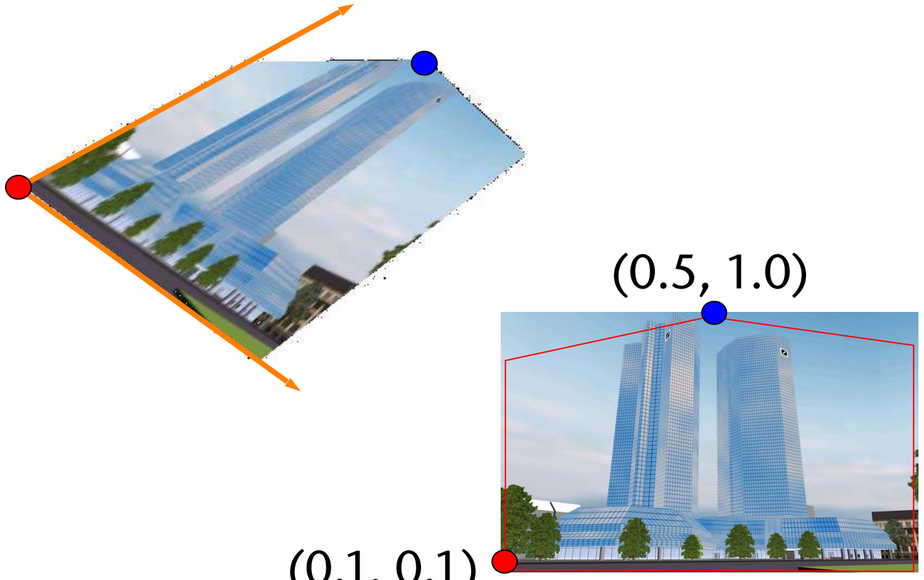


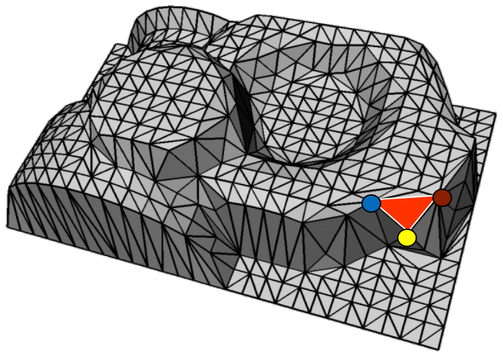
In der programmierbaren Pipeline

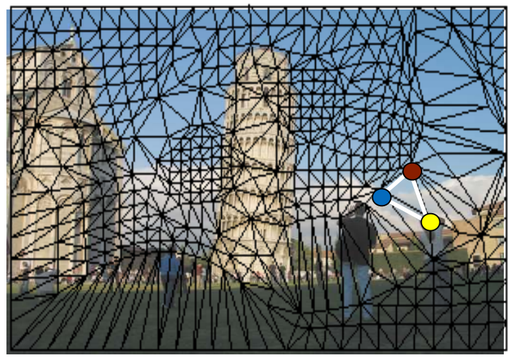


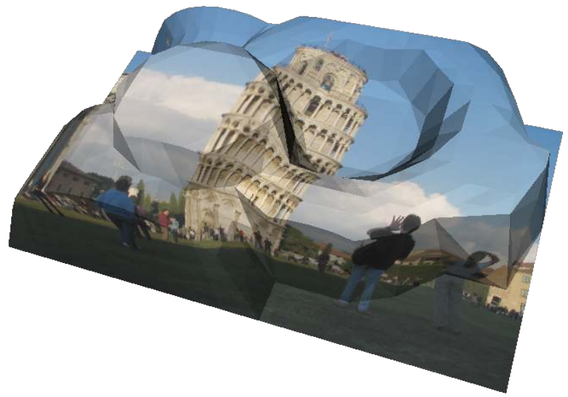
Stückweise lineare Parametrisierung durch Texturkoordinaten

- Für jeden Vertex des Polygon-Meshes müssen zusätzlich Texturkoordinaten definiert (oder berechnet) werden, die angeben, welcher Ausschnitt aus der Textur auf das Polygon gemappt wird
- Texturierung eines kompletten Dreiecks-Mesh durch u,v-Koordinaten



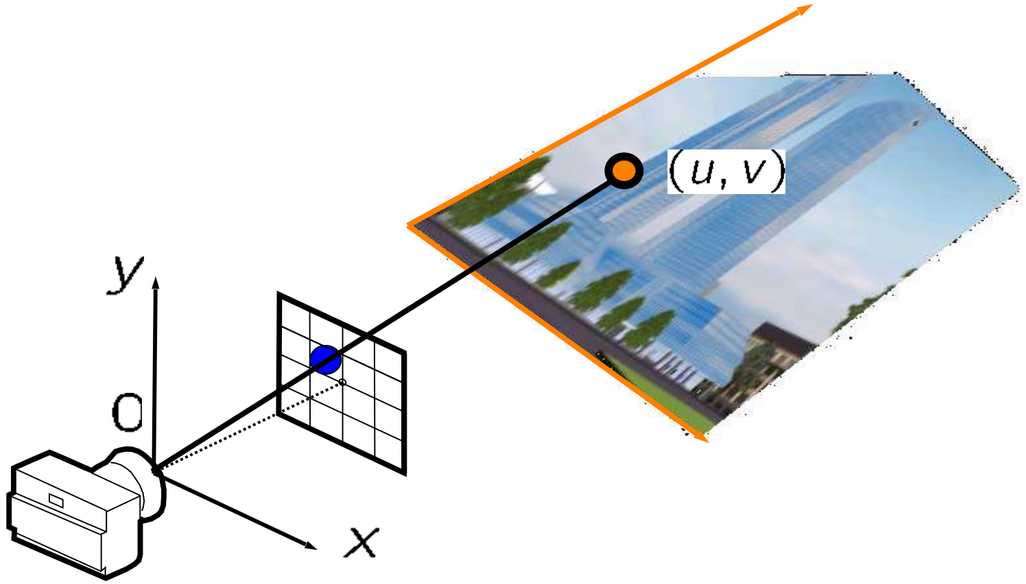


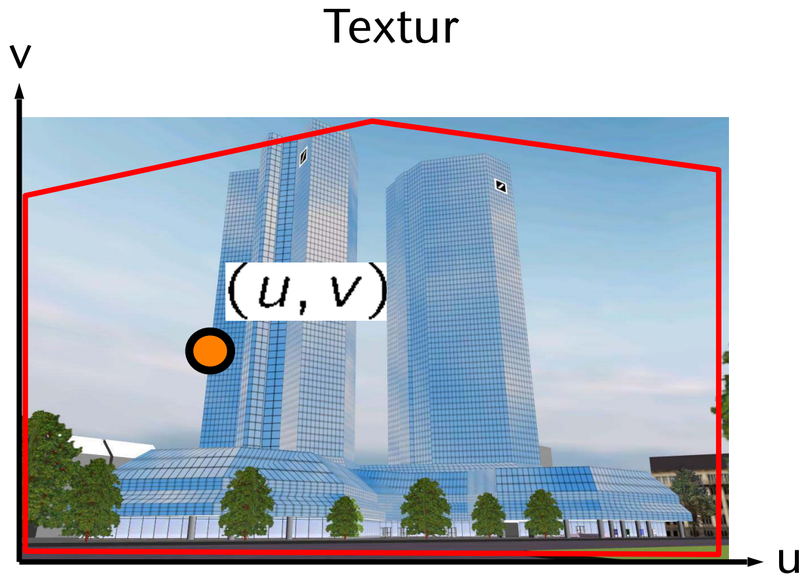




Interpolation der Texturkoordinaten

- Bei der Rasterisierung muss *für jedes Fragment* eine Texturkoordinate (*u*,*v*) aus den Texturkoordinaten der Vertices generiert werden
- Diese bestimmt im Koordinatensystem der Textur das Texel (= Pixel der Textur), das auf das Pixel (im Framebuffer) gemapt wird

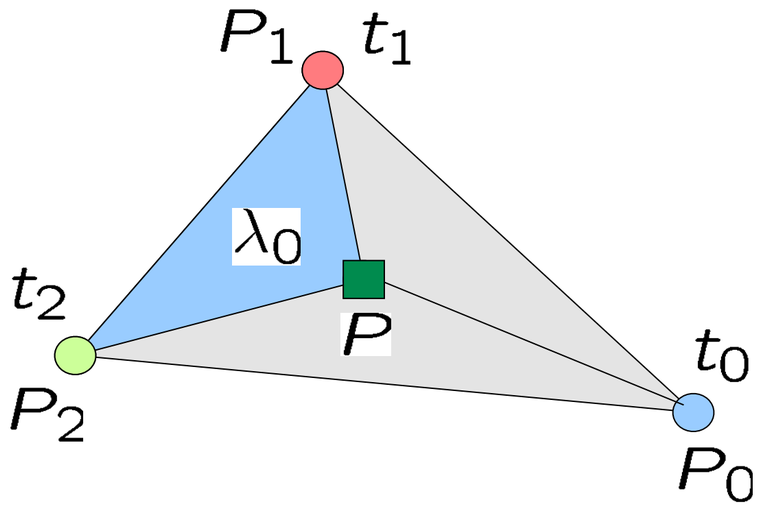




Interpolation der Textur-Koordinaten pro Fragment im Rasterizer

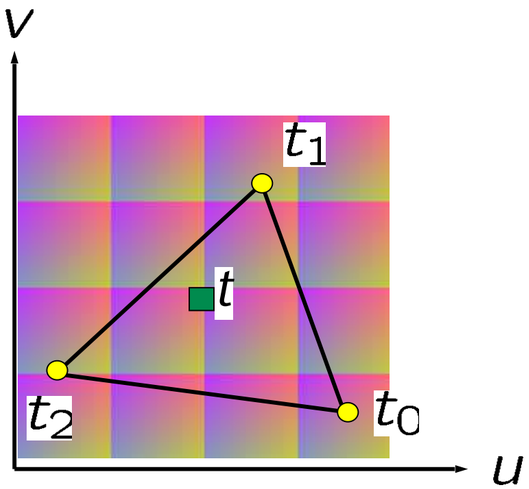
- Erinnerung: baryzentrische Koordinaten

$$\lambda_i(P) = \frac{A(P, P_{i-1}, P_{i+1})}{A(P_0, P_1, P_2)}$$



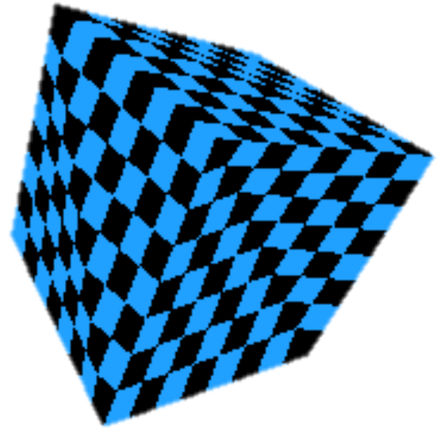
- Textur-Koordinaten durch (simplistische) baryzentrische Interpolation:

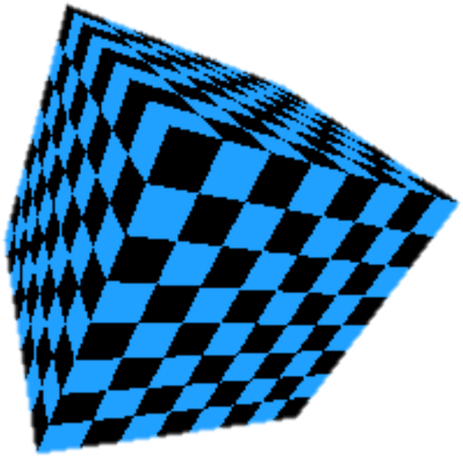
$$t(P) = \sum_{i=0}^{2} \lambda_i(P)\, t_i \qquad t_i \in \mathbb{R}^2$$



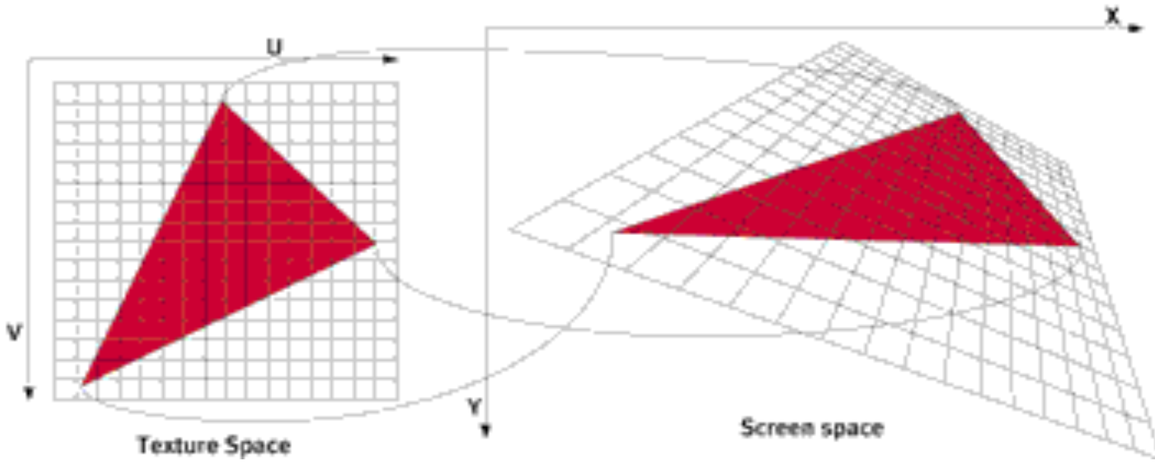
Perspektivisch korrekte Texturkoordinateninterpolation

- Problem: bei dieser einfachen, linearen Interpolation im Screen Space entstehen perspektivisch inkorrekte Bilder!
- Ursache: der Rasterizer hat die Pixel-Koordinaten nur nach der perspektivischen Division!
- Ziel: perspektivisch korrekte Interpolation





Demo (mehr auf der VL-Homepage)



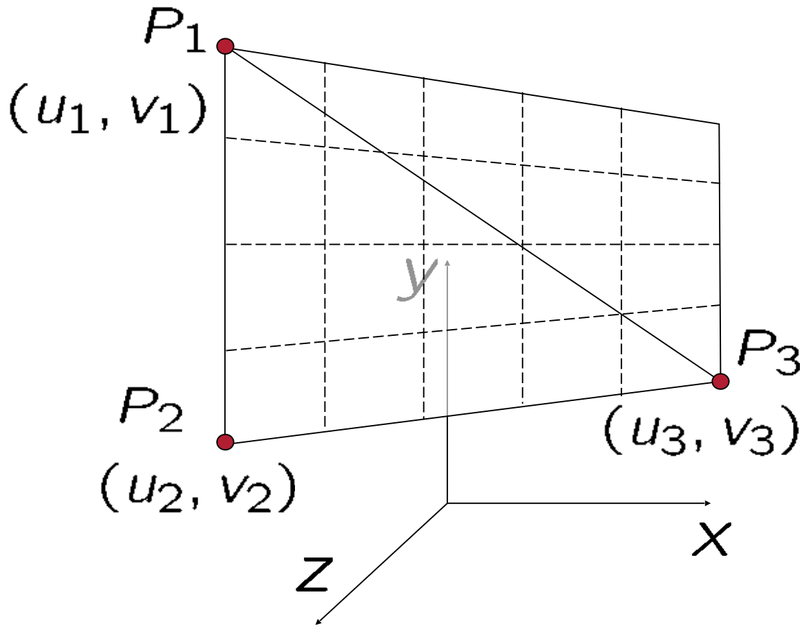
FYI (nicht klausurrelevant)

- Erinnerung: was passiert bei der perspektivischen Projektion

$$P_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ w_i \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} x_i/w_i \\ y_i/w_i \\ z_i/w_i \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} x_i/w_i \\ y_i/w_i \end{pmatrix} = \hat{P}_i$$

$$\text{wobei } w_i = \frac{z_i}{z_0},$$

$$z_0 = \text{Proj.ebene}$$



- Betrachte im folgenden P_1, und P_2

Nicht Klausur-relevant

- Betrachte im Folgenden nur die Interpolation auf einer Linie
  - Für baryzentrische Interpolation geht das Argument analog

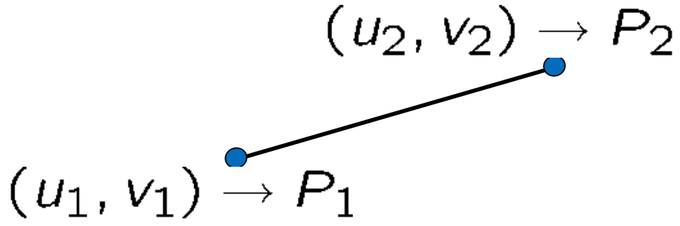
- Gegeben: *t*, zur linearen Interpolation zwischen $\hat{P}_1$ und $\hat{P}_2$, d.h.

$$\hat{P}(t) = t\hat{P}_1 + (1-t)\hat{P}_2$$

- Gesucht: Funktionen f_1, f_2 (möglichst ähnlich zu linearer Interpolation), so daß

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}(t) = f_1(t)\begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \end{pmatrix} + f_2(t)\begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \end{pmatrix}$$

die "richtigen" Texturkoordinaten für $\hat{P}$ sind



Nicht Klausur-relevant

- Problem:

$$P(t) = tP_1 + (1-t)P_2 \quad t \in [0,1]$$

$$\hat{P}(s) = s\hat{P}_1 + (1-s)\hat{P}_2 \quad s \in [0,1],\ \hat{P}_i = \mathrm{Proj}(P_i)$$

ergeben zwar dieselbe Gerade auf dem Bildschirm, wenn $P(t)$ projiziert wird, aber i.A. ist

$$\mathrm{Proj}(\,P(t)\,) \neq \hat{P}(t)\ !$$

- Frage: wie sieht $\mathrm{Proj}(P(t))$ aus?

