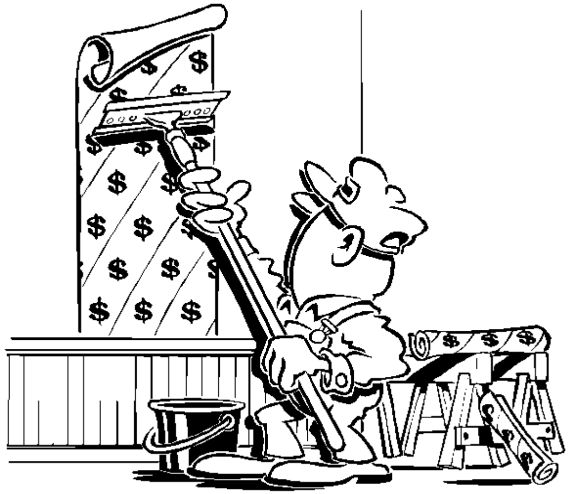
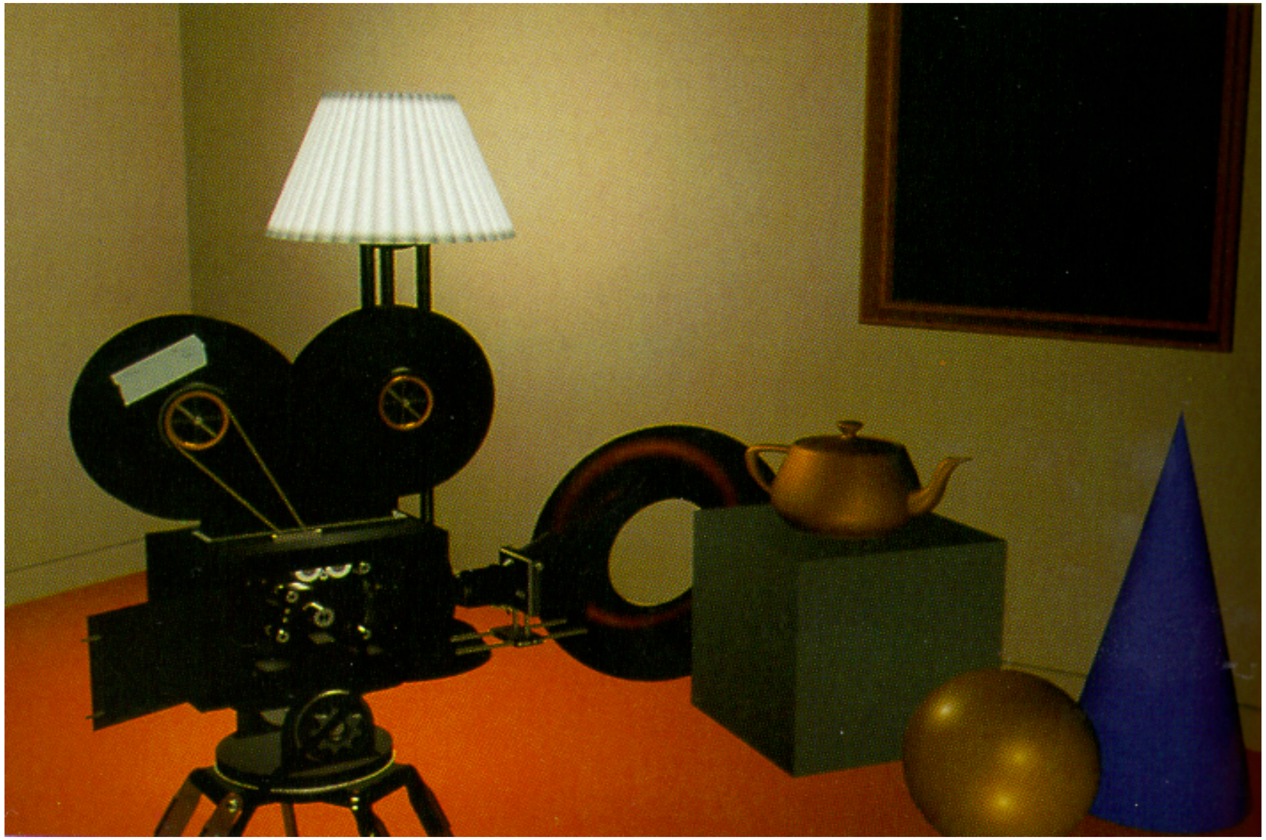
Computer-Graphik I
Texturierung



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

Motivation

- Was fehlt? …



"Shutter bug", Pixar

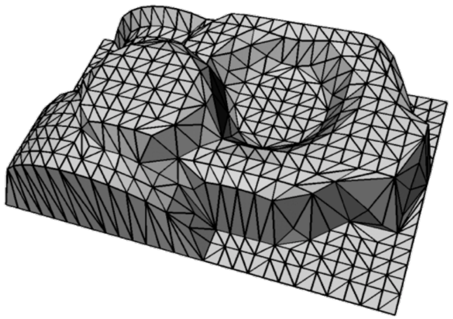
- ... Oberflächendetails

"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

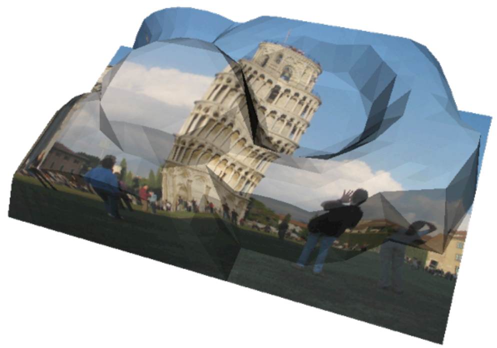
Grundidee der Texturierung

- Ziel: Visuelles Detail trotz grober Geometrie
- Idee: Objekt mit Textur „tapezieren“



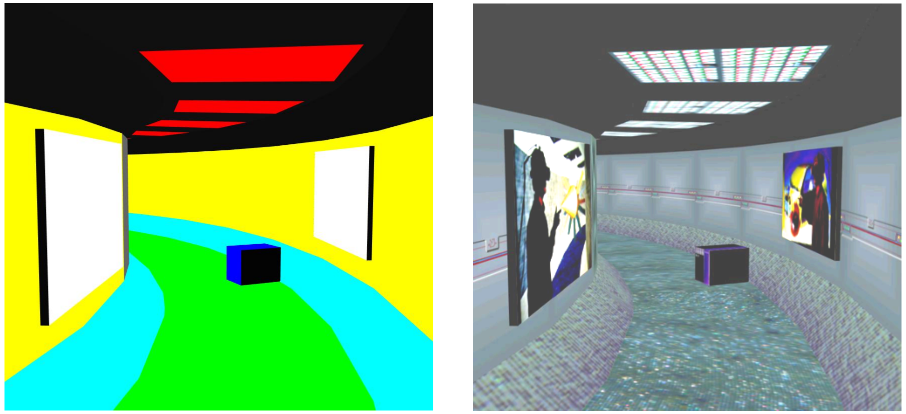
Objekt (Geometrie)

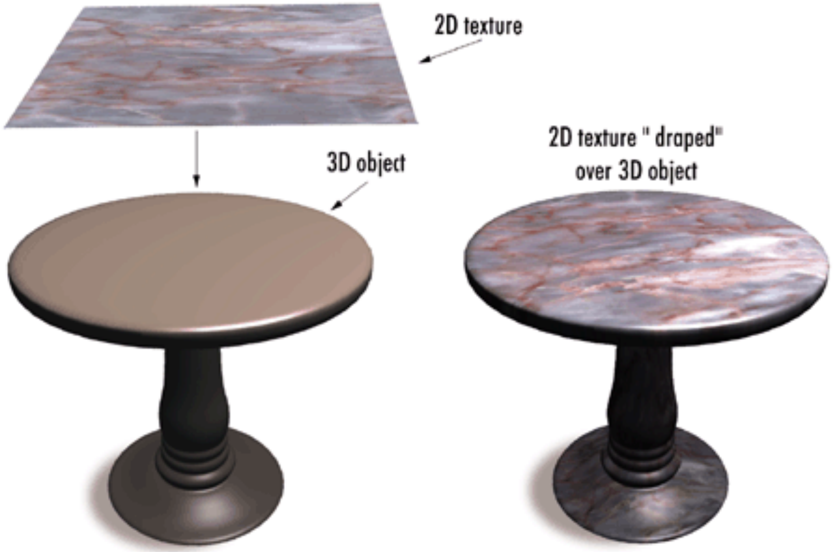
Textur (Farbe)



- Ursprung: Catmull (1974), Blinn and Newell (1976), u.a.

Weitere Beispiele





Marek Denko

- Eine "Kaustik-Textur" verstärkt den Unterwassereindruck:

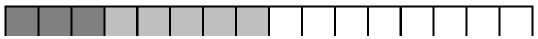
Übersicht

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

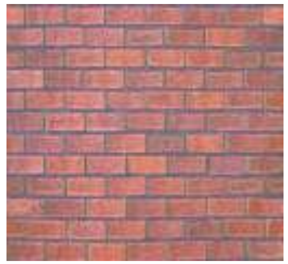
Texturen kommen in verschiedenen Dimensionen

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

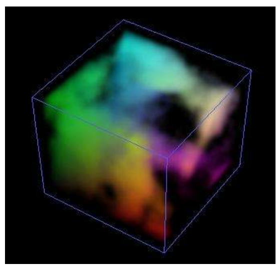
1D Texturen



2D Texturen



3D Texturen



Cubemap Texturen

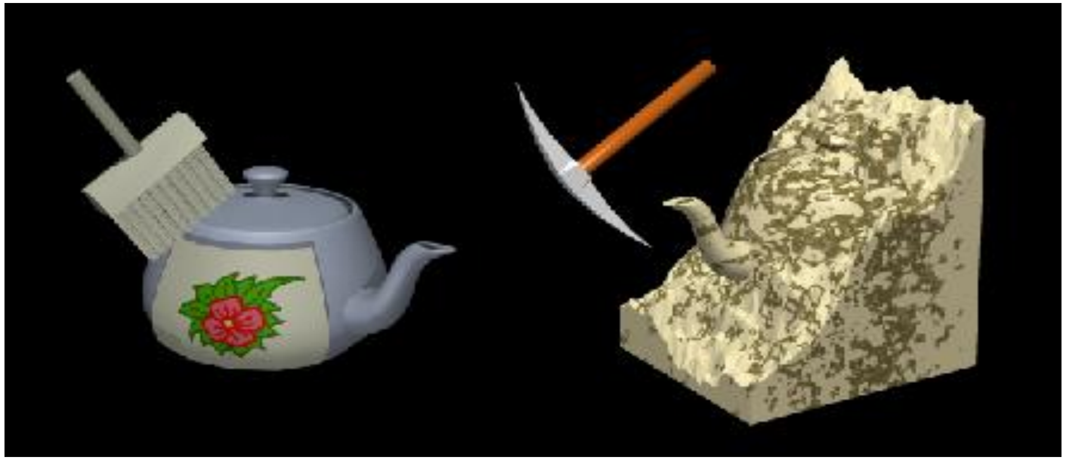
Einfacher Fall: 3D-Texturen

- 3D-Texturen nennt man auch Festkörper-Texturen (z.B. Holz und Marmor) *("solid texture")*
- Die lokalen Koordinaten der Obj.oberfläche (*x*,*y*,*z*) indizieren direkt die Textur:

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

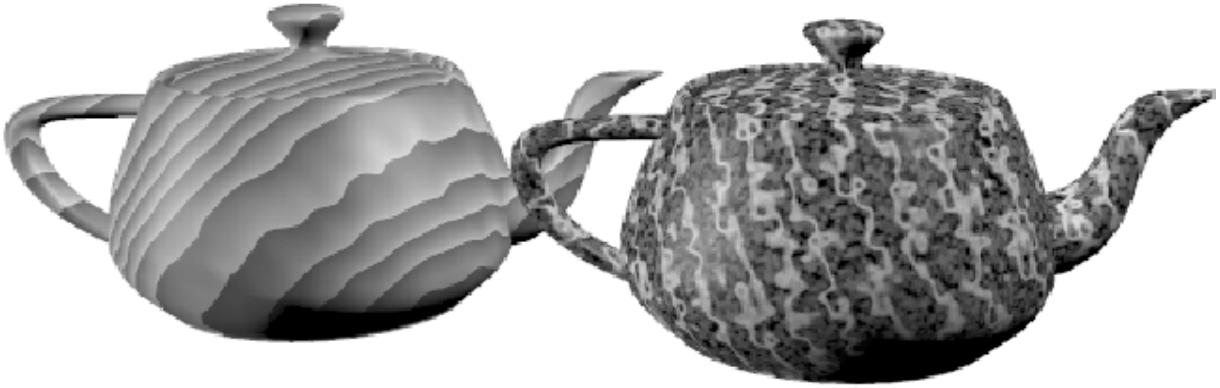
- Die Textur ist also an jedem Punkt im Raum definiert
- Das Objekt wird quasi aus dem Texturvolumen "herausgeschnitzt"

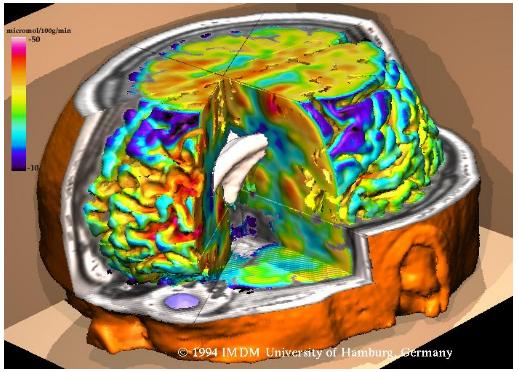
2D-Texturierung

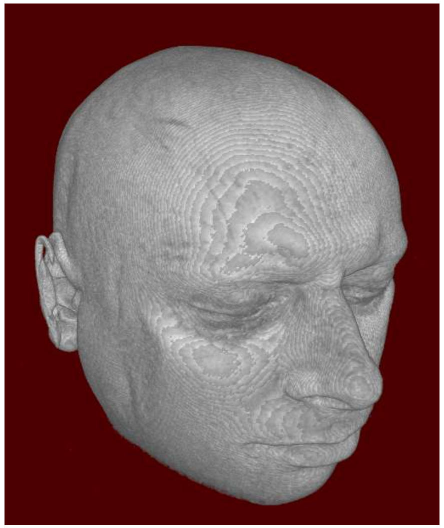


3D-Texturierung

- Beispiele:



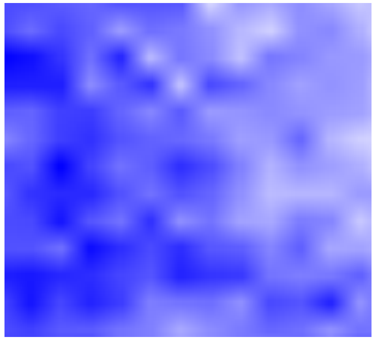
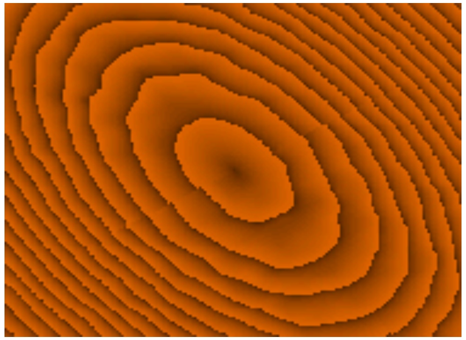
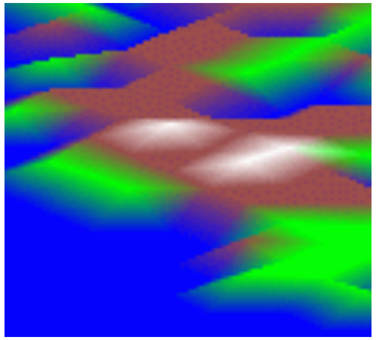
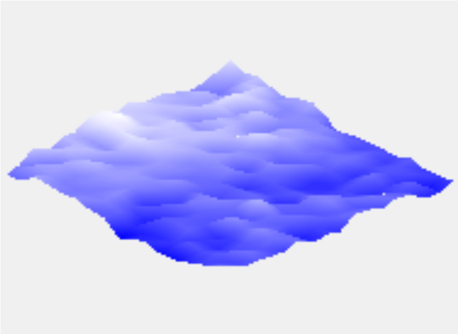




Diskrete und prozedurale Texturen

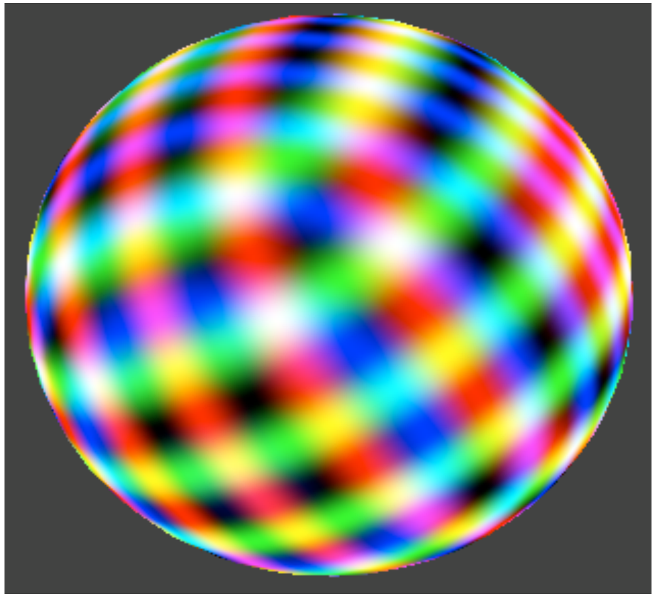
- Man unterscheidet diskrete und prozedurale Texturen
- Eine diskrete 3D-Textur = 3-dimensionales Array C[u,v,w]
  - C[u,v,w] = Vektor mit 3 Farbkomponenten, ein "Texel" (*texture element*)
  - Pro Pixel benötigt man 3 Texturkoordinaten (*u,v,w*) zum Indizieren in das Array
- Prozedurale Texturen werden bei jedem Auslesen aus einer mathematischen Funktion oder einem Algorithmus berechnet:

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

- Einfaches Beispiel für eine prozedurale 3D-Textur:

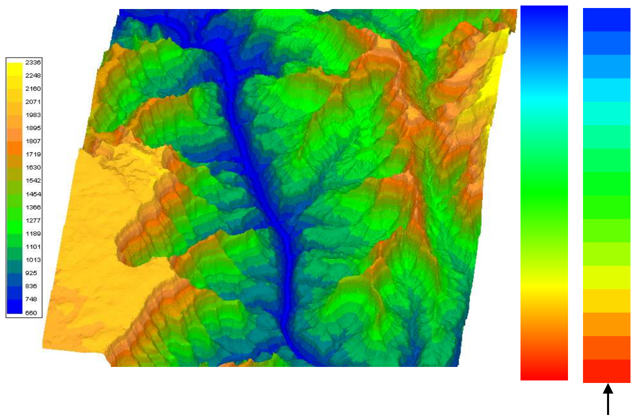
$$C = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(1+\sin(\frac{\pi}{w_x}P_x)) \\ \frac{1}{2}(1+\sin(\frac{\pi}{w_y}P_y)) \\ \frac{1}{2}(1+\sin(\frac{\pi}{w_z}P_z)) \end{pmatrix}$$



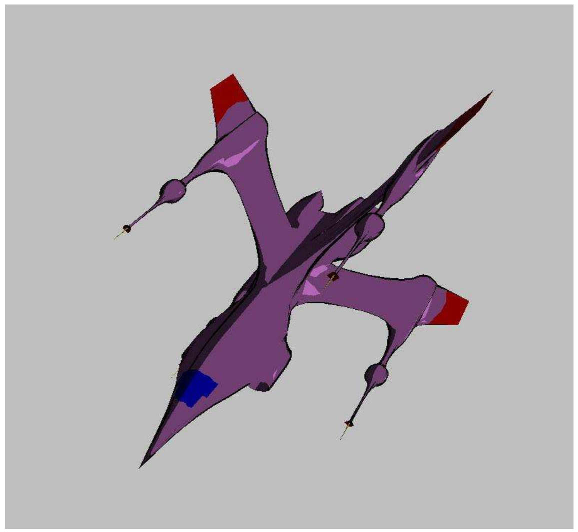
- Vorteile der prozeduralen Texturen:
  - Speicheraufwand ist minimal
  - Texturwerte können an jeder Stelle (u,v), bzw. (x,y,z) berechnet werden
  - Texturen sind im gesamten Raum definiert (kein Wrap-Around / Clamping)
  - Optimale Genauigkeit (kein Runden von Koord., keine Interpolation)
- Nachteile:
  - 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.
- Toon Shading:
  - Berechne Punktprodukt des Licht- und des Normalenvektor oder das Skalarprodukt des View- und des Normalenvektors
  - Verwende dieses als Index in die Farbtabelle (1D-Textur)