Nicht Klausur-relevant

- Gegeben:

$$P(t) = t \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} + (1-t) \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$$

- O.B.d.A. betrachte nur die x-Koordinate:

$$x(t) = tx_2 + (1-t)x_1 \mapsto \frac{tx_2 + (1-t)x_1}{tw_2 + (1-t)w_1}$$

$$\text{wobei } w_i = \frac{z_i}{z_0}$$

- Behauptung:

$$\frac{tx_2 + (1-t)x_1}{tw_2 + (1-t)w_1} = \frac{x_1}{w_1} + \frac{tw_2}{w_1 + t(w_2 - w_1)}\left(\frac{x_2}{w_2} - \frac{x_1}{w_1}\right)$$

Nicht Klausur-relevant

- Beweis:

$$\frac{x_1}{w_1} + \frac{tw_2}{w_1 + t(w_2 - w_1)} \left(\frac{x_2}{w_2} - \frac{x_1}{w_1} \right) =$$

$$\frac{x_1(w_1 + t(w_2 - w_1)) + tw_2 w_1 (\frac{x_2}{w_2} - \frac{x_1}{w_1})}{w_1(w_1 + t(w_2 - w_1))} =$$

$$\frac{x_1 w_1 + tw_2 x_1 - tw_1 x_1 + tw_1 x_2 - tw_2 x_1}{w_1^2 + tw_2 w_1 - tw_1^2} =$$

$$\frac{x_1 w_1 - tw_1 x_1 + tw_1 x_2}{w_1^2 + tw_2 w_1 - tw_1^2} = \frac{x_1 - tx_1 + tx_2}{w_1 + tw_2 - tw_1} =$$

$$\frac{x_1 + t(x_2 - x_1)}{w_1 + t(w_2 - w_1)} = \frac{tx_2 + (1 - t)x_1}{tw_2 + (1 - t)w_1}$$

Nicht Klausur-relevant

- Gegeben:

$$\hat{P}(s) = s \begin{pmatrix} \hat{x}_2 \\ \hat{y}_2 \end{pmatrix} + (1-s) \begin{pmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{y}_1 \end{pmatrix}$$

- Frage: welches s passt zu einem gegebenen t, d.h., gesucht ist s so daß

$$\text{Proj}(P(t)) = \hat{P}(s)$$

$$s\hat{x}_2 + (1-s)\hat{x}_1 = \frac{x_1}{w_1} + s\left(\frac{x_2}{w_2} - \frac{x_1}{w_1}\right)$$

$$\Rightarrow \quad s = \frac{tw_2}{w_1 + t(w_2 - w_1)}$$

$$\Rightarrow \quad t = \frac{sw_1}{w_2 + s(w_1 - w_2)}$$

- Mit diesem t kann man die Texturkoordinaten (u,v) linear interpolieren!

Nicht Klausur-relevant

- Analog funktioniert es bei 3 baryzentrischen Koordinaten:

$$u(P) = \frac{\sum_{i=0}^{2} \lambda_i(P) u_i}{\sum_{i=0}^{2} \lambda_i(P) w_i}$$

Moment Mal!

- War die Interpolation von Farben in Dreiecken falsch?
- Was ist der Unterschied zwischen Interpolation von Farben und der Interpolation von Textur-Koordinaten?!
- Kein Unterschied ...
- Dann hätten wir Farben auch perspektivisch korrekt interpolieren müssen!
- Richtig. Sieht man aber (meistens) nicht ...

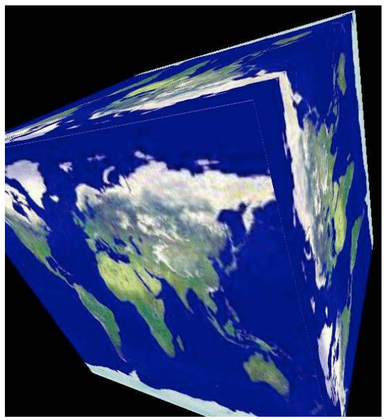
Modulation der Beleuchtung durch Texturen

- Wie kann ein Texturwert (Texel) die Beleuchtungsrechnung beeinflussen? (Was kann man mit einer Textur machen?)
- Erinnerung: das Blinn-Phong-Model

$$L_{\text{out}} = k_d L_a + \left(k_d(\mathbf{n}\cdot\mathbf{l}) + k_s(\mathbf{n}\cdot\mathbf{h})^p \right) L_{\text{in}}$$

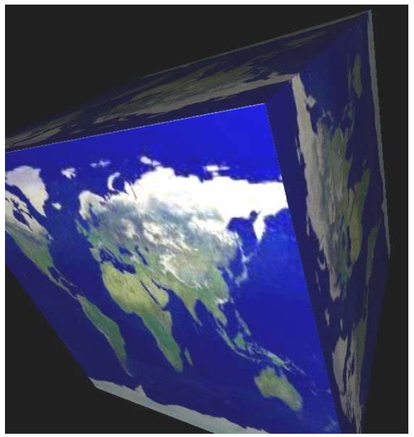
1. Ersetzen der Objektfarbe (*replace*)
   - Einfachste Art der Texturierung
   - Jegliche Beleuchtung wird entfernt

$$L_{\text{out}} = C_{\text{tex}}(u, v)$$

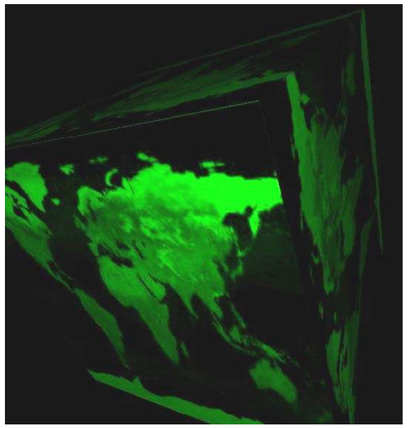


2. A posteriori Skalierung der Farbe (*modulate*)
   - Häufigste Art der Texturierung
   - Komponentenweise Skalierung des Farbwertes

$$L_{\text{out}} = L_{\text{Phong}} \cdot C_{\text{tex}}(u, v)$$



Textur auf weißem Würfel



Textur auf grünem Würfel

3. A priori Skalierung der Materialfarbe (Reflexionskoeffizient):

$$k_d = C_{\text{tex}}(u, v)$$

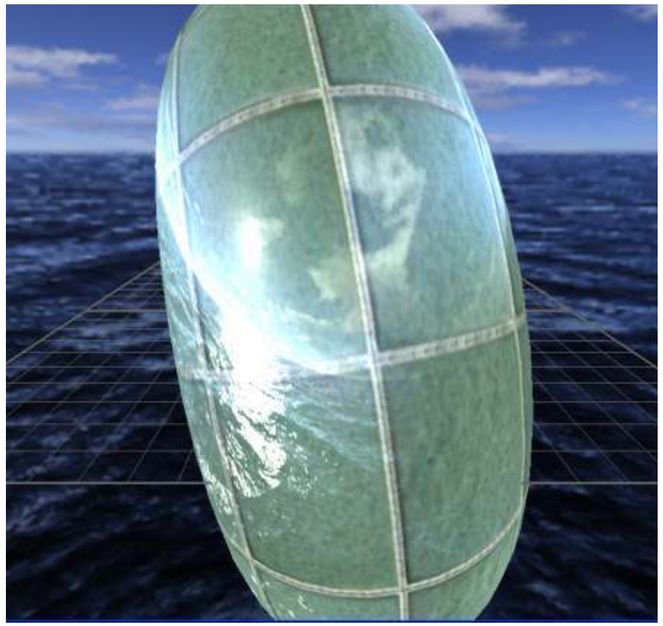
- Textur wird also vor der Berechnung des Beleuchtungsmodells ausgelesen
- Wichtig: im Unterschied zu (2) bleibt hier der spekulare Anteil von der Textur unbeeinflusst

4. Modulation der spekularen Reflexion (*gloss map, specular map*)

- Analog zu (3) für k_s

$$k_s = C_{\text{tex}}(u, v)$$

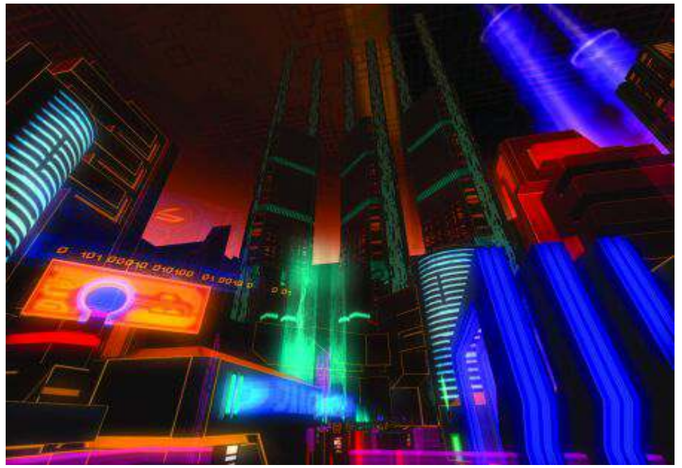
- Erlaubt Modellierung unregelmäßiger *"shininess"* (z.B. verschmutzte / fettige Flächen)



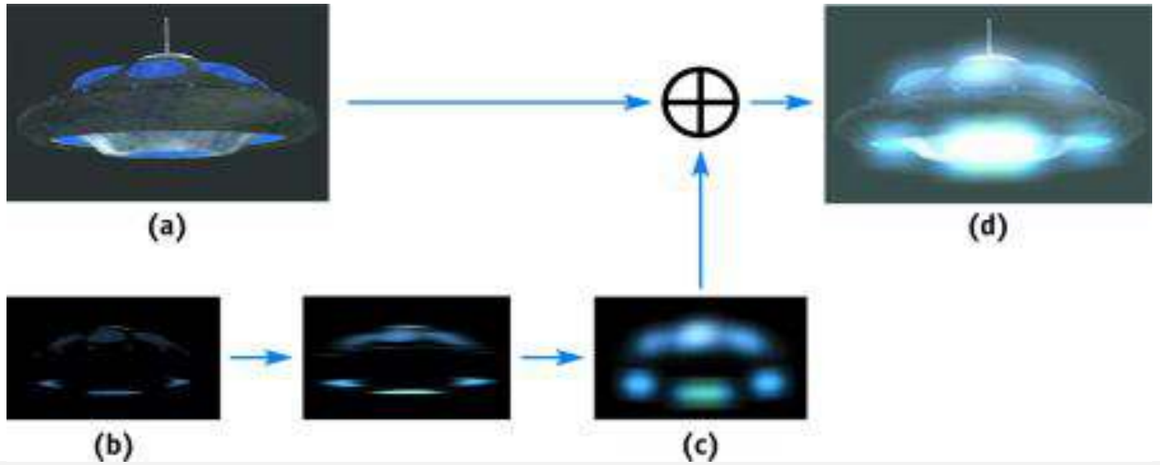
5. "Glow"-Effekt:

$$L_{out} = C_{tex}(u, v) + L_{Phong}$$

- For neon signs, TV, laser beams etc.

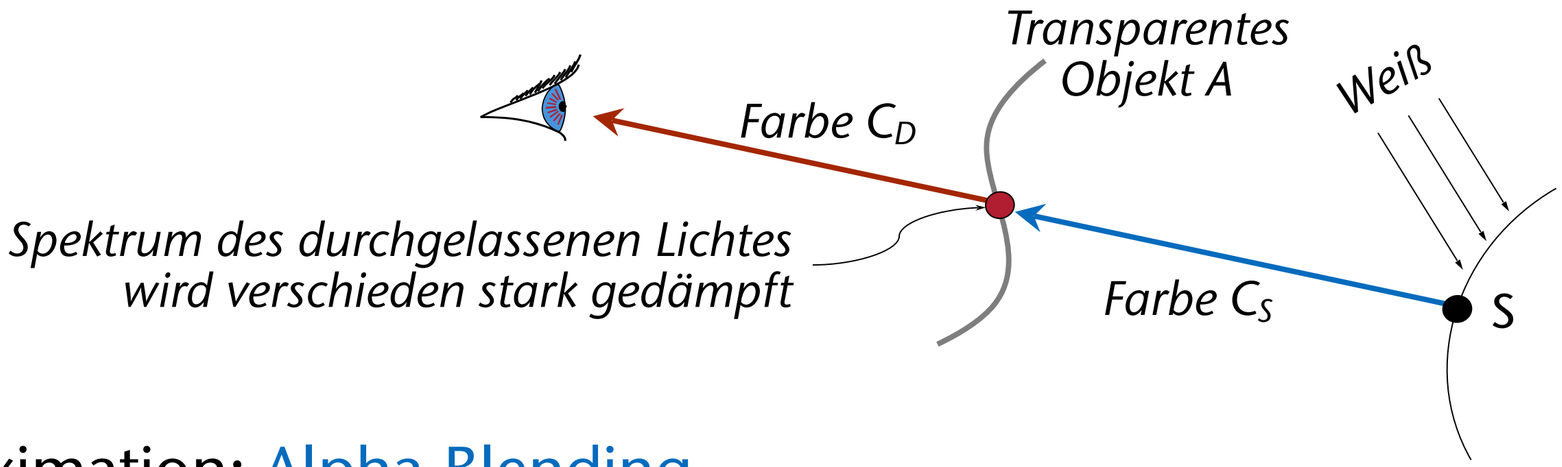


- Solche Effekte (Halos) gehen aber nur mit Multi-Pass-Rendering (Filterung):



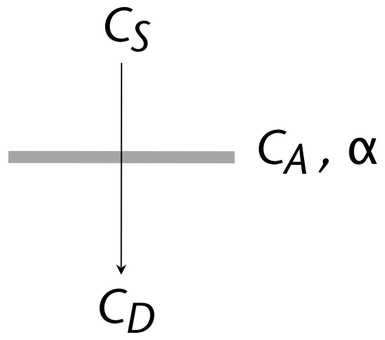
Exkurs: Rendering transparenter Objekte

- Transparenz ≈ Licht wird von einem Material teilweise durchgelassen, wobei verschiedene Wellenlängen verschieden stark gedämpft werden:



- Approximation: Alpha-Blending
  - Objekt A hat die Farbe C_A und eine Transparenz / *Opacity* $\alpha \in [0, 1]$
  - Resultat nach dem Rendern von Objekt A:

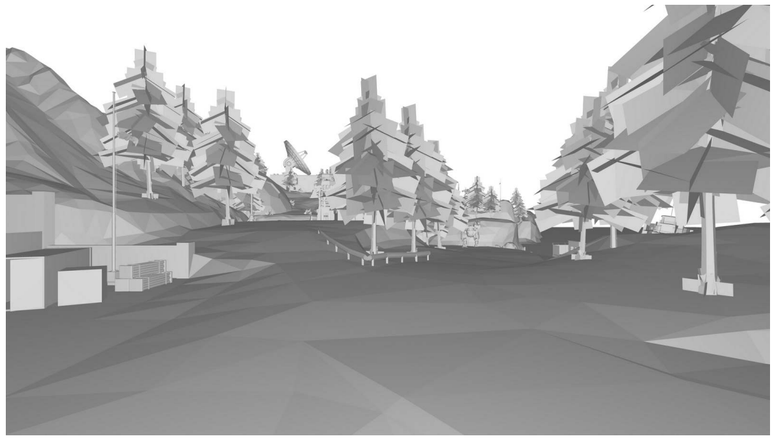
$$C_D = \alpha C_A + (1 - \alpha) C_S$$



wobei C_D / C_S = Farbe im Framebuffer nach / vor dem Rendern von Obj. A ist

6. Modulation der Transparenz

- Speichern der „Durchsichtigkeit“ in einer Textur: $(r, g, b, \alpha)_{x,y} = C_{\text{tex}}(u, v)$
- Pixel mit α=0 sind voll durchsichtig und Pixel mit α=1 sind voll undurchsichtig (opak)
- Ermöglicht komplexe Umrisse



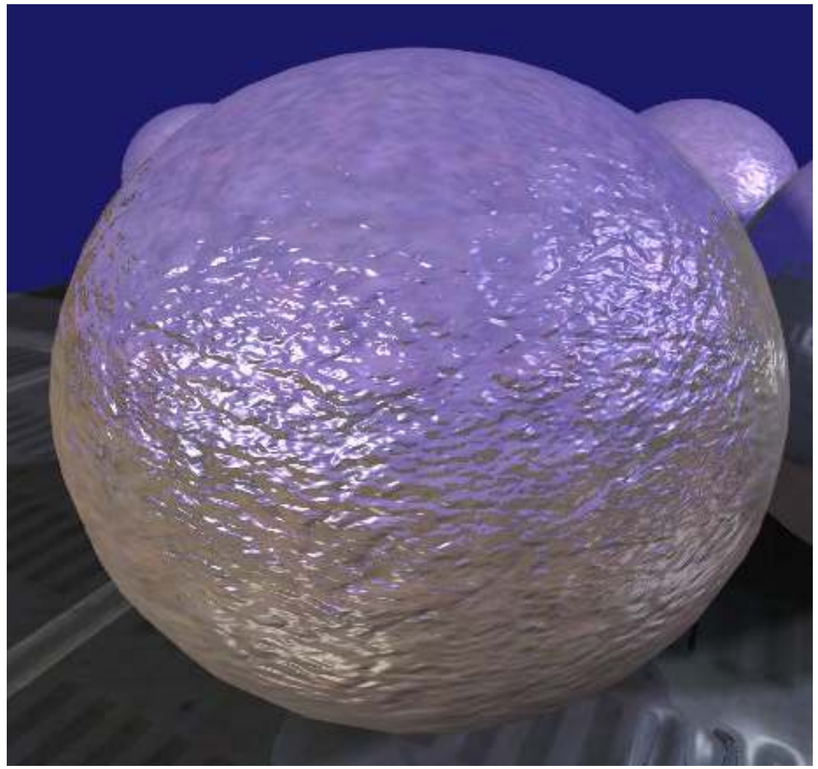
Enemy Territory: Quake Wars. Splash Damage & Intel

7. Perturbation der Normale (*Bump- / Normal-Mapping*)

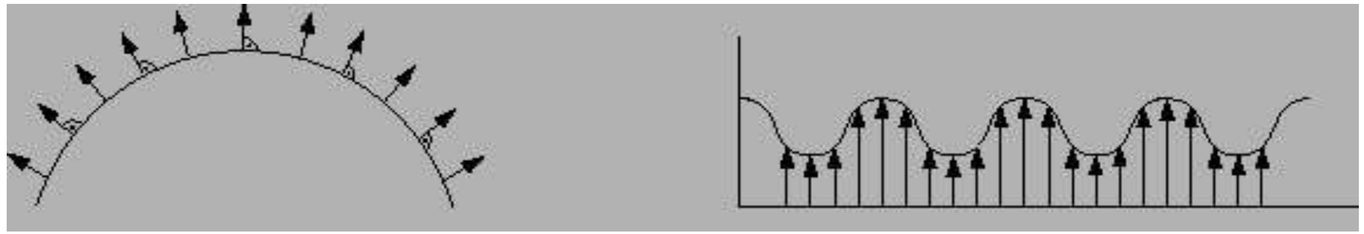
- Speichere Höhenwerte einer Offsetfläche in einer Textur
- Berechne eine korrigierte Normale pro Pixel aus den Höhenwerten der *Bump-Map*:

$$\mathbf{n}(x, y) = f(C_{\text{tex}}(u, v))$$

- Verwende diese Normale im Phong-Modell
  (nur mit Per-Pixel-Lighting)



- Ziel: berechne korrekte Normale aus der einfachen Geometrie + Höhenfeld
- Ansatz:



Original-Oberfläche mit Normalen $P(u,v)$ $N(u,v)$

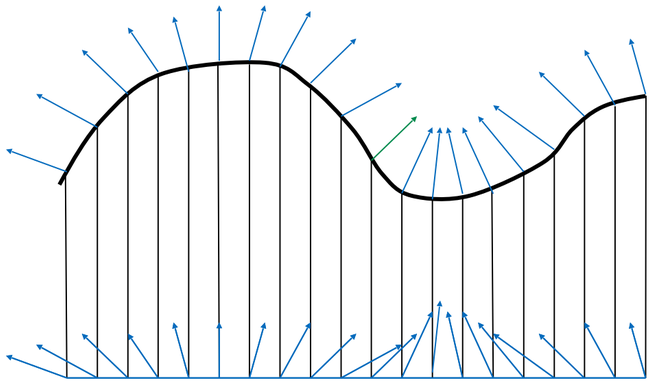
Bump-Map $F(u,v)$

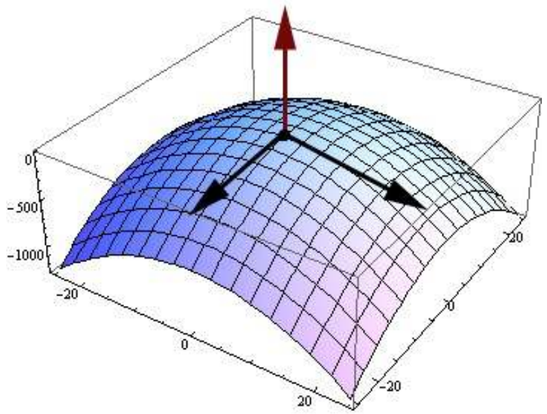
Offset-Oberfläche $\hat{P}$

Perturbierte Normalen $\hat{N}(u,v)$

- Bump-Map = Offset entlang der orig. Normale = skalare Textur
- Resultierende Oberfläche : $$\hat{P}(u,v) = P(u,v) + F(u,v)\frac{N(u,v)}{\|N(u,v)\|}$$

- Beobachtung: ins Beleuchtungsmodell geht nicht direkt $P(u,v)$, sondern nur $N(u,v)$ ein.
- Hauptidee des Bump-Mapping: für kleine Unebenheiten genügt Rendering von $P(u,v)$ mit Normalen $\hat{N}(u,v)$





- Wie berechnet man $\hat{N}(u,v)$:

$$\hat{N}(u,v) = \hat{P}_u(u,v) \times \hat{P}_v(u,v)$$

- Richtungsableitungen mit Summen- und Kettenregeln:

$$\hat{P}_u(u,v) = P_u(u,v) + F_u(u,v)\frac{N(u,v)}{\|N(u,v)\|} + F(u,v)\frac{d}{du}\frac{N(u,v)}{\|N(u,v)\|}$$

$$\hat{P}_v(u,v) = P_v(u,v) + F_v(u,v)\frac{N(u,v)}{\|N(u,v)\|} + F(u,v)\frac{d}{dv}\frac{N(u,v)}{\|N(u,v)\|}$$

- Falls $F(u,v)$ klein → Weglassen des letzten Teilterms:

$$\hat{P}_u(u,v) \approx P_u(u,v) + F_u(u,v)\frac{N(u,v)}{\|N(u,v)\|}$$

$$\hat{P}_v(u,v) \approx P_v(u,v) + F_v(u,v)\frac{N(u,v)}{\|N(u,v)\|}$$

- Für $\hat{N}(u,v)$ folgt damit:

$$\hat{N} = \hat{P}_u \times \hat{P}_v$$

$$= P_u \times P_v + F_u \left(\frac{N}{\|N\|} \times P_v \right) + F_v \left(P_u \times \frac{N}{\|N\|} \right) + F_u F_v \left(\frac{N}{\|N\|} \times \frac{N}{\|N\|} \right)$$

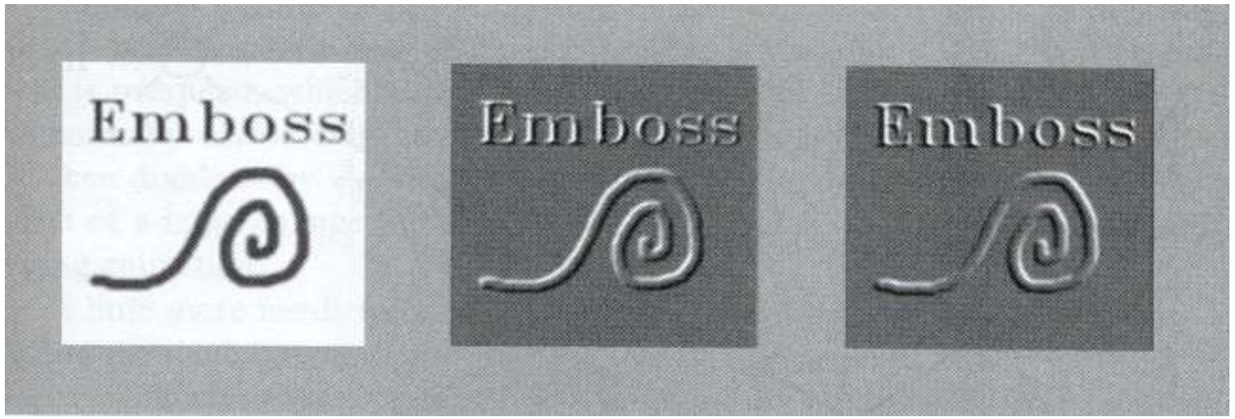
$$= P_u \times P_v + F_u \left(\frac{N}{\|N\|} \times P_v \right) + F_v \left(P_u \times \frac{N}{\|N\|} \right)$$

$$= N + \frac{1}{\|N\|} \left(F_u (N \times P_v) - F_v (N \times P_u) \right)$$

Bemerkungen

- Die Ableitungen F_u und F_v können mit finiten Differenzen approximiert werden
- Finite Differenzen auf uniformem Gitter der Gittergröße h (im 1D)
  - Vorwärtsdifferenzen: $$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{h}$$
  - Rückwärtsdifferenzen: $$f'(x_i) = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{h}$$
  - Zentrale Differenzen: $$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1})}{2h}$$

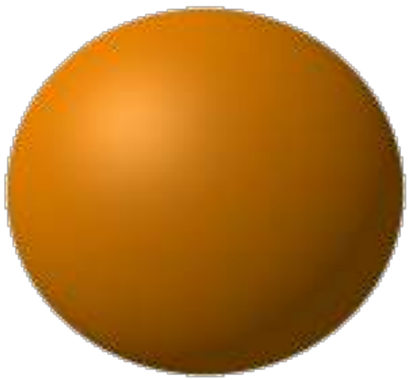
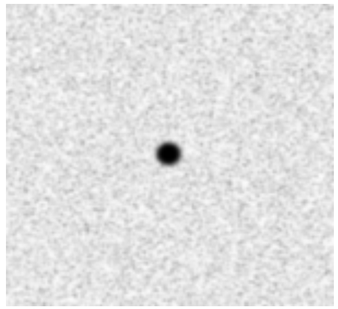
- Speicherung:
  - Höhenfeld als Grauwertbild in Rot-Kanal (z.B. mit Malprogramm erstellt)
  - Richtungsableitungen (mit finiten Differenzen berechnet) in G/B speichern

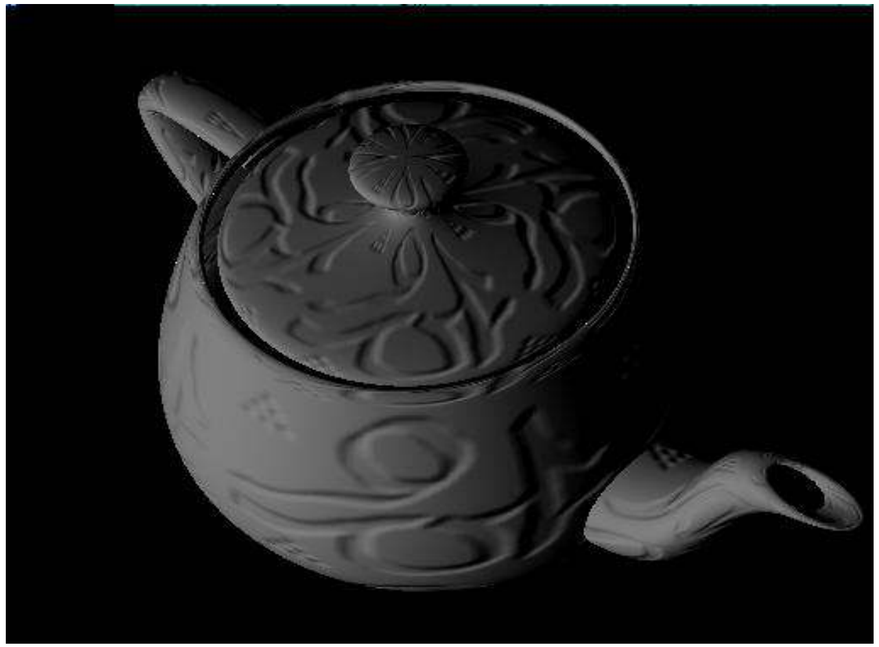


Orginal Höhenfeld | u-Richtungsableitung | v-Richtungsableitung

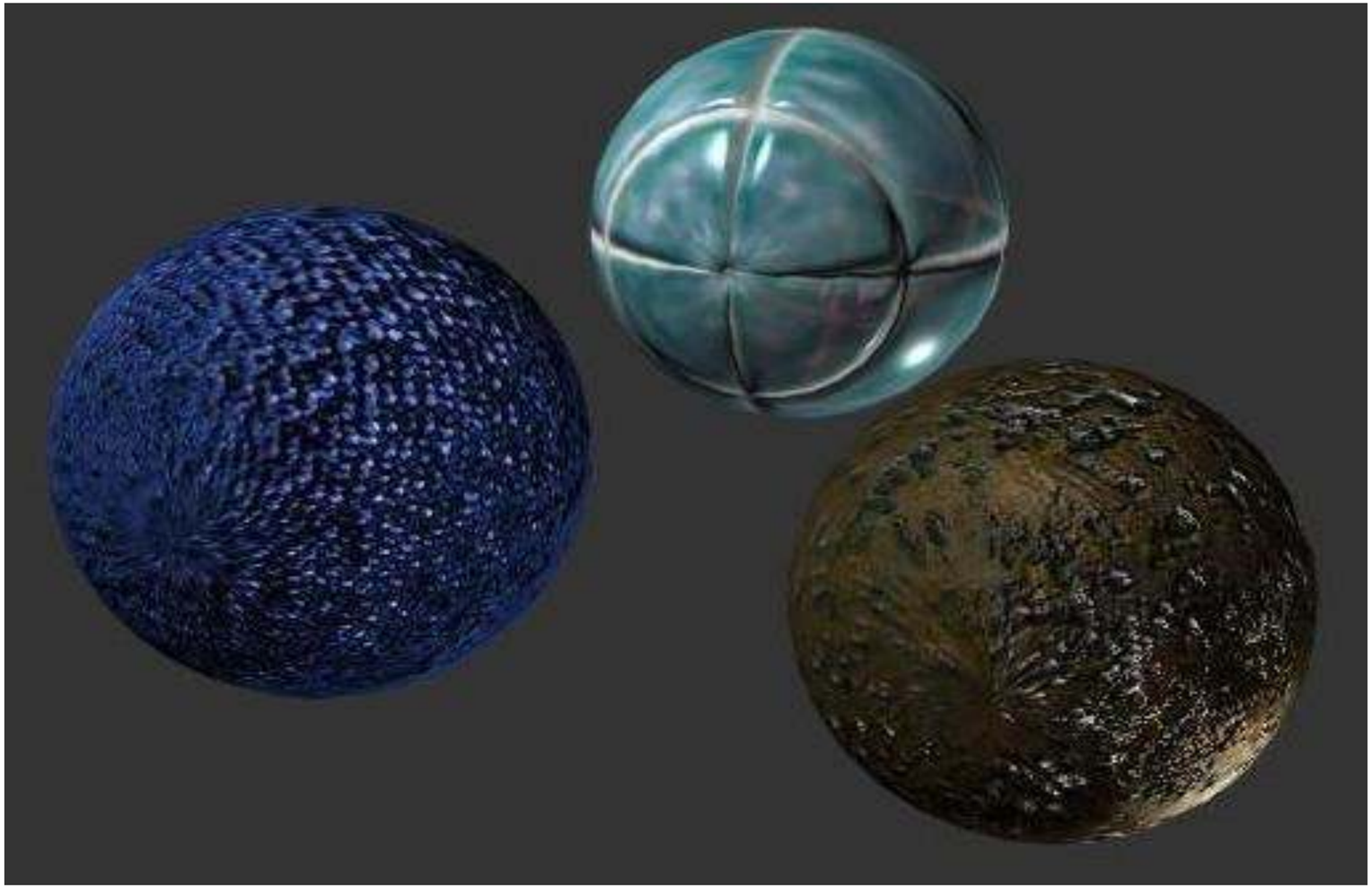
- Voraussetzung: Beleuchtung erst bei der Rasterisierung (Shader), oder sehr fein tesselierte Geometrie und dann Berechnung der perturbierten Normalen an jedem Vertex "von Hand"