Ergibt Höhenlinien

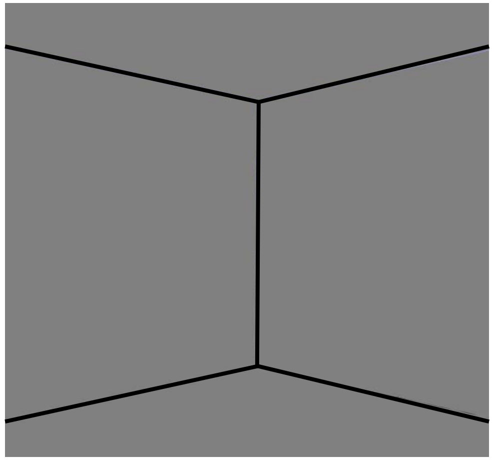
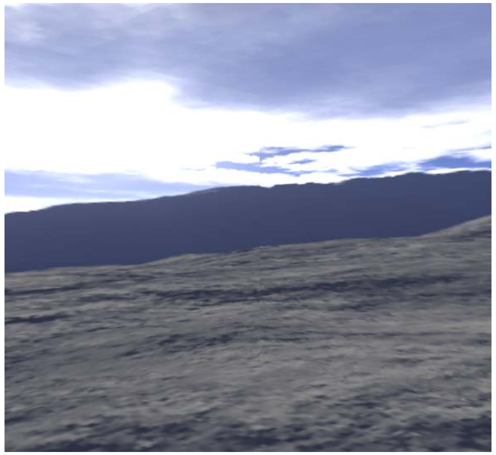
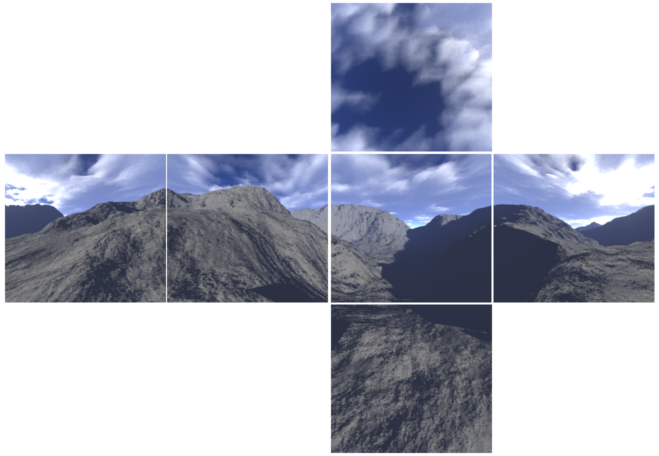


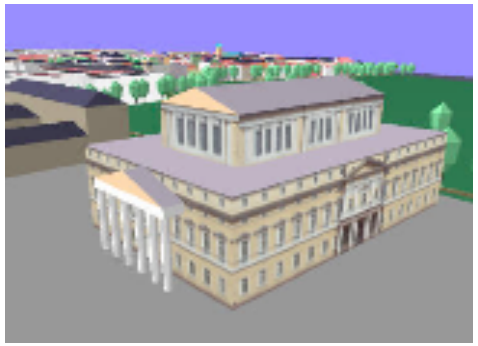
Diskrete 2D-Texturen

- 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
  - Verzerrung beim Mapping auf beliebige Fläche

Beispiel: die *Skybox*

- Die Umgebung einer virtuellen Szenen modelliert man oft durch eine Kugel oder einen Würfel mit entsprechenden Texturen



Ohne Skybox

Die Skybox

Vom Boden aus

Formalisierung der 2D-Texturen

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

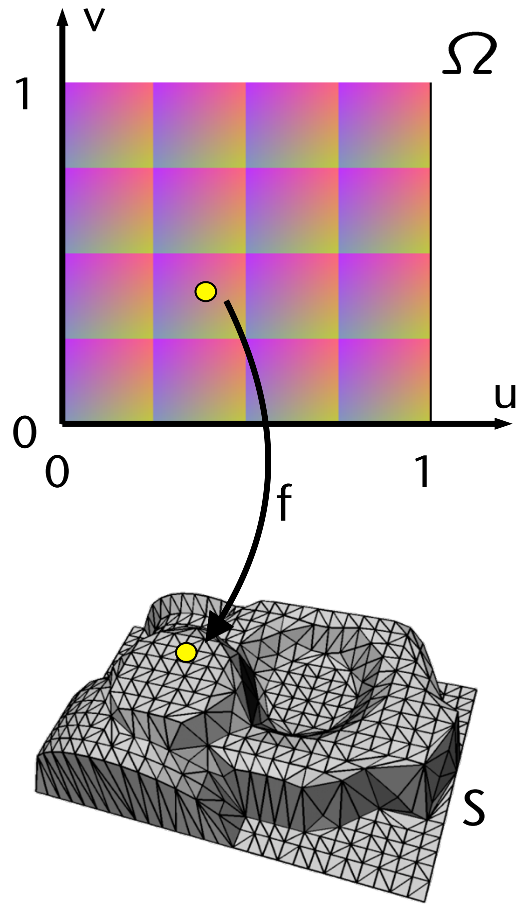
$$f : \ \Omega \leftrightarrow S$$

- Texturierung ist ein 2-stufiger Prozeß
  1. Inverses Mapping:

$$(u, v) = f^{-1}(x, y, z)$$

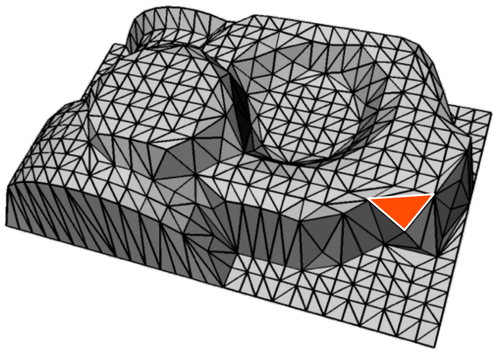
  2. Farbe:

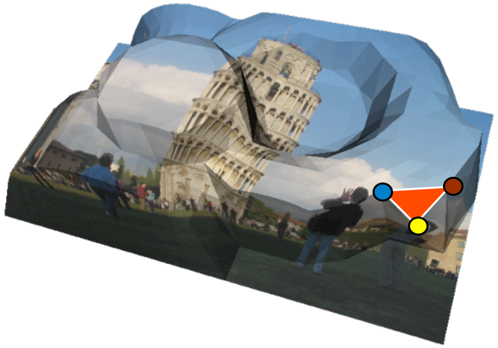
$$(r, g, b) = C_{\text{tex}}(u, v)$$

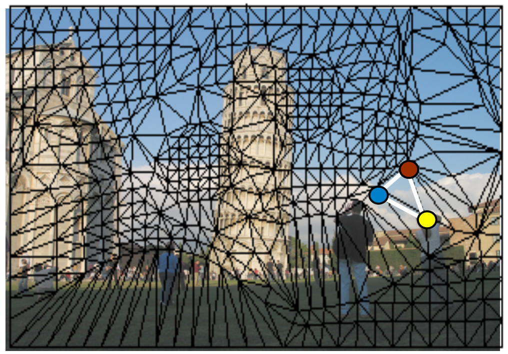


Stückweise lineare Parametrisierung durch Texturkoordinaten

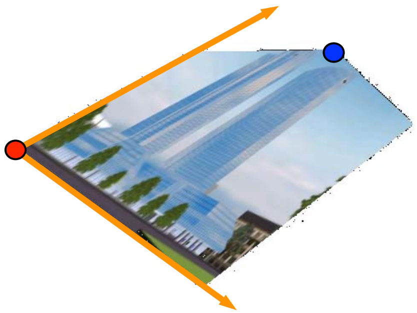
- Texturierung eines kompletten Dreiecksnetzes:

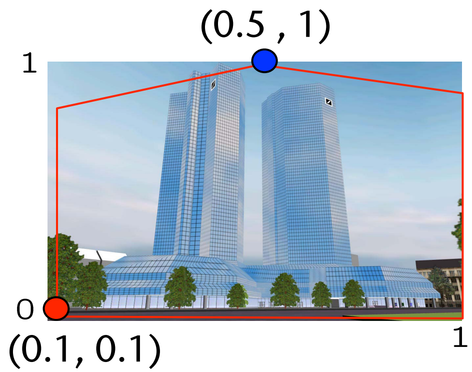






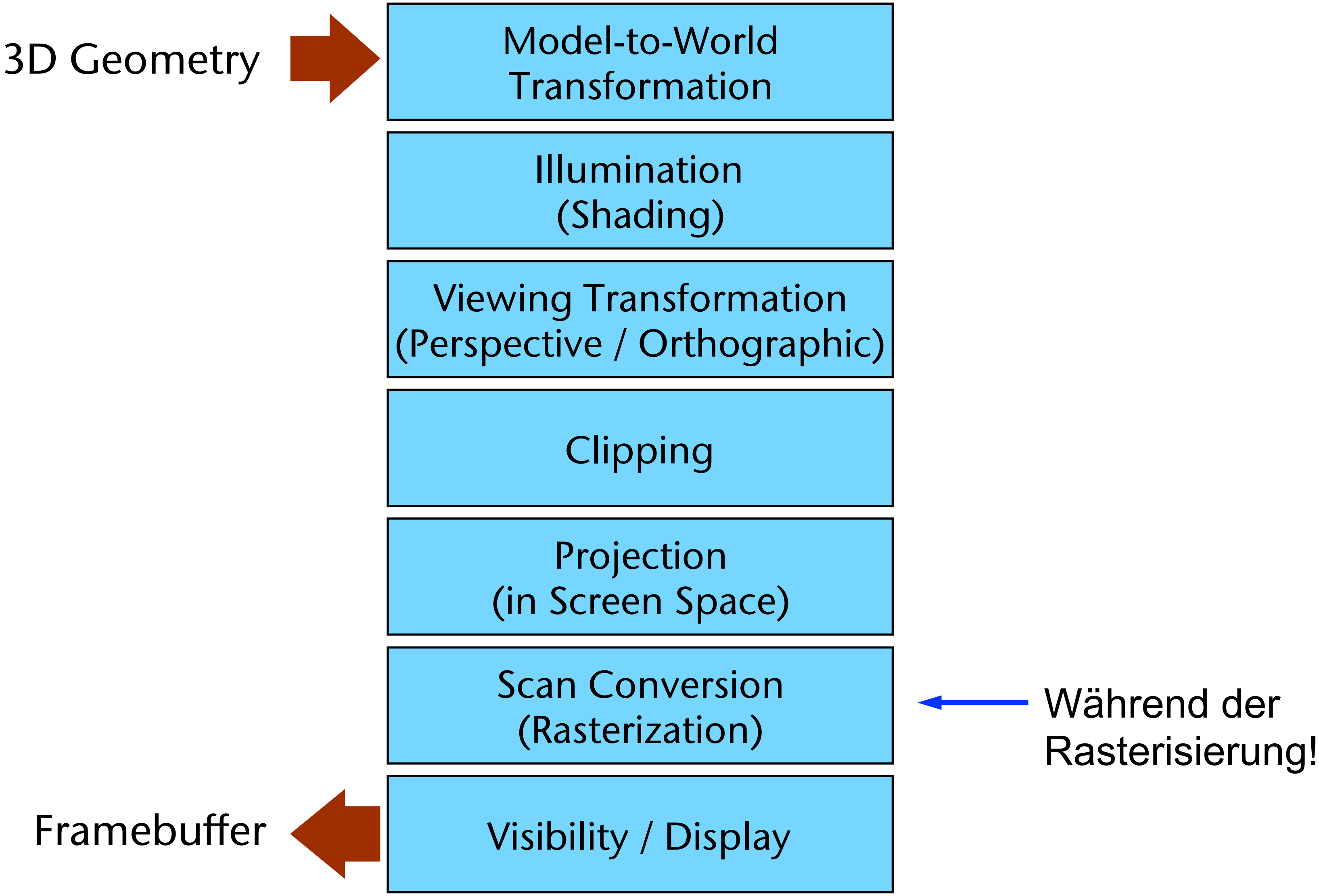
- In OpenGL: für jeden Vertex des Polygon-Meshes müssen zusätzlich Texturkoordinaten definiert / berechnet werden, die angeben, welcher Ausschnitt aus der Textur auf das Polygon gemappt wird:





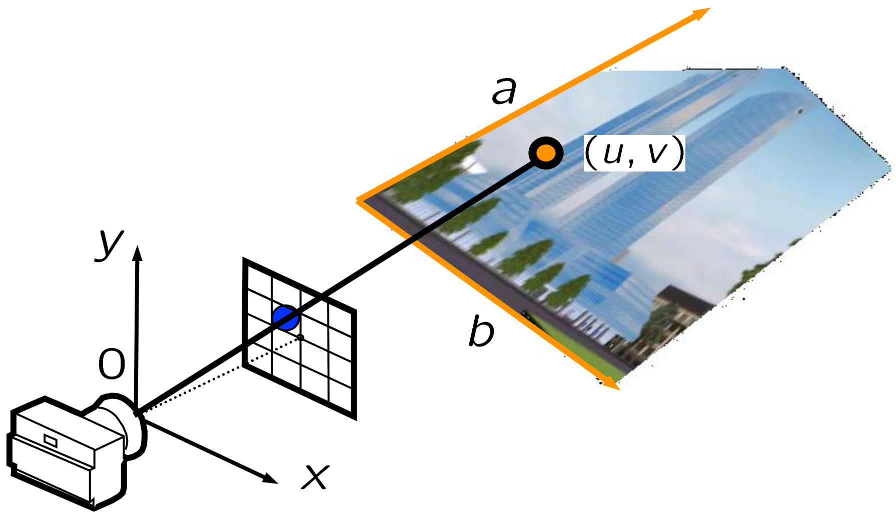

```
glBegin( GL_... )
    glTexCoord2f(…);
    glNormal3f(…);
    glVertex3f(…);
    …
glEnd();
```

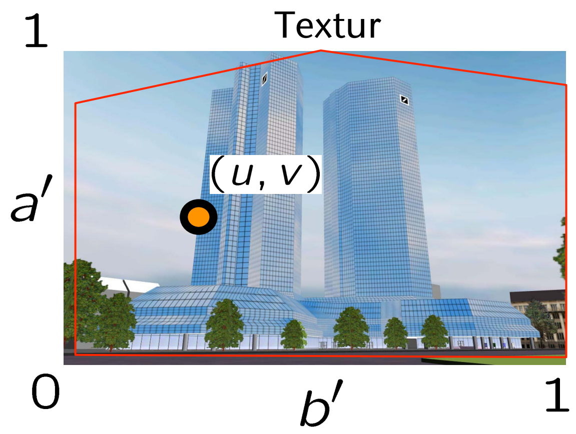
Wo in der Pipeline wird texturiert?



Interpolation der Texturkoordinaten

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

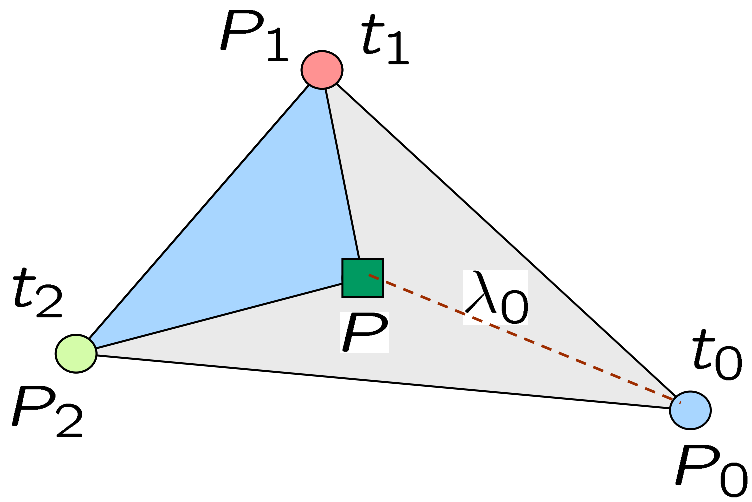




Interpolation der Textur-Koordinaten pro Fragment im Rasterizer

- Erinnerung: baryzentrische Koordinaten

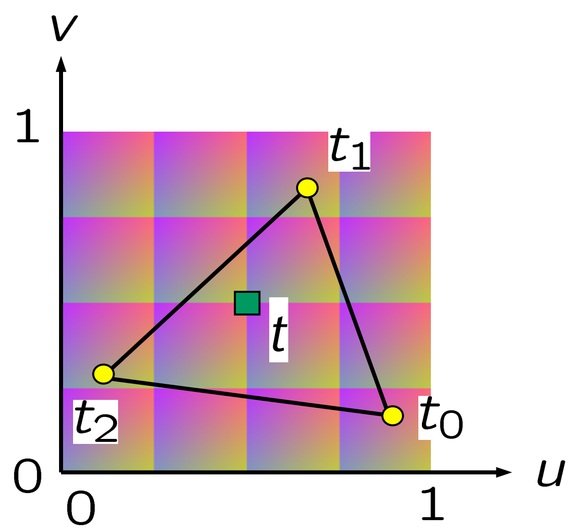
$$\lambda_i(P) = \frac{A(P, P_{i-1}, P_{i+1})}{A(P_0, P_1, P_2)}$$



- Textur-Koordinaten durch baryzentrische Interpolation:

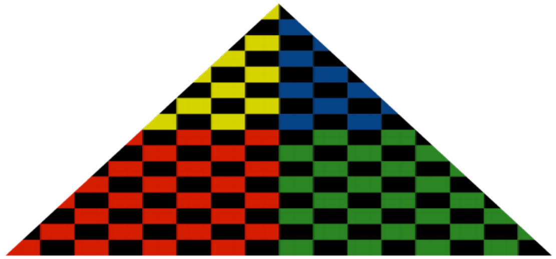
$$t(P) = \sum_{i=0}^{2} \lambda_i(P) t_i$$

$$t_i \in \mathbb{R}^2$$

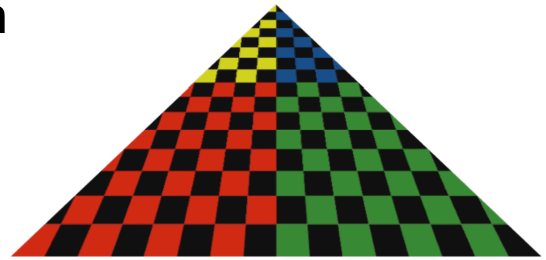


Perspektivisch korrekte Texturkoordinateninterpolation

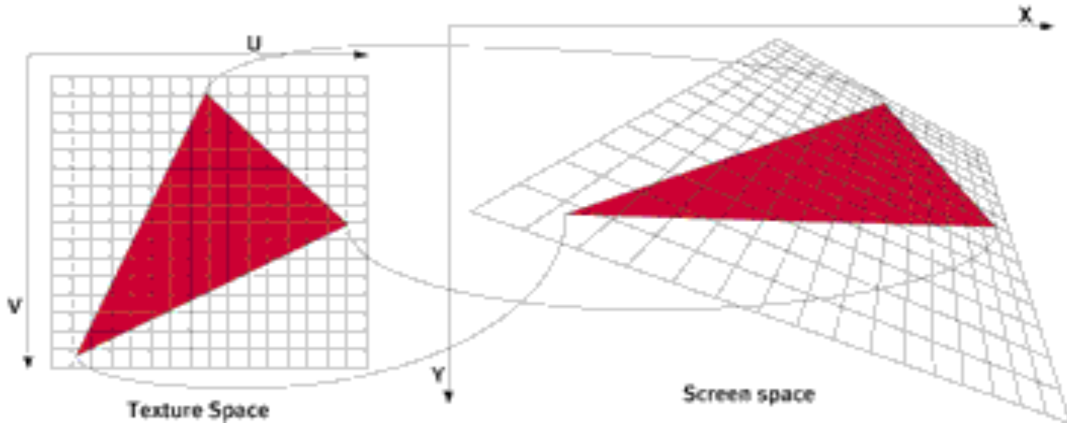
- Problem: bei dieser einfachen, linearen Interpolation im Screen Space entstehen perspektivisch inkorrekte Bilder!



- Ursache: der Rasterizer hat die Pixel-Koordinaten nur nach der perspektivischen Division!
- Ziel: perspektivisch korrekte Interpolation



Demo (mehr auf der VL-Homepage)



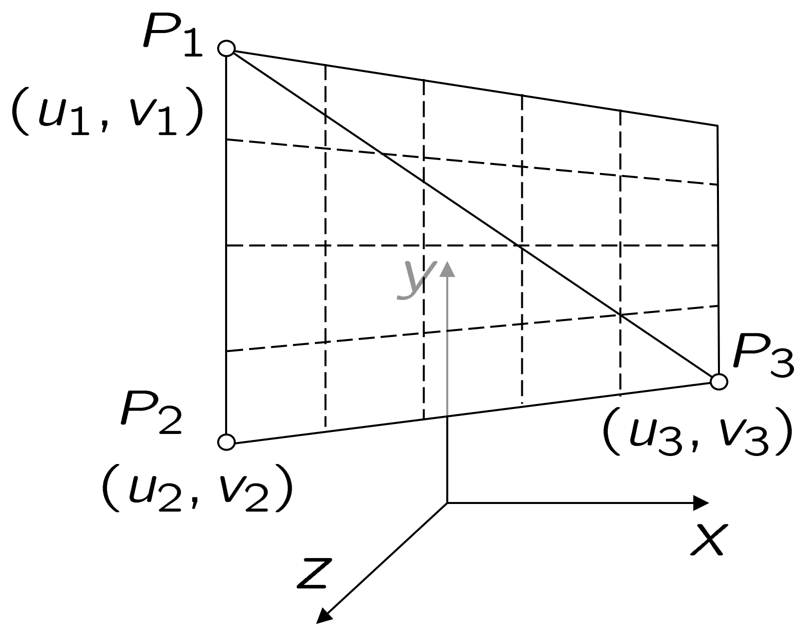
- Erinnerung: was passiert bei der perspektivischen Projektion

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

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

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

- Erinnerung: baryzentrische Koord. auf dem Rand des Dreiecks = lineare Interpolation zwischen den beiden Ecken



- Betrachte im Folgenden nur die Interpolation auf einer Linie

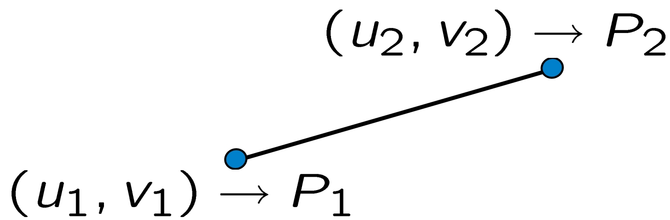
- Gegeben: *t*, zur linearen Interpolation zwischen $\hat{P}_1$ und $\hat{P}_2$, d.h.

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

- 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



- Problem:

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

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

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?