Beispiele

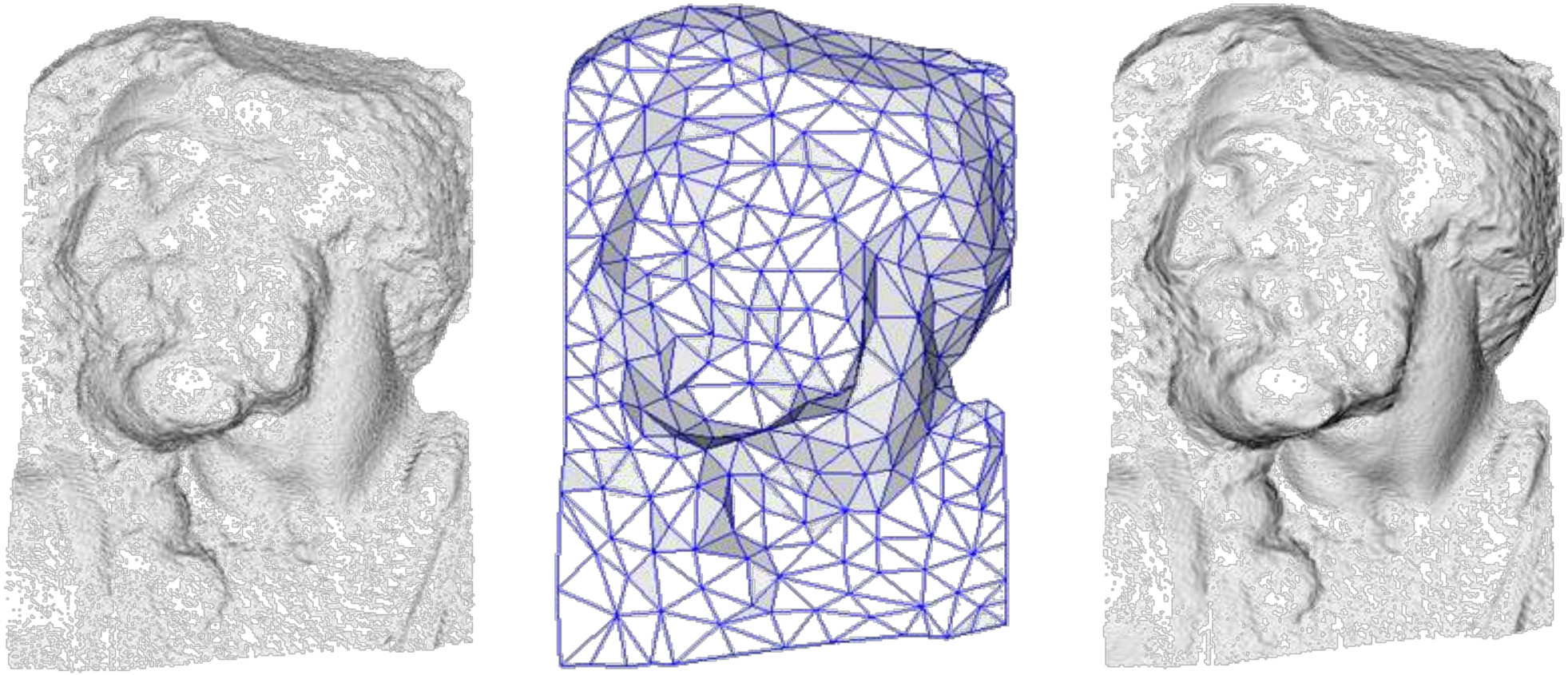

Multi-Textures (Bump und Environment)



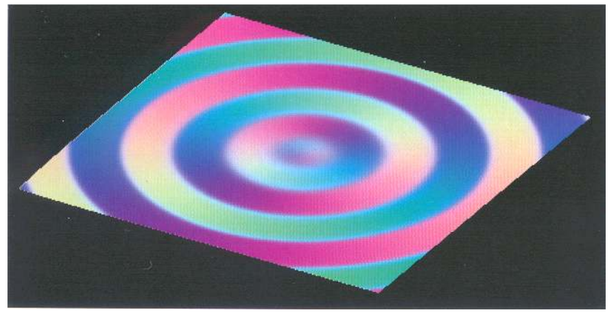
Enemy Territory: Quake Wars. Splash Damage & Intel

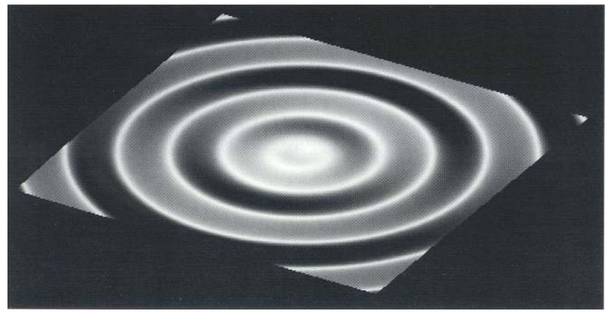
Normal Maps

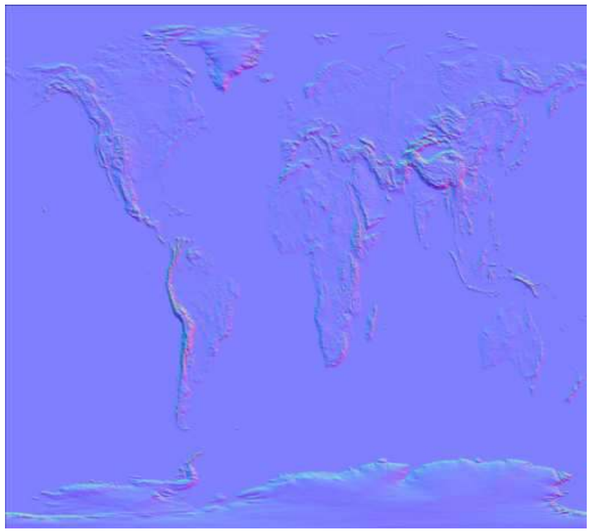
- Normalen in hoher Auflösung in Textur speichern
- Auf niedrig aufgelöste Geometrie mappen und im Phong-Modell die Normale aus der Textur holen



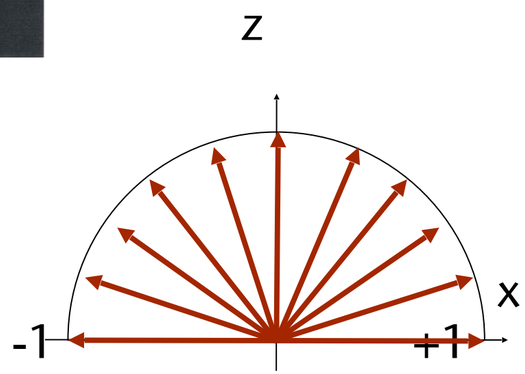
- Beispiele:

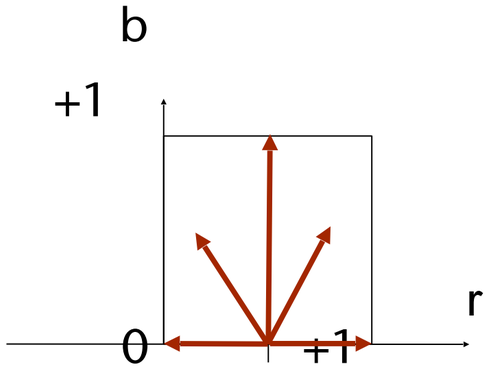






- Kodierung der Normalen:



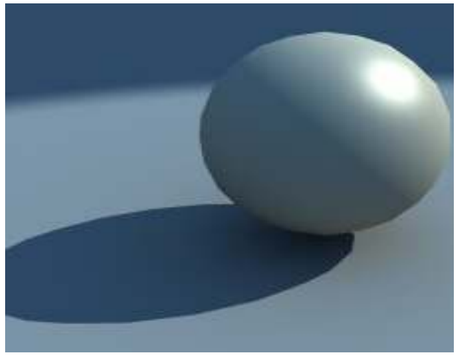


Unterschied zwischen Normal Maps und Bump Maps

- Bump Maps sind unabhängig von der Geometrie, man kann sie auf jede beliebige (genügend "flache") Geometrie aufbringen.
- Normal Maps kann man nur für genau die Geometrie verwenden, für die sie erzeugt wurden.

Beispiele für Displacement-Mapping

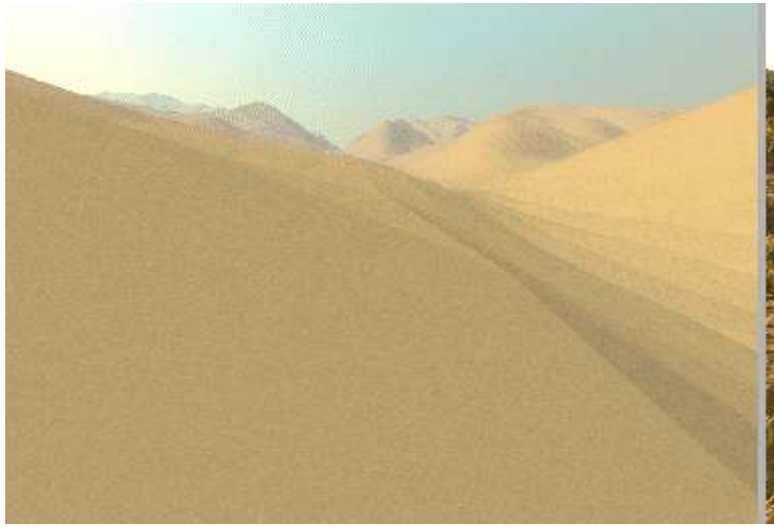
Aber hier NICHT Klausur-relevant



Geometrie

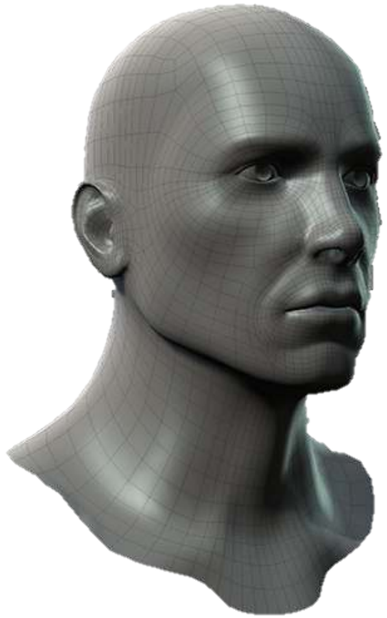
Bump Mapping

Displacement Mapping



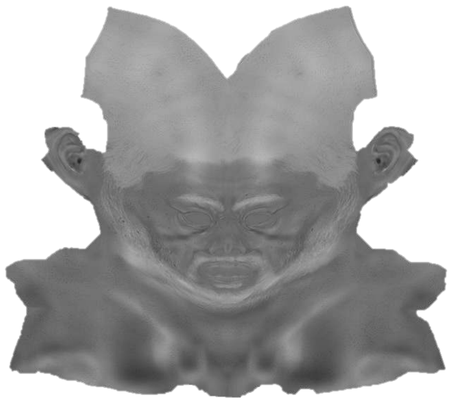
Beispiel für eine Kombination der Textur-Arten

Geometry
(2 mio pgons)



Diffuse Map

Gloss Map (specularity map)

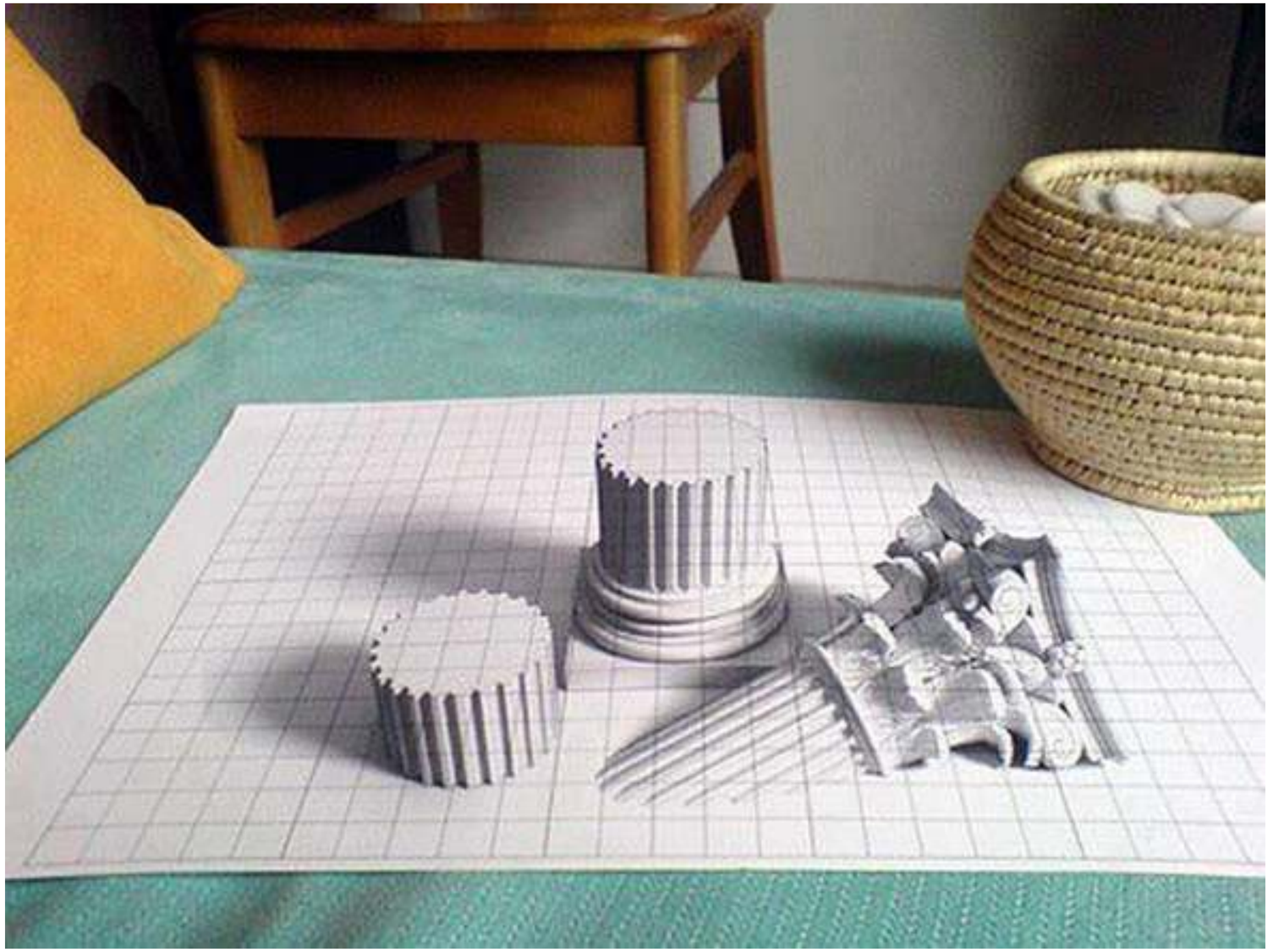


Bump Map

Exkurs: Trompe l'œil - Malerei

Pere Borrell del Caso,
Der Kritik entfliehend, 1874

Universitätskirche in Wien
mit trompe-l'œil Deckenfresken,
die den Eindruck einer Kuppel geben.
Gemalt von Andrea Pozzo
im 17. Jahrhundert



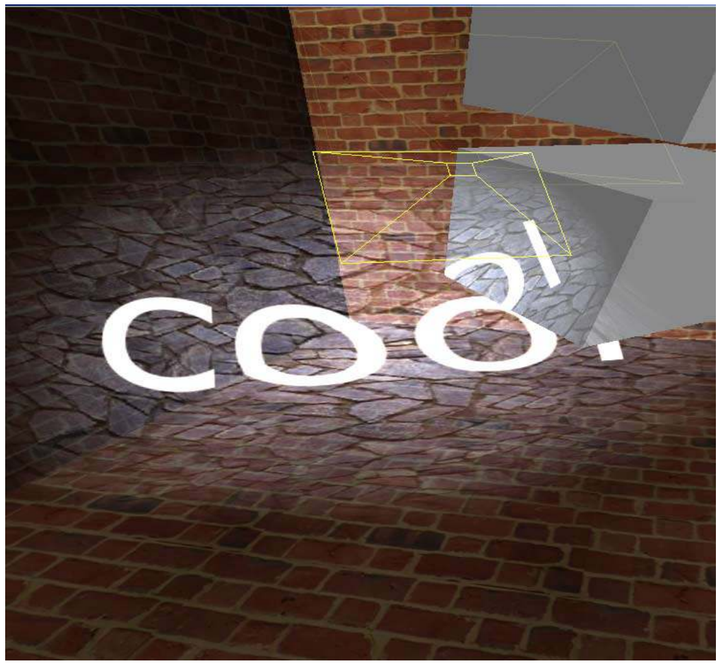
- Light Maps:
  - Zusätzliche Textur wird verwendet, um statische oder dynamische Illumination zur Szene hinzuzufügen

  - So kann man leicht den Lichtschein eines Bullets wandern lassen
  - Weil die Illumination räumlich nur niedrige Frequenzen hat, ist nur eine gering aufgelöste Textur erforderlich
  - Viele kleine Light Maps können in eine große Textur verpackt werden
  - Light Maps werden gewöhnlich mittels Raytracing oder Radiosity erzeugt

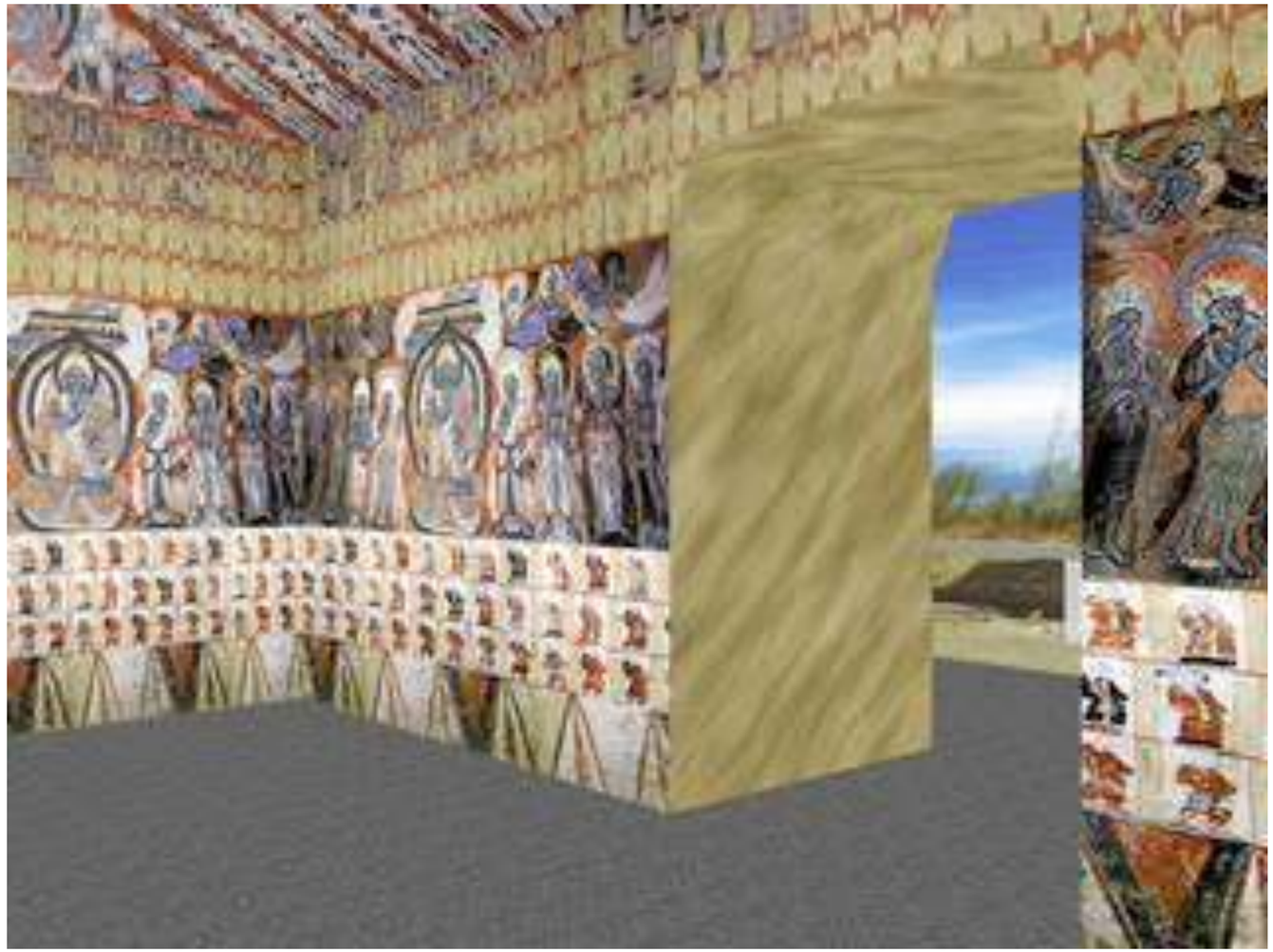
8. Modulation von Lichtquellenparametern:

- Idee: Lichtquellenparameter durch Texturen zu beeinflussen.
- Besonders anschaulich ist dies bei Projektorlichtquellen. Dabei greift man mittels des Lichtvektors in die Textur und moduliert damit die Lichtemission:

$$L_i' = C_{tex}(f^{-1}(\mathbf{l}_i)) \cdot L_i$$



Beispiel-Anwendung: virtuelle Taschenlampe



Texturen in Open GL FYI (nicht klausurrelevant)

- Als erstes muss eine Textur auf die Graphikkarte geladen werden:

```
glTexImage{1,2}D( target, level, internal, width,
                  [height,] border, format, type, data )
```

target = **GL_TEXTURE_1D, GL_TEXTURE_2D,** ...

level = 0 bzw. der zu definierende MipMap Level (später)

internal = Anzahl der Komponenten der Textur: 1, 2, 3, 4, **GL_RGB**, **GL_LUMINANCE**, **GL_R3_G3_B2**...

width & **height** **muß** = 2^n+2*border sein!

(**gluScaleImage()** kann Bilder skalieren helfen)

border = Breite des Randes, 0 oder 1

format = was steht pro Pixel im Speicher: **GL_RGB**, **GL_RGBA**, **GL_BGR**, ...

type = Typ der Pixel: **GL_UNSIGNED_BYTE**, **GL_FLOAT**, ...

data = Adresse der Pixeldaten im Hauptspeicher

FYI (nicht klausurrelevant)

- Textur einschalten:

```
glEnable( GL_TEXTURE_{12}D )
```

- Zu jedem Eckpunkt gehört eine Texturkoordinate:

```
glTexCoord{1234}f[v]( value )
```

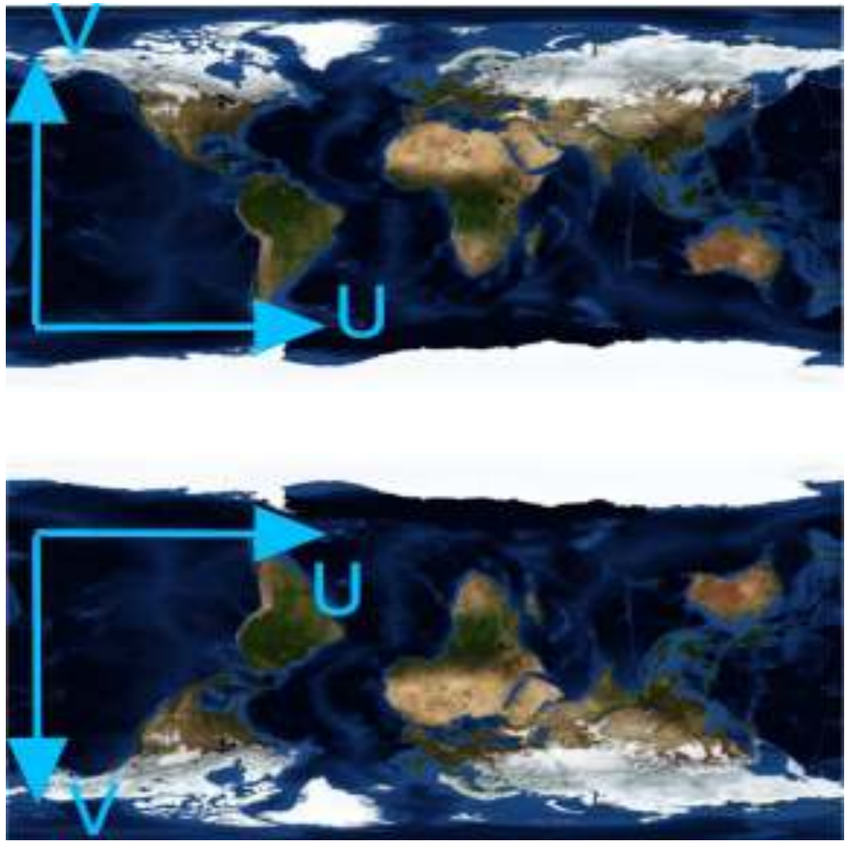
  - das Bild liegt dabei im Bereich [0,1]x[0,1]
  - im Normalfall werden nur die ersten beiden (u und v) verwendet
    - die dritte (q) wird für 3D-Texturen benötigt, die vierte (r = wie die homogene Koordinaten) nur für Spezialeffekte

- Achtung: OpenGL hat keinen Image-Loader!
  - Aber: Qt bietet hier Funktionen an (oder andere Libs)
  - Oder: `glCopyTexImage2D(...)` liest Bild aus Framebuffer in Texturspeicher

Orientierung

FYI (nicht klausurrelevant)

- Der Fluch der Orientierung:
  - OpenGL Orientierung
  - Orientierung des Bild-Arrays nach dem Laden



- Achtung: Qt's **`bindTexture`** spiegelt das Bild, bevor es zur Graphikarte geschickt wird! Evtl. besser "von Hand" binden ...

Beeinflussung der Pixelfarbe in OpenGL

FYI (nicht klausurrelevant)

- Funktion:

```
glTexEnvi( GL_TEXTURE_ENV,
           GL_TEXTURE_ENV_MODE, value )
```

- 4 Möglichkeiten für ***value***:
  - **GL_REPLACE**: Texelfarbe ersetzt Pixelfarbe (am häufigsten)
  - **GL_MODULATE**: komponentenweise Mult. von *T* und *F*

$$T_{\mathrm{RGB}} \cdot F_{\mathrm{RGB}}$$

  - **GL_DECAL**:

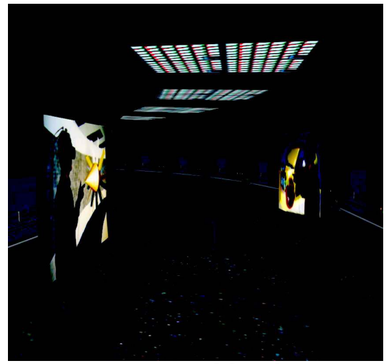
$$\alpha_T \cdot T_{\mathrm{RGB}\alpha} + (1 - \alpha_T) \cdot F_{\mathrm{RGB}\alpha}$$

  - **GL_BLEND**:

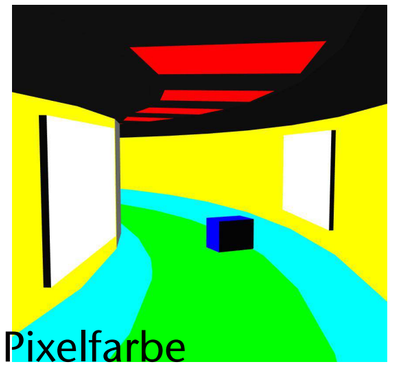
$$F_{\mathrm{RGB}} \cdot (1 - T_{\mathrm{RGB}}) + C_{\mathrm{RGB}} \cdot T_{\mathrm{RGB}}$$

  und *C* wird definiert über

```
glTexEnvfv( GL_TEXTURE_ENV,
            GL_TEXTURE_ENV_COLOR, value )
```



T = Texelfarbe



F = Pixelfarbe
ohne Textur

Koordinaten-Wrap / Textur-Fortsetzung

FYI (nicht klausurrelevant)

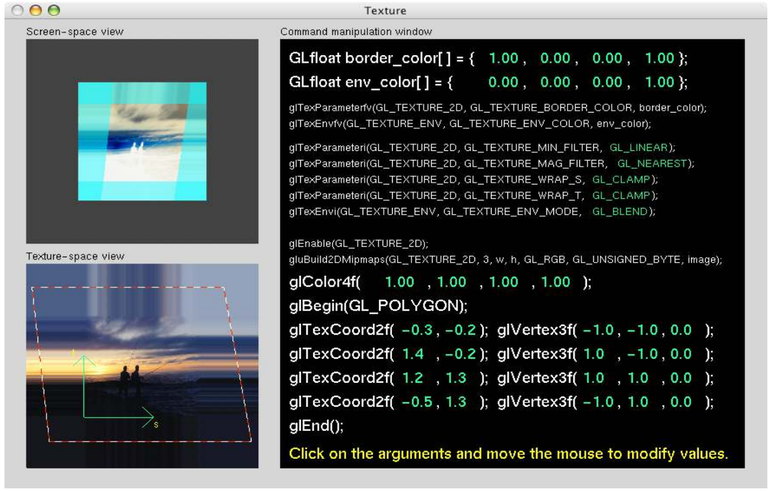
- Was geschieht, wenn Texturkoordinaten außerhalb [0,1]x[0,1] definiert werden?

```
glTexParameteri( GL_TEXTURE_{12}D, name, value )
```

name = GL_TEXTURE_WRAP_{ST}

value = GL_CLAMP: Werte <0 werden auf 0, Werte >1 auf 1 gezogen

value = GL_REPEAT: nur der Nachkommaanteil wird verwendet
(dadurch wird die Textur effektiv wiederholt)



http://www.xmission.com/~nate/tutors.html

Textur-IDs

FYI (nicht klausurrelevant)

- Während des Renderings einer Szene benötigt man viele verschiedene Texturen
- Jedesmal **`glTexImage2D()`** ist ineffizient
- Lösung: alle Texturen gleichzeitig auf der Karte halten
- IDs generieren:

```
glGenTextures( GLint n, GLuint * indices )
```

findet **`n`** unbenutzte Textur-IDs und legt sie in **`indices`** ab

- Umschalten der aktuell aktiven Textur:

```
glBindTexture( GL_TEXTURE_{12}D, GLuint id )
```

- Achtung: **dadurch werden alle Textur-relevanten Teile des Zustandes umgeschaltet!**

- Zusammen:

```
unsigned int tex[N];
glGenTextures( N, tex );
glBindTexture( GL_TEXTURE_2D, tex[0] );
pixels = loadImage(…);
glTexImage2D( GL_TEXTURE2D,
      0,     // mipmap level
      3,     // components [1,2,3,4]
      width, height, border,
      format,      // of the pixel data (GL_RGB..)
      type,     // GL_FLOAT...
      pixels );    // the data
glTexParameteri( GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_S, GL_CLAMP );
...           // more params (e.g. glTexEnv)
glBindTexture( GL_TEXTURE_2D, tex[1] );
pixels = loadImage(...);
glTexImage2D( GL_TEXTURE2D, ...);
```

```
// 1-tes Objekt
glBindTexture( GL_TEXTURE_2D, tex[0] );
glBegin( GL_... )
  glTexCoord2f(...);
  glNormal3f(...);
  glVertex3f(...);
  ...
glEnd();
// 2-tes Objekt
glBindTexture( GL_TEXTURE_2D, tex[1] );
glBegin( GL_... )
  glTexCoord2f(...);
  glNormal3f(...);
  glVertex3f(...);
  …
glEnd();
```