- 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:

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

- Beweis:

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

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

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

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

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

- 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., für welches *s* ist

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

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

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

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

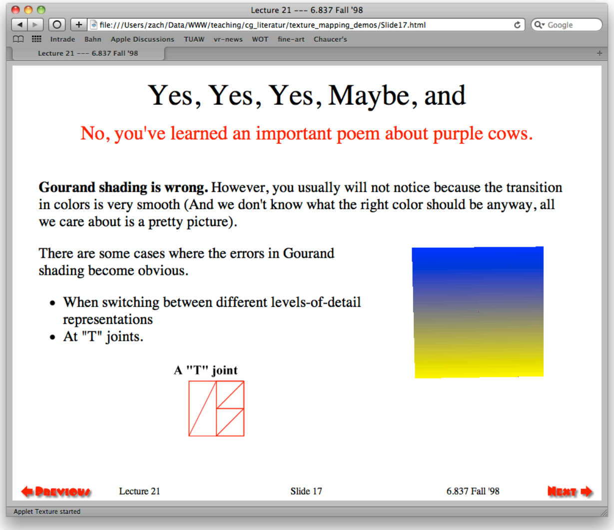
- Mit diesem *t* kann man die Texturkoordinaten *(u,v)* linear interpolieren!

- 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 …



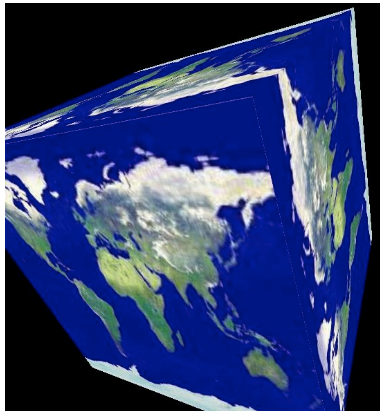
Modulation der Beleuchtung durch Texturen

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

$$L_{\text{Phong}} = r_a L_a + \sum_j \left(r_d (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_j) + r_s (\mathbf{n} \cdot \mathbf{h}_j)^m \right) L_j$$

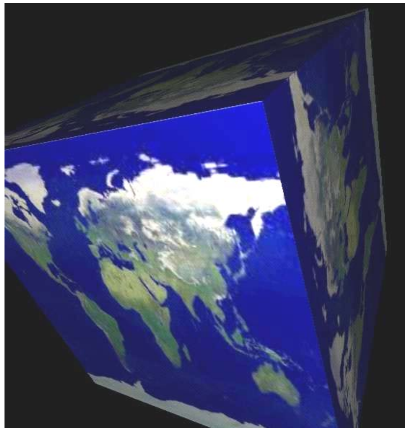
1. Ersetzen der Objektfarbe (*replace*)
   - Einfachste Art der Texturierung
   - Jegliche Beleuchtung wird entfernt

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

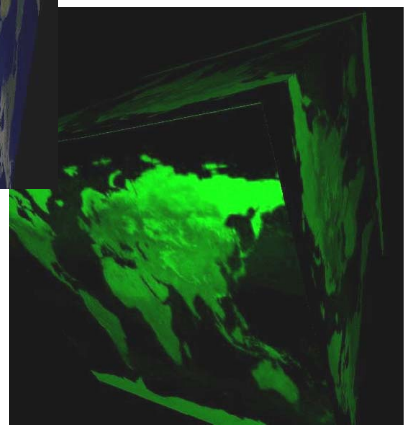


2. A posteriori Skalierung der Farbe (*modulate*)
   - Häufigste Art der Texturierung
   - Komponentenweise Skalierung des Farbwertes

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



Weißer Würfel



Grüner Würfel

Weiteres Beispiel für die Verwendung von Texturen

- Interpolation von Vertex-Farben im HSV-Raum:
  - Erzeuge eine 3D-Textur, wobei (u,v,w) als (H,S,V) interpretiert werden
  - Jedes Texel enthält den RGB-Wert, der die gleiche Farbe wie der HSV-Wert hat
  - Spezifiziere an den Vertices des Dreiecks 3(!) Texturkoordinaten, die die Farbe des Vertex im HSV-Raum angeben

3. A priori Skalierung der Materialfarbe

$$r_a = k_a \cdot C_{\mathrm{tex}}(u,v) \qquad r_d = k_d \cdot C_{\mathrm{tex}}(u,v)$$

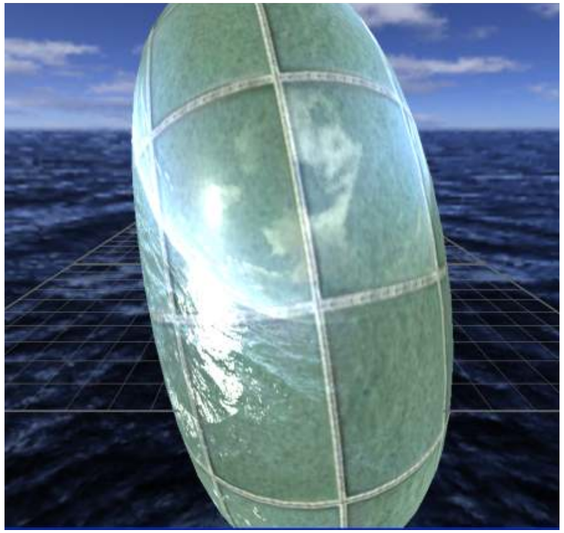
- Erinnerung: Farbe des Objektes wird durch r_a und r_d bestimmt
- Wichtig: im Unterschied zu (2) bleibt der spekulare Anteil von der Textur unbeeinflusst

4. Modulation der spekularen Reflexion (*gloss mapping*)

- Analog zu (3) für r_s

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

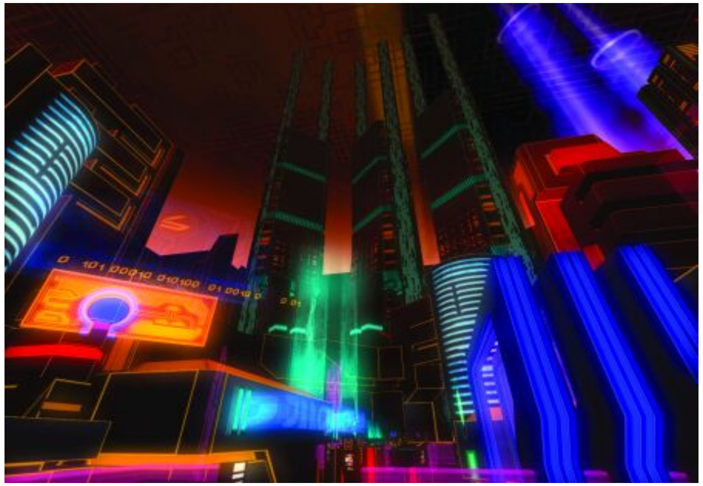
- Erlaubt Modellierung unregelmäßiger *"shininess"* (z.B. verschmutzte / fettige Flächen)
- Geht nur mit Vertex- und Fragment-Shaders



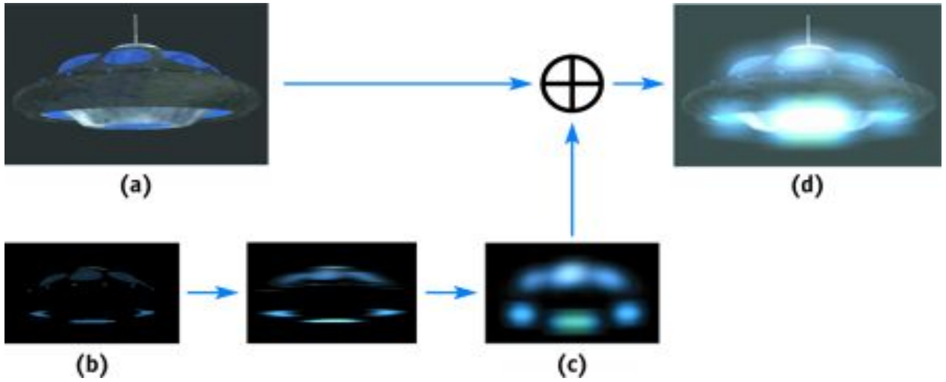
4.1 "Glow"-Effekt:

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

- For neon signs, TV, laser beams etc.

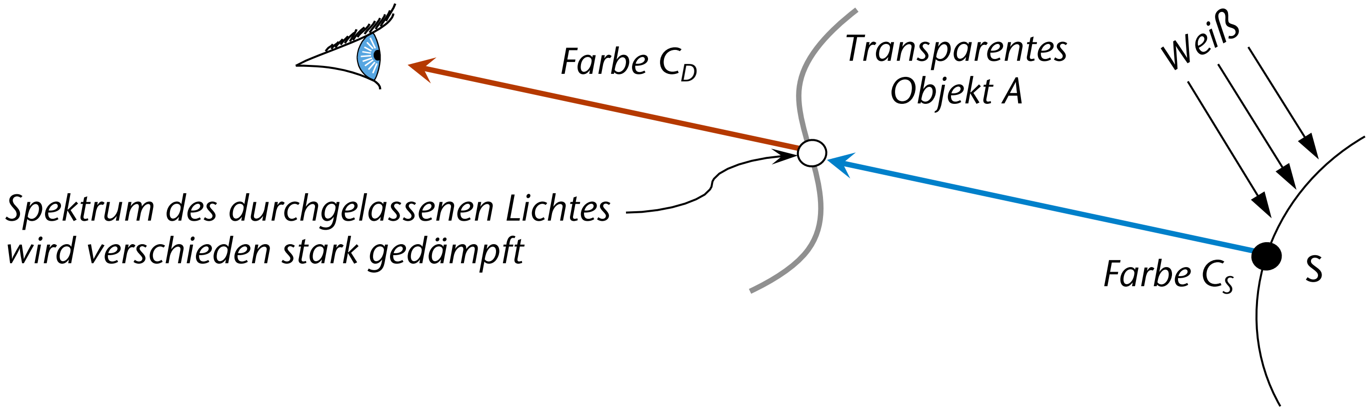


- Solche Effekte (Halos) gehen aber nur mit Multi-Pass-Rendering (Filterung):

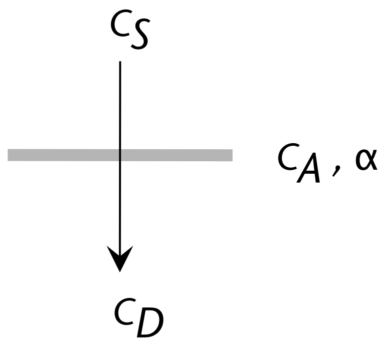


Exkurs: das Rendering transparenter Objekte

- 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:



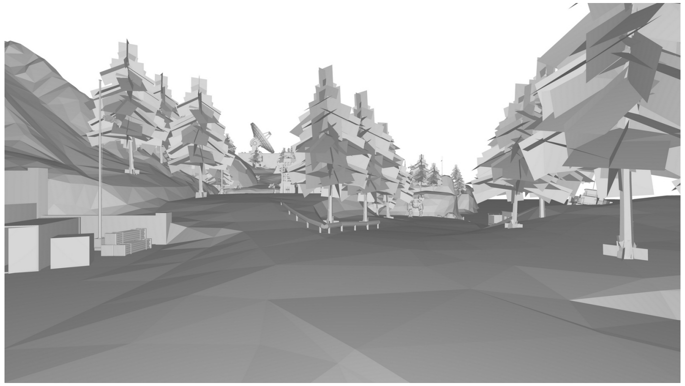
$$C_D = \alpha C_A + (1 - \alpha) C_S$$

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

5. 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

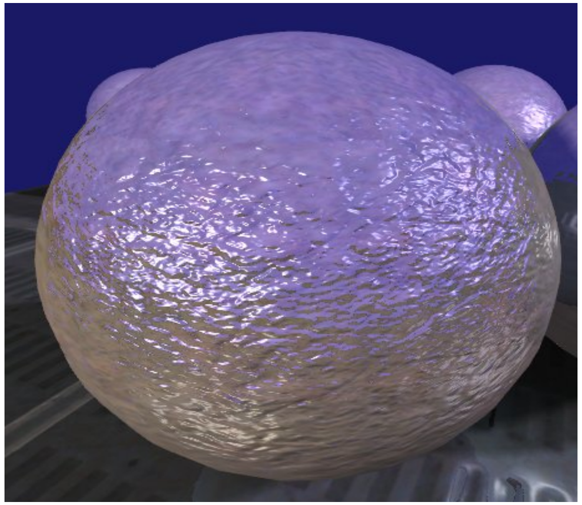


Enemy Territory: Quake Wars. Splash Damage & Intel

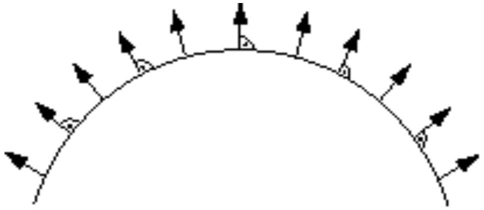
6. Perturbation der Normale (*Bump- / Normal-Mapping*)

- Speichern von Höhenwerten einer Offsetfläche in einer Textur
- Berechnung der korrigierten Normale pro Pixel aus den Höhenwerten (*Bump-Map*):

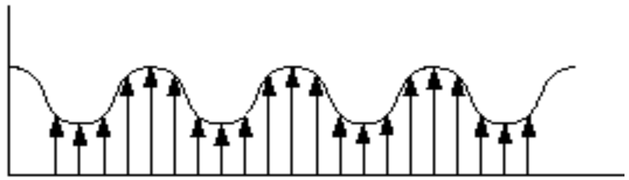
$$\mathbf{n}(x, y) = f(C_{\text{tex}}(u, v))$$



- Ziel: die korrekte Normale aus der einfachen Geometrie + Höhenfeld
- Idee:

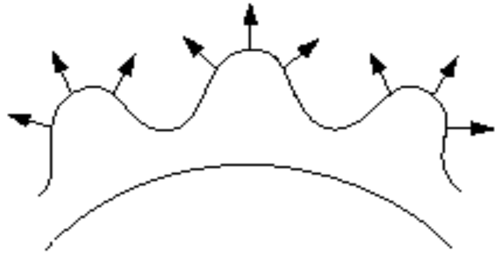


Original-Oberfläche $P(u, v)$
mit Normalen $N(u, v)$



Bump-Map $F(u, v)$

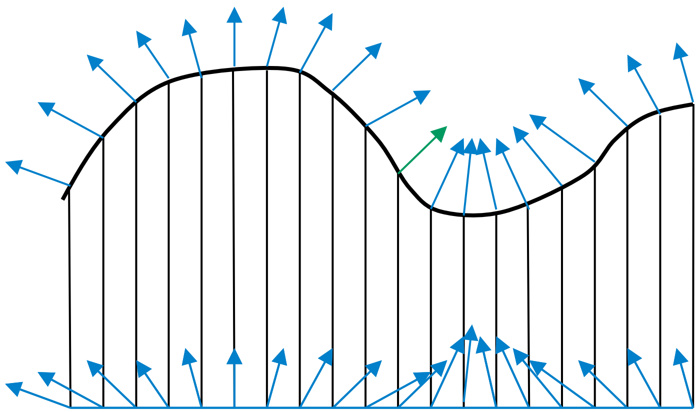
Offset-Oberfläche $\hat{P}$



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

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

- 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:

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

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

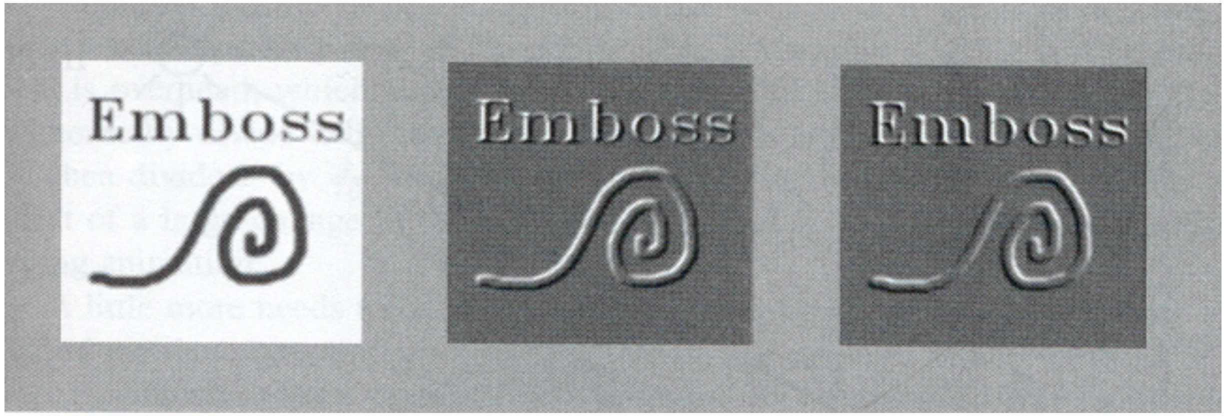
- Für $\hat{N}(u, v)$ folgt damit:

$$
\begin{aligned}
\hat{N} &= \hat{P}_u \times \hat{P}_v \\
&= P_u \times P_v + F_u \left(\frac{N}{\|N\|} \times P_v \right) + F_v \left(P_u \times \frac{N}{\|N\|} \right) + F_u F_v \left(\frac{N}{\|N\|} \times \frac{N}{\|N\|} \right) \\
&= P_u \times P_v + F_u \left(\frac{N}{\|N\|} \times P_v \right) + F_v \left(P_u \times \frac{N}{\|N\|} \right) \\
&= N + \frac{1}{\|N\|} \big(F_u (N \times P_v) - F_v (N \times P_u) \big)
\end{aligned}
$$

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: $$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1})}{2h}$$

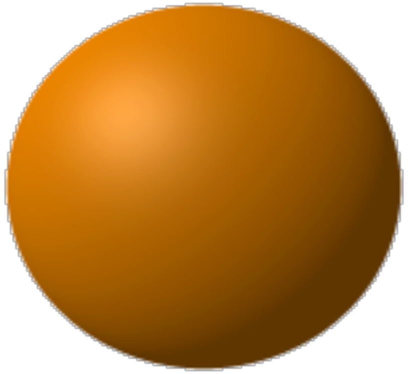
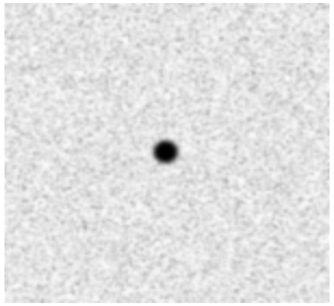
- Speicherung:
  - Höhenfeld als Grauwertbild in Rot-Kanal (z.B. mit Malprogramm erstellt)
  - Richtungsableitungen (mit finiten Differenzen berechnet) in G/B speichern