Texturierung mittels Shadern

- Im Vertex-Shader werden die Texturkoordinaten im Wesentlichen einfach nur "durchgereicht" (oder überhaupt erst erzeugt):

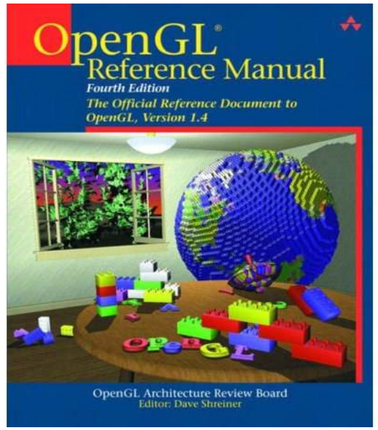
```
void main()
{
    gl_TexCoord[0] = gl_MultiTexCoord0;
    gl_Position = gl_ModelViewProjectionMatrix * gl_Vertex;
}
```

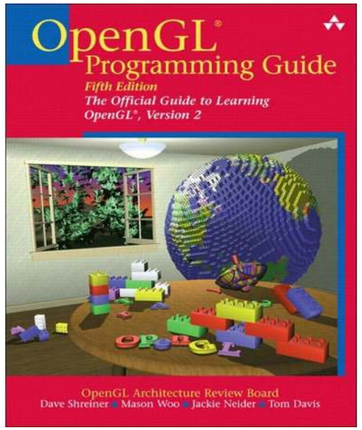
- Im Fragment-Shader geschieht dann die eigtl Texturierung:

```
uniform sampler2D textureImage;
void main( void )
{
  gl_FragColor = texture2D( textureImage, gl_TexCoord[0].st );
}
```

Zum Nachlesen Aber hier NICHT Klausur-relevant

- Texturierung an sich ist eine sehr mächtige (und etwas komplexe) Technik
- Texturierung in OpenGL ist — zwangsläufig — etwas komplexer als die meisten anderen Teile des APIs
- Besser vor einer Implementierung nochmals nachlesen





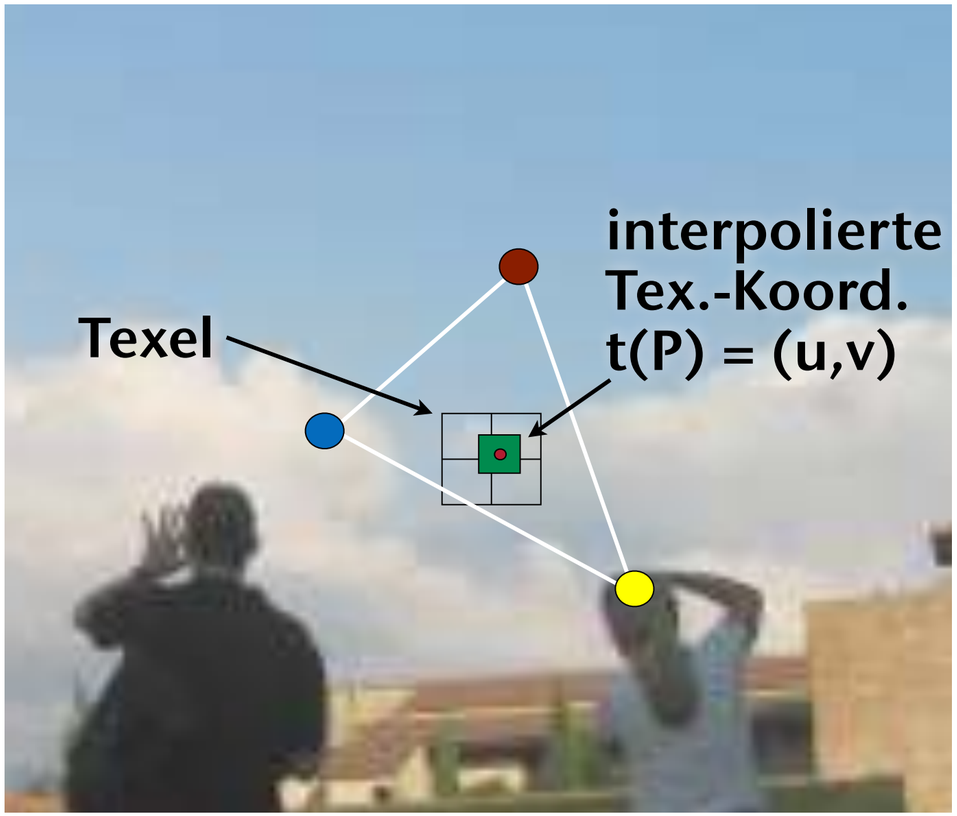
Auch als HTML auf der Homepage der CG-1-Vorlesung

Man Pages

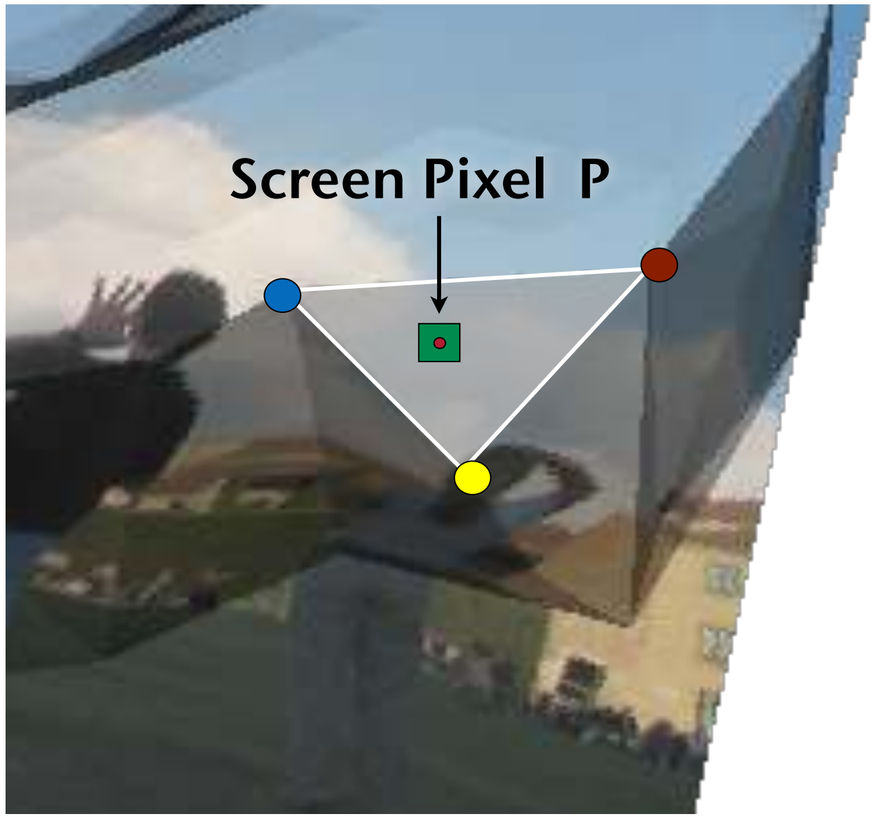
Oder im Netz unter http://www.opengl.org/sdk/docs/man/

Textur-Interpolation

Texture space



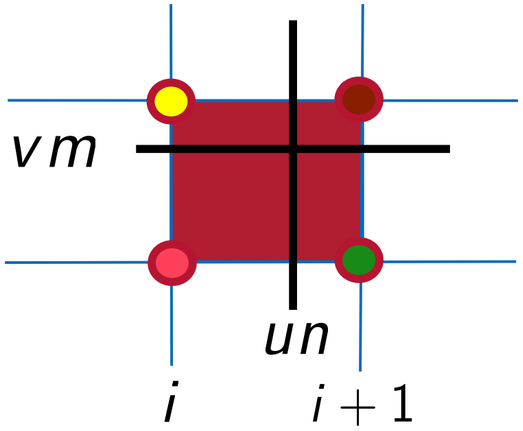
Screen space



Rekonstruktionsmethoden

- Textur = $m \times n$ Array C von Texeln,

$$t(P) = (u, v) \in [0,1] \times [0,1]$$



1. Nearest neighbour (Punktfilter):

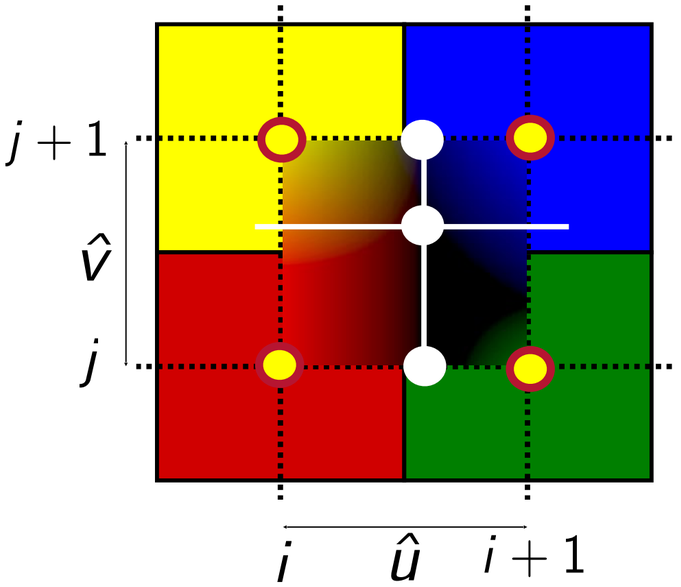
$$C_{\text{tex}} = C\big[[un], [vm]\big]$$

2. Bilineare Interpolation:

$$\hat{u} = un - \lfloor un \rfloor \ , \ \hat{v} = vm - \lfloor vm \rfloor$$

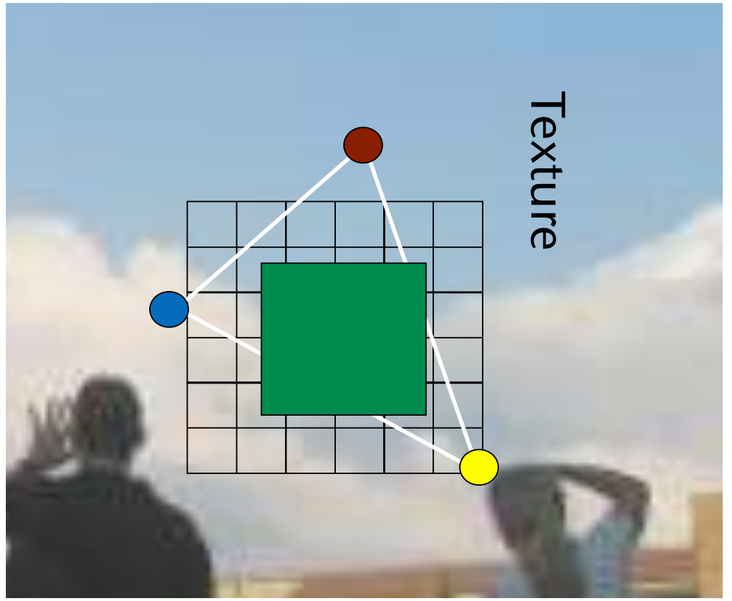
$$c = (1-\hat{u})\big((1-\hat{v})\blacksquare + \hat{v}\,\blacksquare\big) +$$

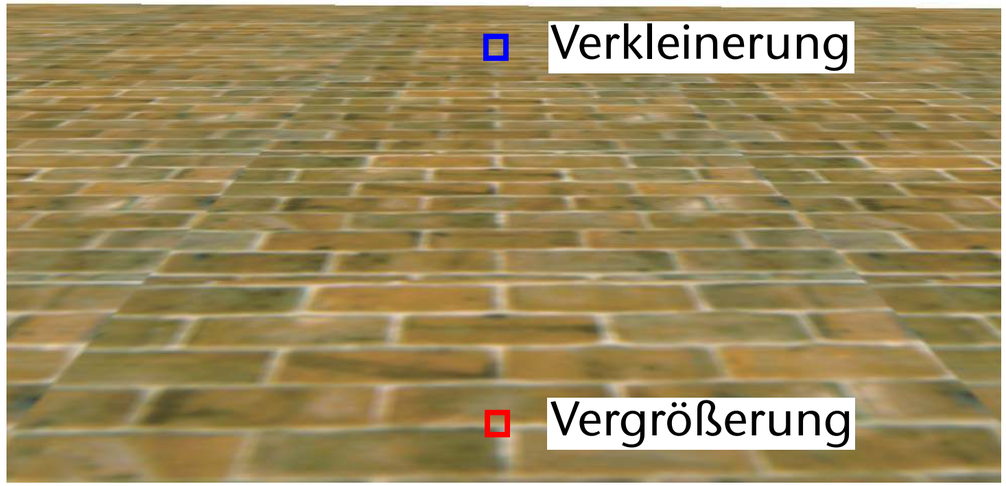
$$\hat{u}\big((1-\hat{v})\blacksquare + \hat{v}\,\blacksquare\big)$$

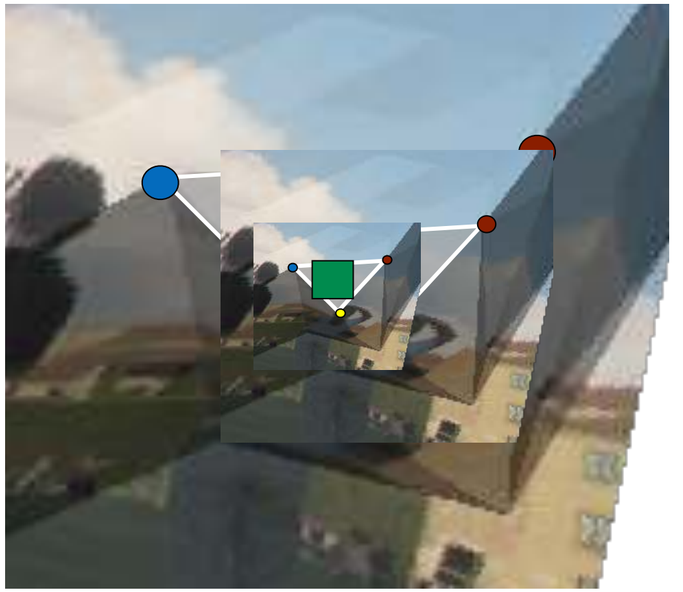


Texturverkleinerung

- Bilineare Interpolation ist OK, wenn Pixelgröße ≤ Texelgröße
  - Wir sind rel. dicht am Polygon dran
  - Ein Texel überdeckt ein oder mehrere Pixel
- Was passiert, wenn man vom Polygon "weg-zoomt"?



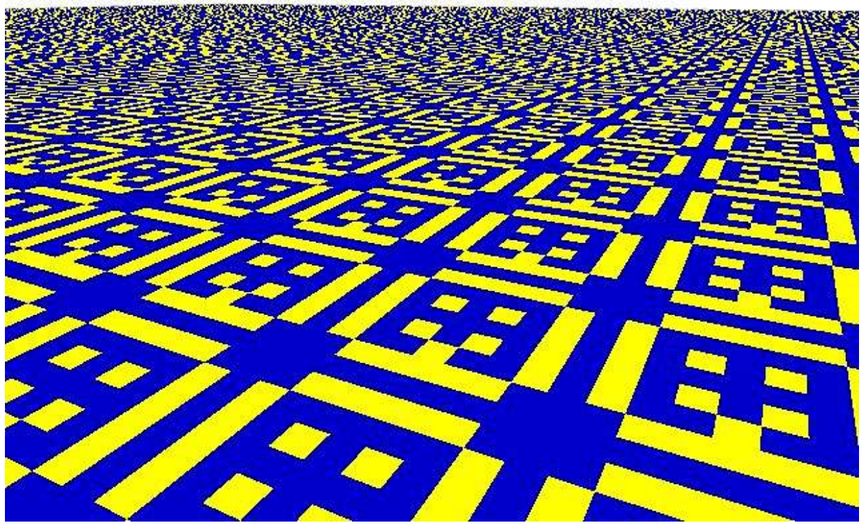


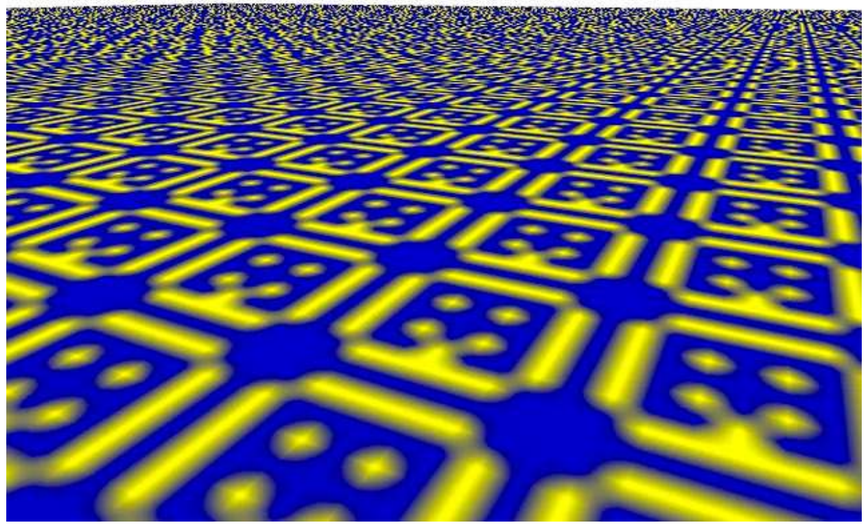


- Nicht-triviales Problem

1. Einfacher Punktfilter → Aliasing
2. Lineare Interpolation hilft nur wenig

- Es gibt viele Möglichkeiten zur Lösung



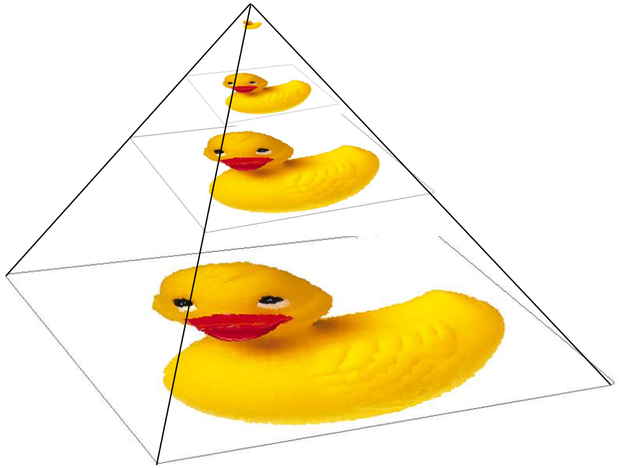


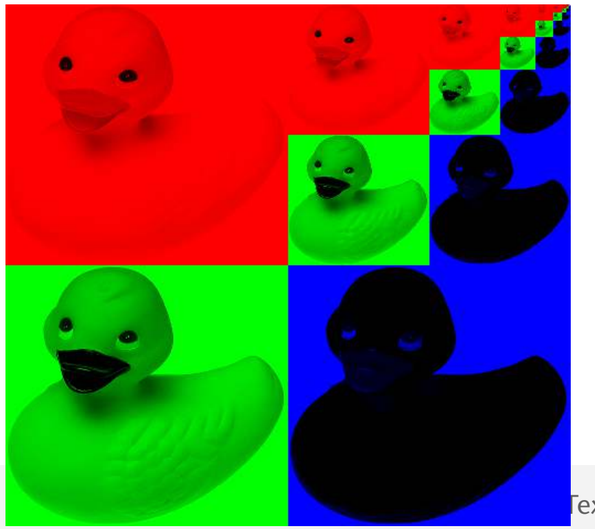
- Bei starker Verkleinerung müsste eigentlich eine Mittelung von vielen Texeln durchgeführt werden, da sie alle auf dasselbe Pixel auf dem Bildschirm abgebildet werden
- Für Echtzeitanwendungen und Hardwarerealisierungen ist das zu aufwendig
- Lösung: Preprocessing
  - Vor dem Start verkleinerte Versionen der Textur anlegen, in der die Texel schon gemittelt sind
  - Wenn jetzt viele Texel auf einen Bildschirmpixel abgebildet werden, wird die beste passende Verkleinerung verwendet anstatt der Originaltextur

MIP-Maps (lat. "multum in parvo" = Vieles im Kleinen")

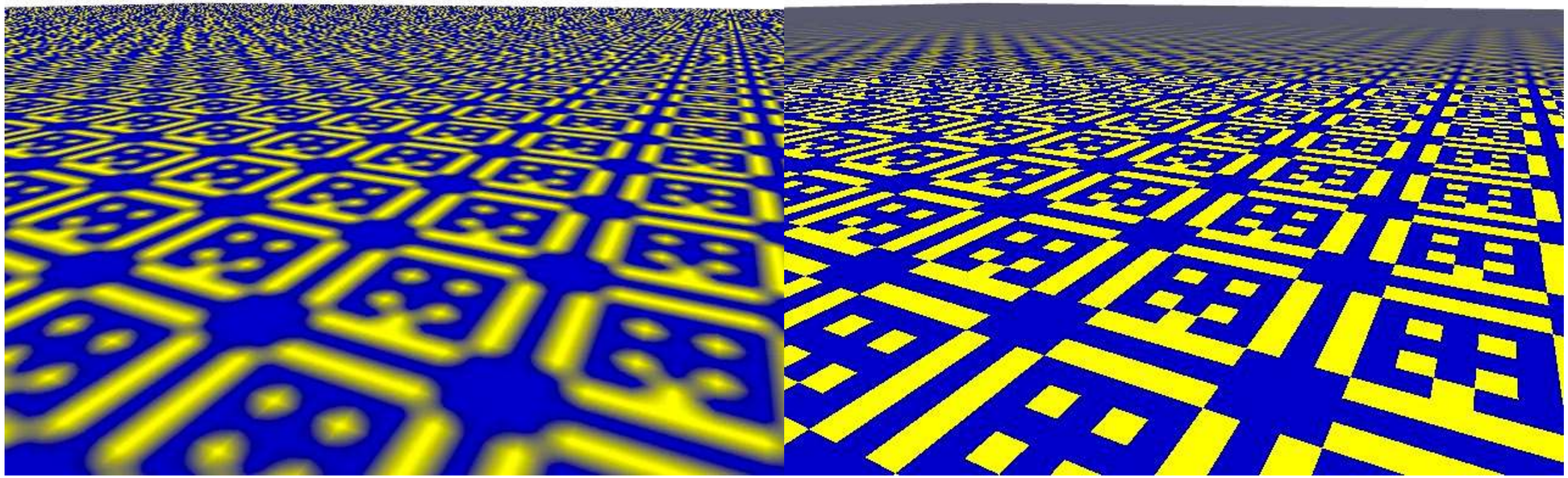
MIP-Maps

- Eine MIP-Map ist eine "Bild-Pyramide":
  - Jeder Level entsteht aus dem darunter durch Zusammenfassen mehrerer Pixel und hat nur die Größe 1/4
  - Daher: orig. Bild muß 2^nx2^n groß sein!
  - Einfachste Art der Zusammenfassung: 2x2 Pixel mitteln
  - Oder: irgend einen anderen Bild-Filter anwenden
- Intern wird ein 2^n-Bild in einem 2^{n+1}-Bild gespeichert
- MIP-Map hat Speicherbedarf 1.3x Orig.





- Abhängig von der Distanz des Betrachters zum Pixel wird von OpenGL entschieden, welcher Texturlevel sinnvoll ist (pro Pixel)
- Der ideale Level ist der, bei dem 1 Texel auf 1 Pixel abgebildet wird



bilinear gefiltert

MIP-Map

Trilineare Filterung

- Szene mit bilinear gefilterten MIPmaps — notice the banding
- Ursache: in den meisten Fällen fällt ein Pixel "zwischen" 2 MIPmap Levels, d.h., bzgl. der Texel des unteren Levels ist das Pixel zu klein, bzgl. dem oberen Level zu groß
- Lösung: trilineare Filterung, d.h., interpoliere zwischen den 4+4 Texeln des oberen und des unteren Levels, zwischen denen das Pixel (im uv-Raum) liegt

Filterspezifikation in OpenGL

- Magnification:

```
glTexParameteri( GL_TEXTURE_2D,
                 GL_TEXTURE_MAG_FILTER , param )
```

  - *param* = **GL_NEAREST**: Punktfilter

    = **GL_LINEAR**: bilineare Interpolation

- Minification:

```
glTexParameteri( GL_TEXTURE_2D,
                 GL_TEXTURE_MIN_FILTER , param )
```

  - *param* wie bei Magnification, aber zusätzlich

GL_NEAREST_MIPMAP_NEAREST: wähle "näheste" Mipmap, und daraus nähestes Texel

GL_LINEAR_MIPMAP_LINEAR: wähle die beiden nähesten Mipmap-Levels, dazwischen trilineare Interpolation

Mipmaps in OpenGL

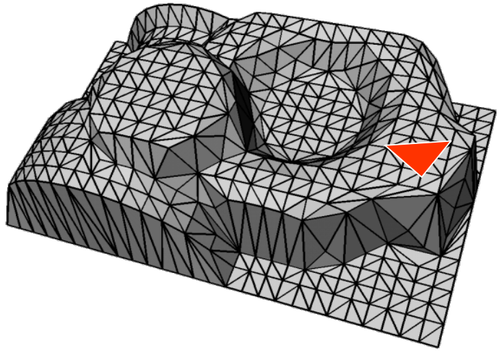
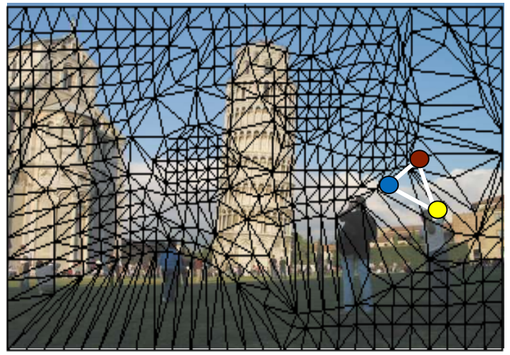
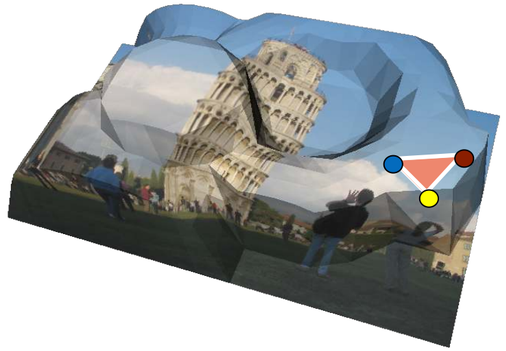
- Der **`level`** Parameter von **`glTexImage2D`** bestimmt, welcher Level der Mipmap gesetzt wird
- 0 ist die größte Map, jede weitere hat dann halbe Größe, bis hin zu 1x1
- Alle Größen müssen vorhanden sein
- Hilfsfunktion:

```
gluBuild{12}DMipmaps( target, components,
        width, [height,] format, type, data )
```

mit Parametern wie **`glTexImage{12}D()`**

Einfache Parametrisierung

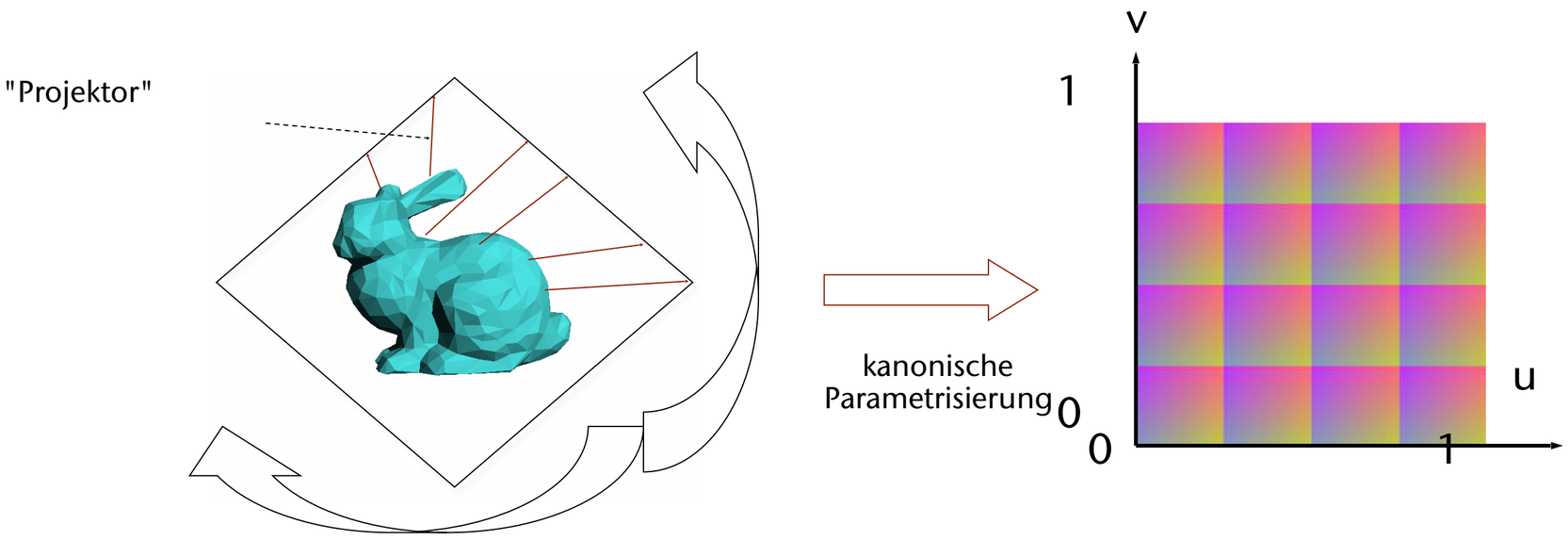
- Wie kommt man zu den Texturkoordinaten an jedem Vertex?
- Triviale Texturierung eines Terrains:
  - 3D-Koordinaten nach unten projzieren

  - Achtung: dies ist nicht notwendig eine "gute" Texturierung!

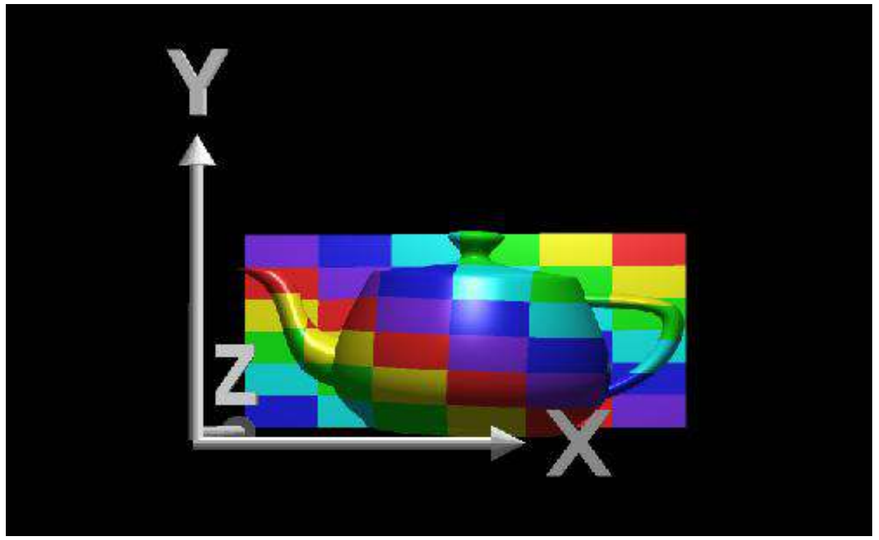
- Einfache Idee: ein 2-stufiger Prozess
  - Lege (konzeptionell) einen "kanonisch" parametrisierbaren Hüllkörper um das ganze Objekt

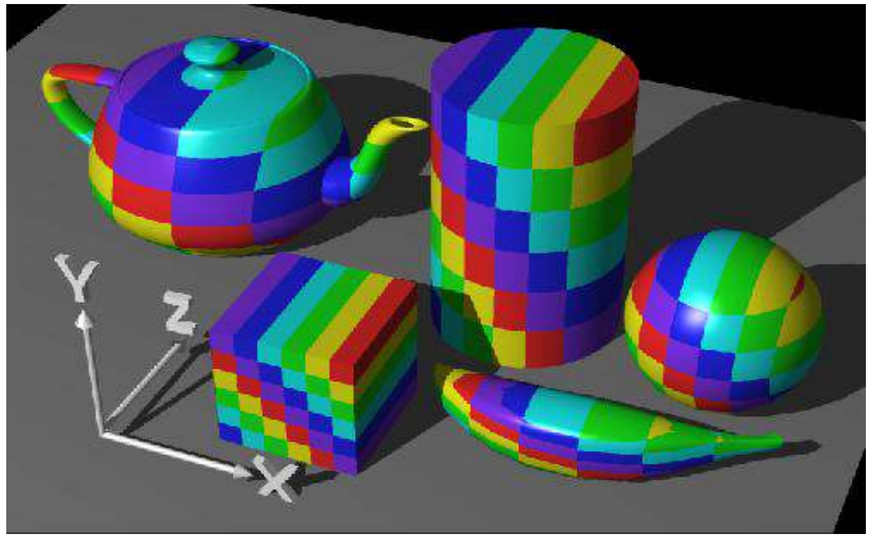
1. Projiziere Vertices (nicht notw. dessen Vertex-Koord.!) auf diesen Hüllkörper
2. Verwende die Texturkoordinaten des projizierten Punktes auf dem Hüllkörper



Einige Hüllkörper und deren Parametrisierung

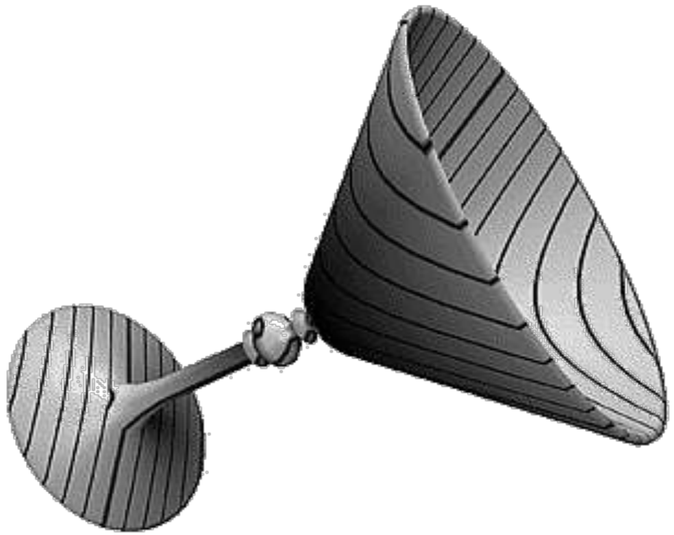
- Ebene:
  - Projiziere Punkt (x,y,z) auf Ebene
    $\rightarrow (x,y)$
  - $(u,v) = (s_x x + t_x, s_y y + t_y)$
- Verallgemeinerung:
  - Definiere 2 beliebige Ebenen E_1 und E_2
  - u := dist(P, E_1)
    v := dist(P, E_2)
  - Dieses Feature bietet OpenGL





Beispiel

- Erzeuge Höhenlinien mittels dieser Technik:
  - Verwende 1D-Textur
  - u := dist(P, E_1)

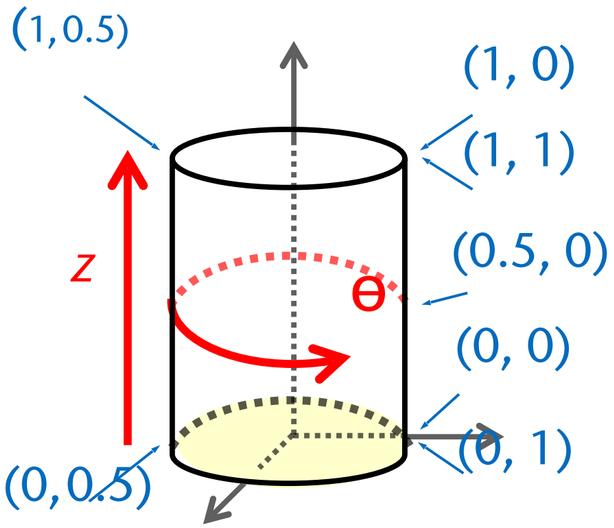


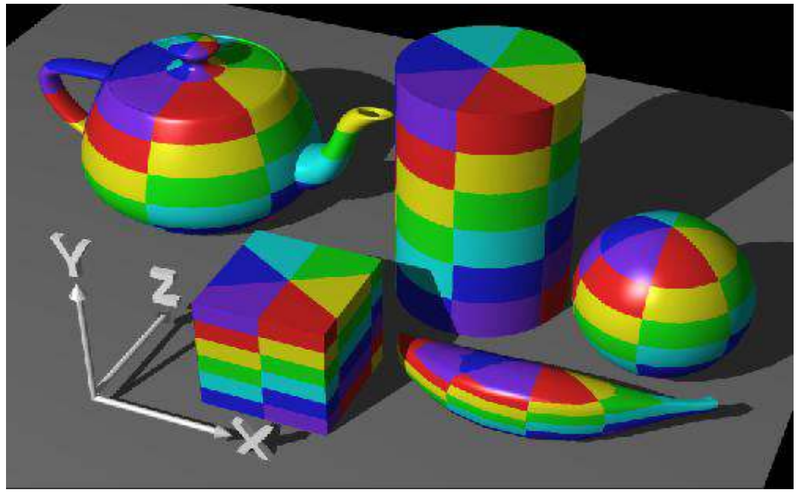
- Viele weitere ungewöhnliche Anwendungen von Texture-Mapping auf http://www.graficaobscura.com/texmap/index.html

- Zylinder-Parametrisierung:
  - Konvertiere kartesische Koord. (*x,y,z*) in zylindrische Koord.

    →

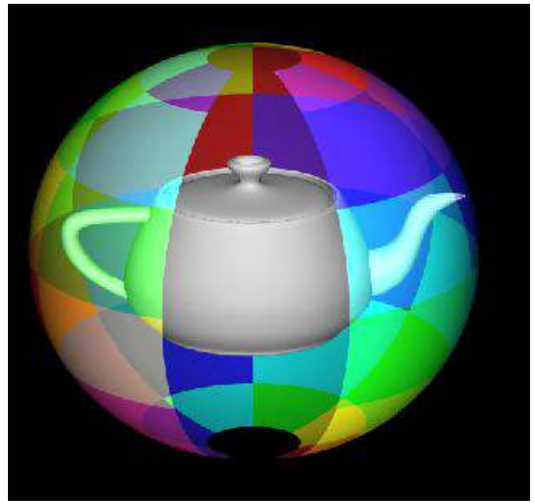
    $$(r \sin \Theta, r \cos \Theta, z)$$
  - $$(u, v) = (\Theta/2\pi, z)$$
- Beachte "Naht" bei ($\theta = 0$ & $\theta = 2\pi$)

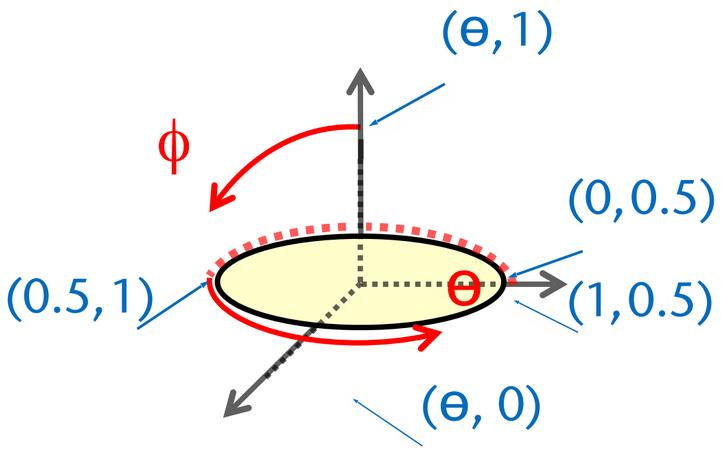


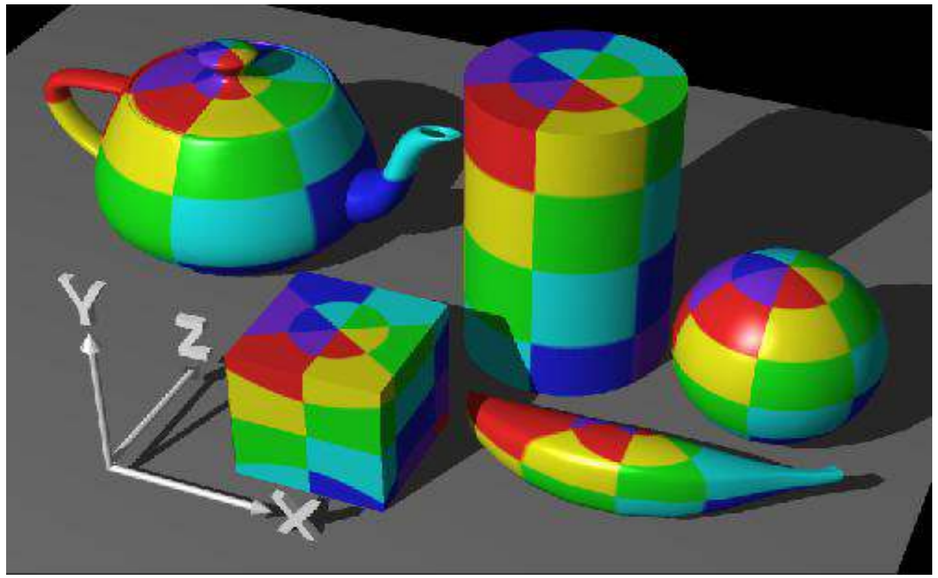


- Weiteres Beispiel für die Verwendung von Texturen: Image-Warping

- Kugel-Parametrisierung:
  - Stelle Punkt in sphärischen Koord. dar →
    $$r \cdot (\sin\theta \sin\phi, \cos\theta \sin\phi, \cos\phi)$$
  - $$(u, v) = (\theta/2\pi, \phi/\pi + 1)$$
- Beachte: Singularität bei Nord- und Südpol!

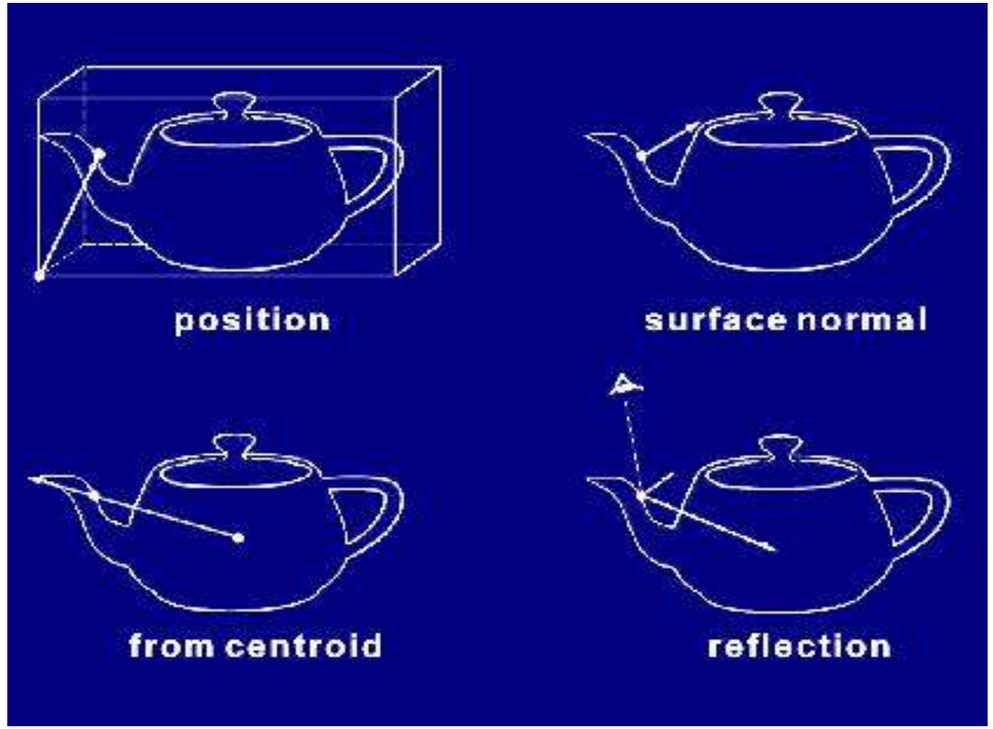




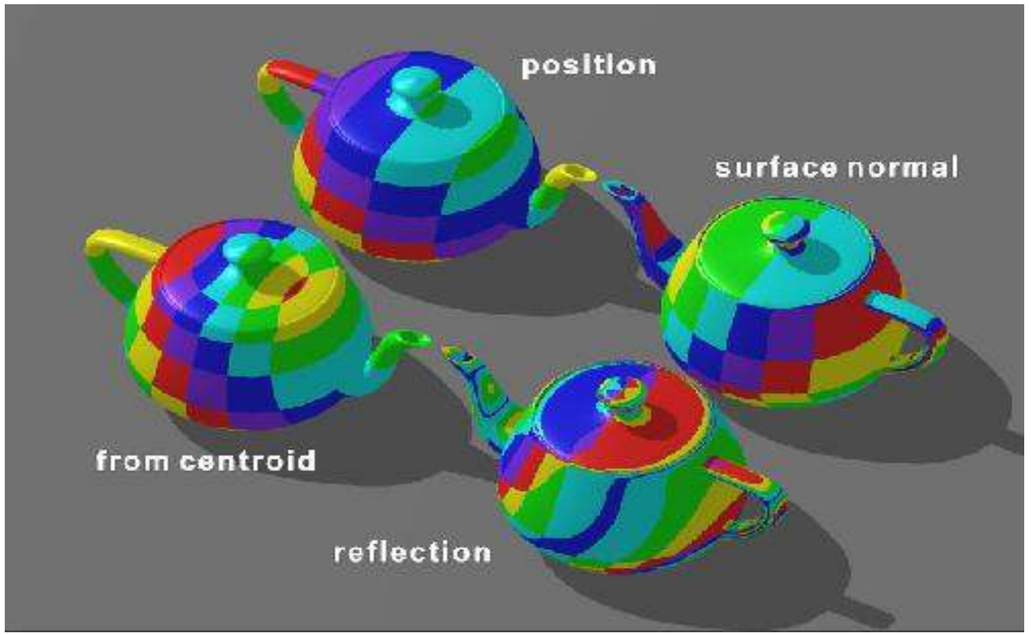


Was soll man projizieren?

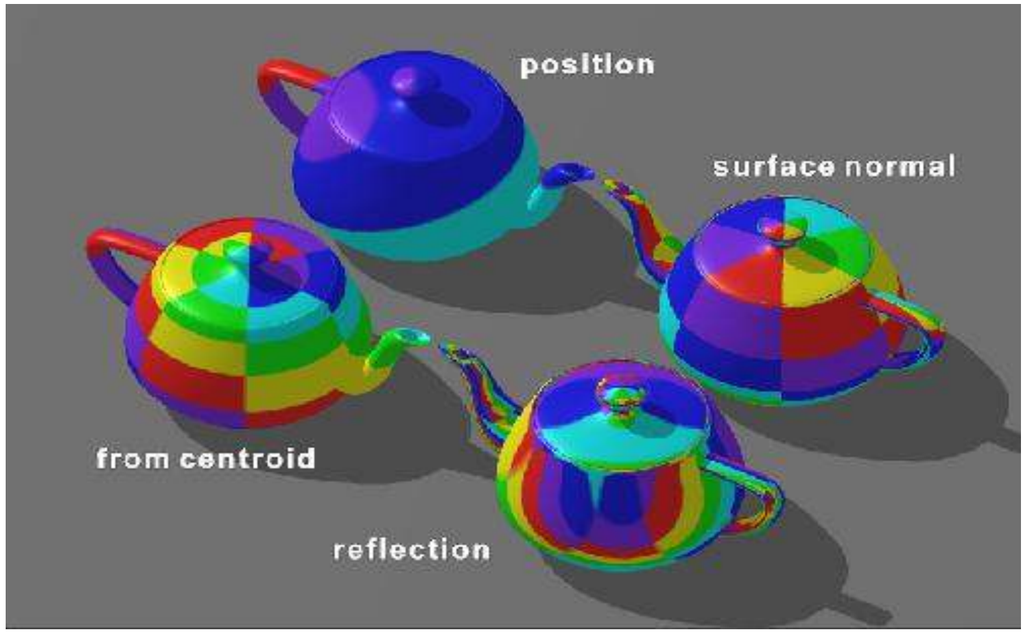
- Bisher: einfach die Koordinaten (*x,y,z*) des Vertex auf den (gedachten) Hüllkörper projiziert
- Verallgemeinerung: statt dessen kann man genauso gut (oder schlecht) andere Attribute des Vertex projizieren, z.B.
  - Normale
  - Vektor vom Zentrum des Objektes durch den Vertex
  - Reflektierter Viewing-Vektor
  - ...



- Beispiele:



planar



cylindrical

Beispiel

```
zglEnable( GL_TEXTURE_GEN_
           S );
    sglTexGeni( GL_S,

  GL_TEXTURE_GEN_MODE,

  GL_OBJECT_LINEAR );
   glTexGenfv( GL_S,

   GL_OBJECT_PLANE,
              xPlane );
```