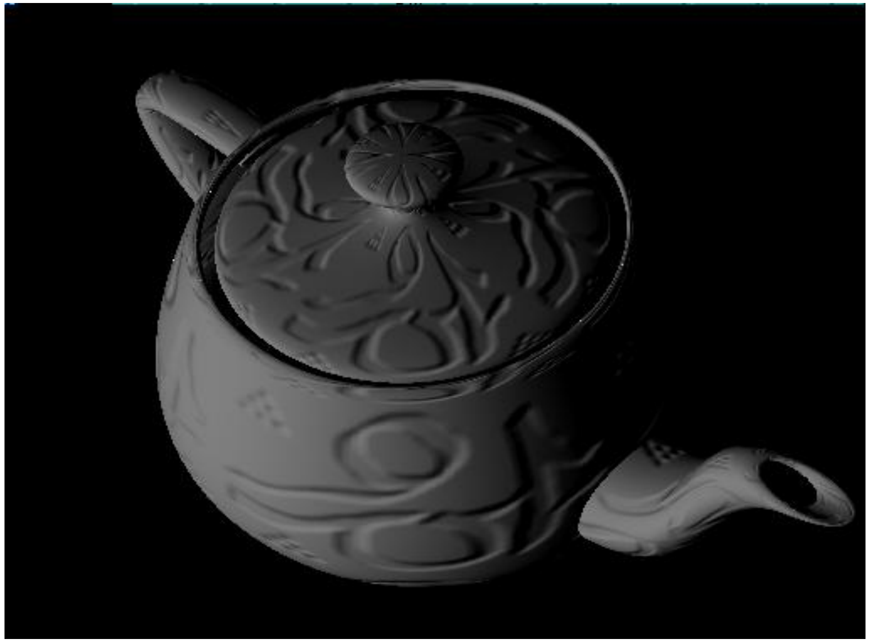


Orginal Höhenfeld   u-Richtungsableitung   v-Richtungsableitung

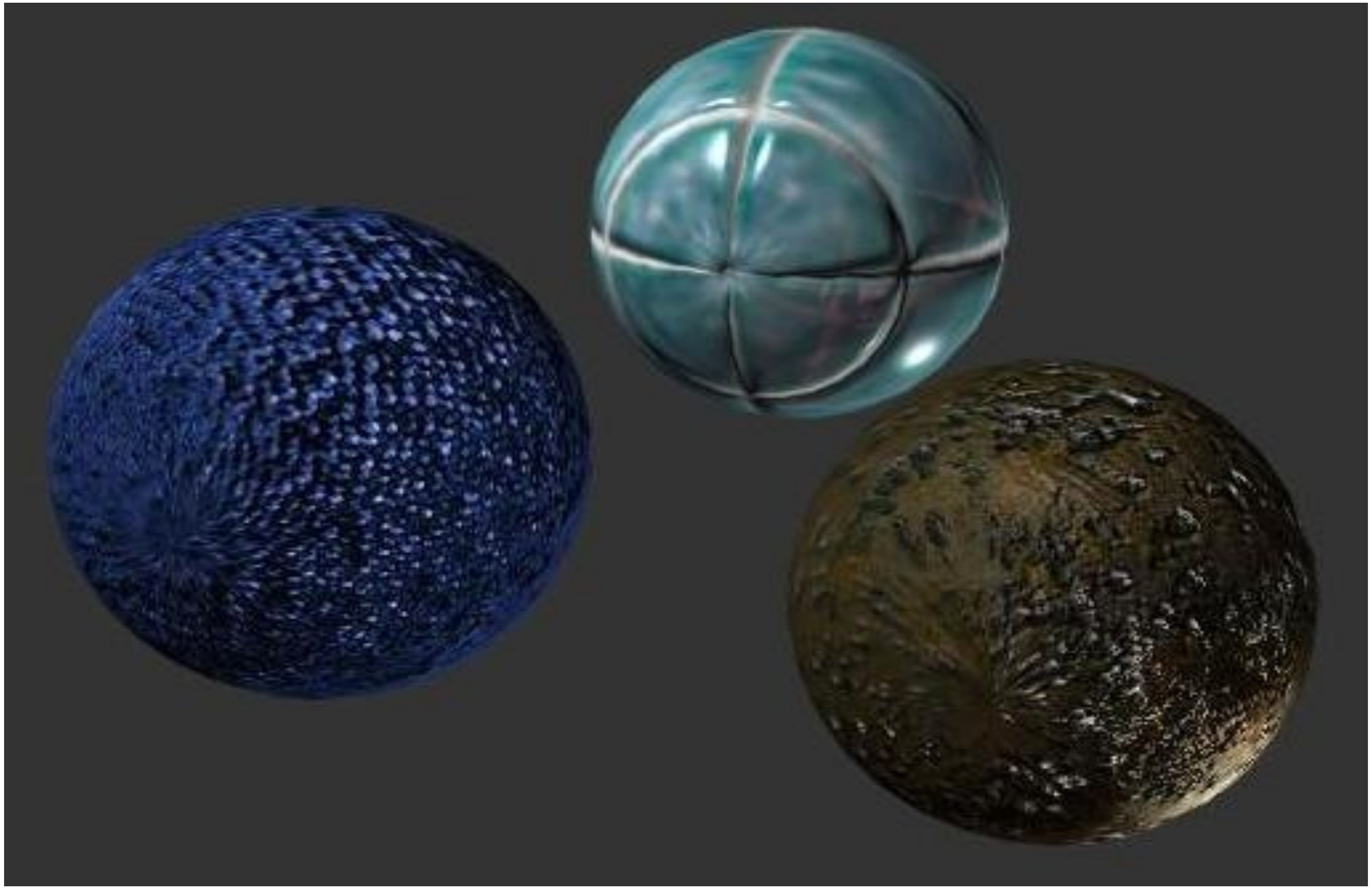
- Voraussetzung: Beleuchtung erst bei der Rasterisierung (Shader), oder sehr fein tesselierte Geometrie und dann Berechnung der perturbierten Normalen an jedem Vertex "von Hand"

Beispiele

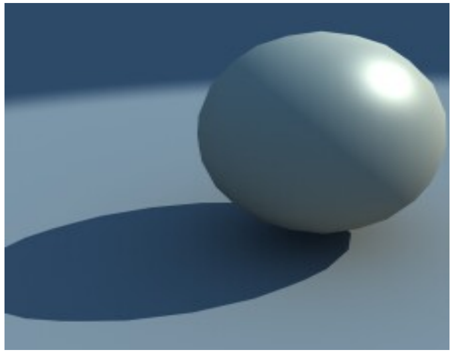




Multi-Textures (Bump und Environment)

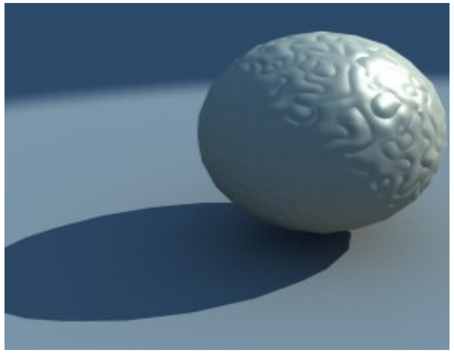


Enemy Territory: Quake Wars. Splash Damage & Intel

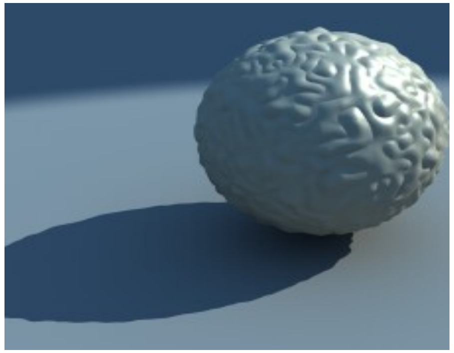
Beispiele für Displacement-Mapping



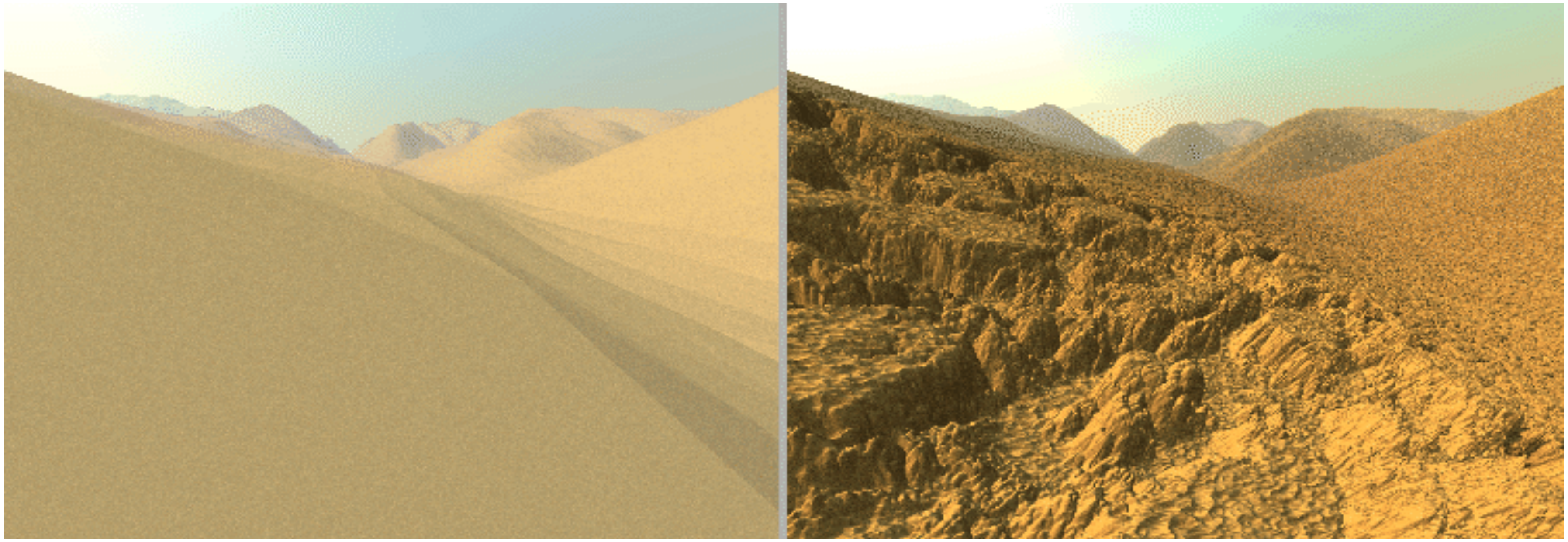
Geometrie



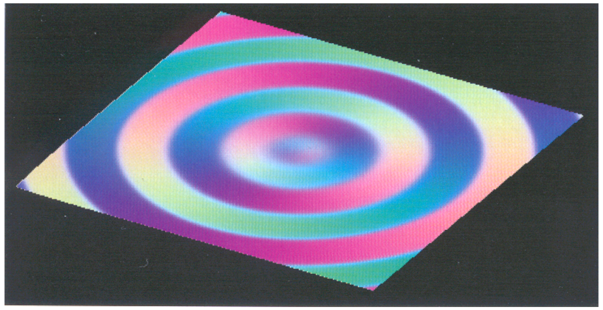
Bump Mapping

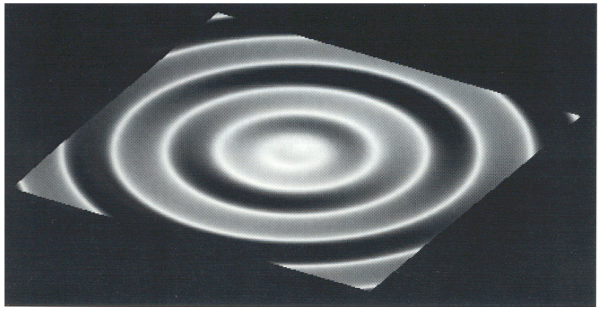


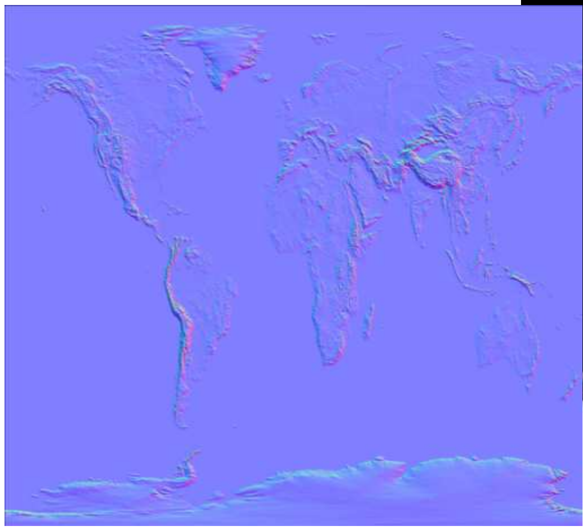
Displacement Mapping

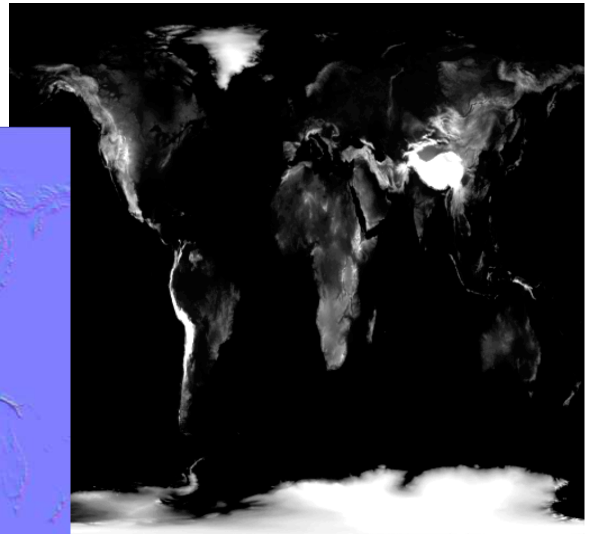


- Beispiele:

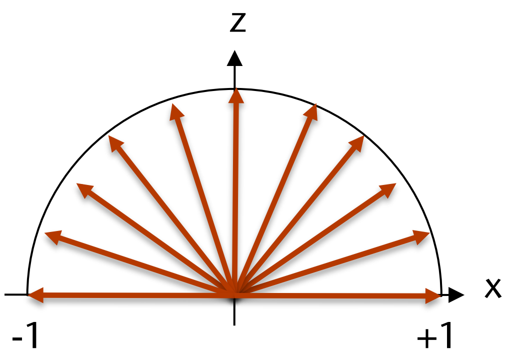


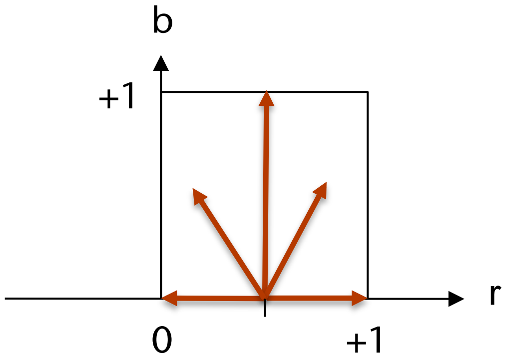






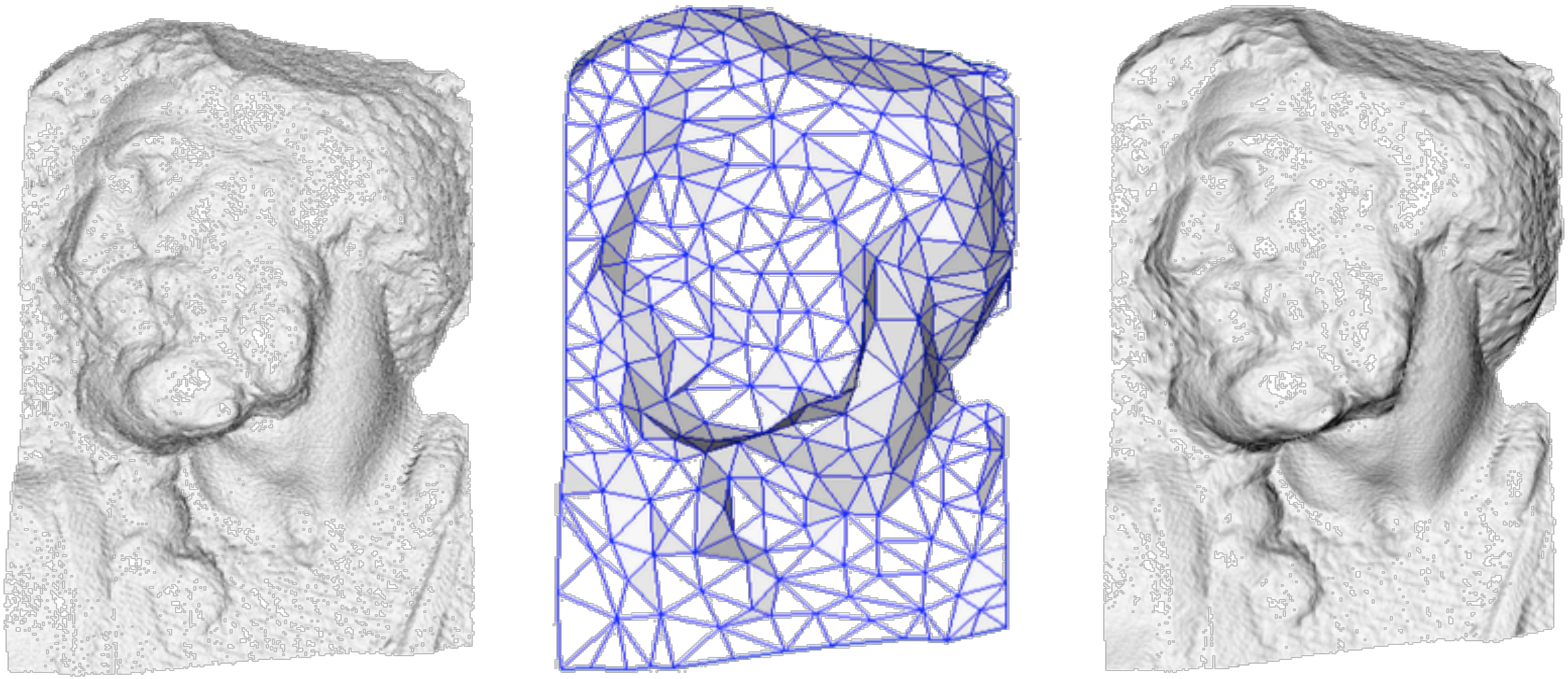
- Kodierung der Normalen:





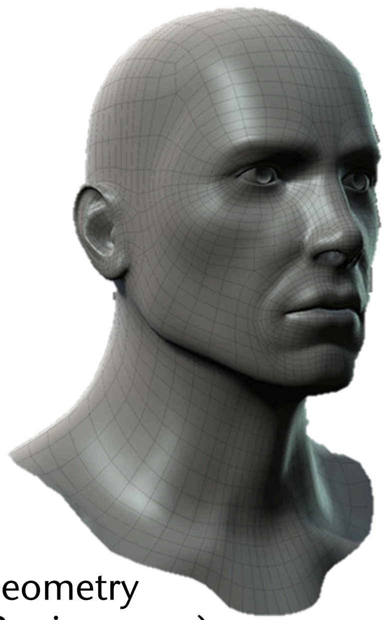
Normal Maps

- Normalen in hoher Auflösung in Textur speichern
- Für niedrig aufgelöste Geometrie



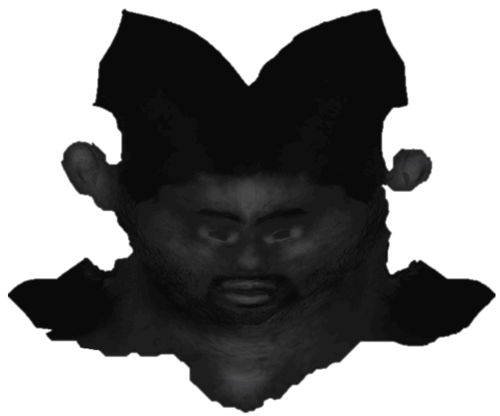
- Unterschied zwischen Normal Maps und Bump Maps:
  - Bump Maps sind unabhängig von der Geometrie, man kann sie auf jede beliebige (genügend "flache") Geometrie aufbringen.
  - Normal Maps kann man nur für genau die Geometrie verwenden, für die sie erzeugt wurden.

Beispiel für eine Kombination der Textur-Arten

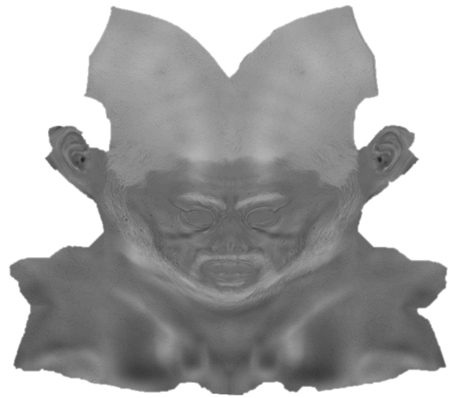


Geometry
(2 mio pgons)

Diffuse Map



Gloss Map (specularity map)

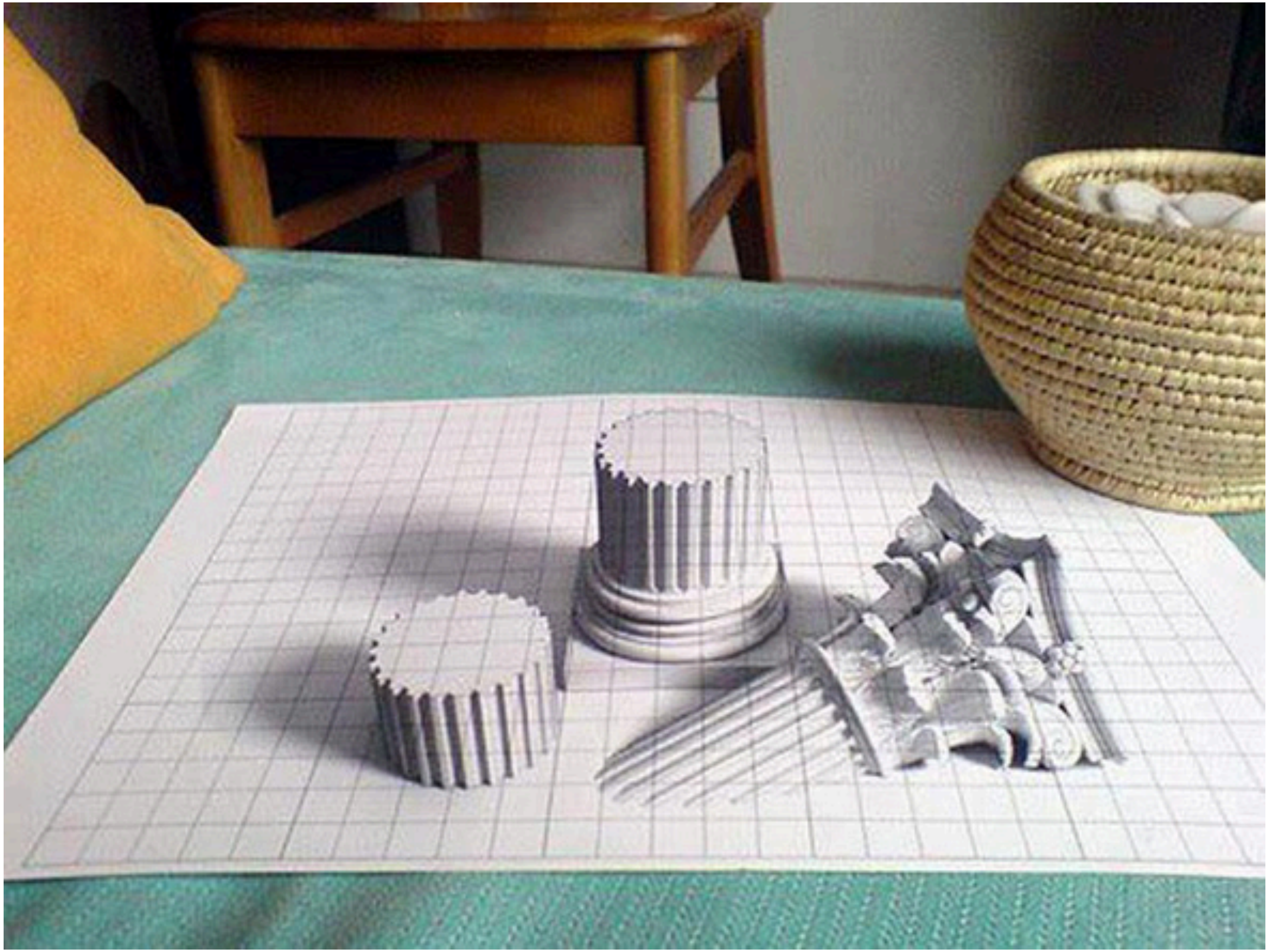


Bump Map

Exkurs: Trompe l'œil - Malerei

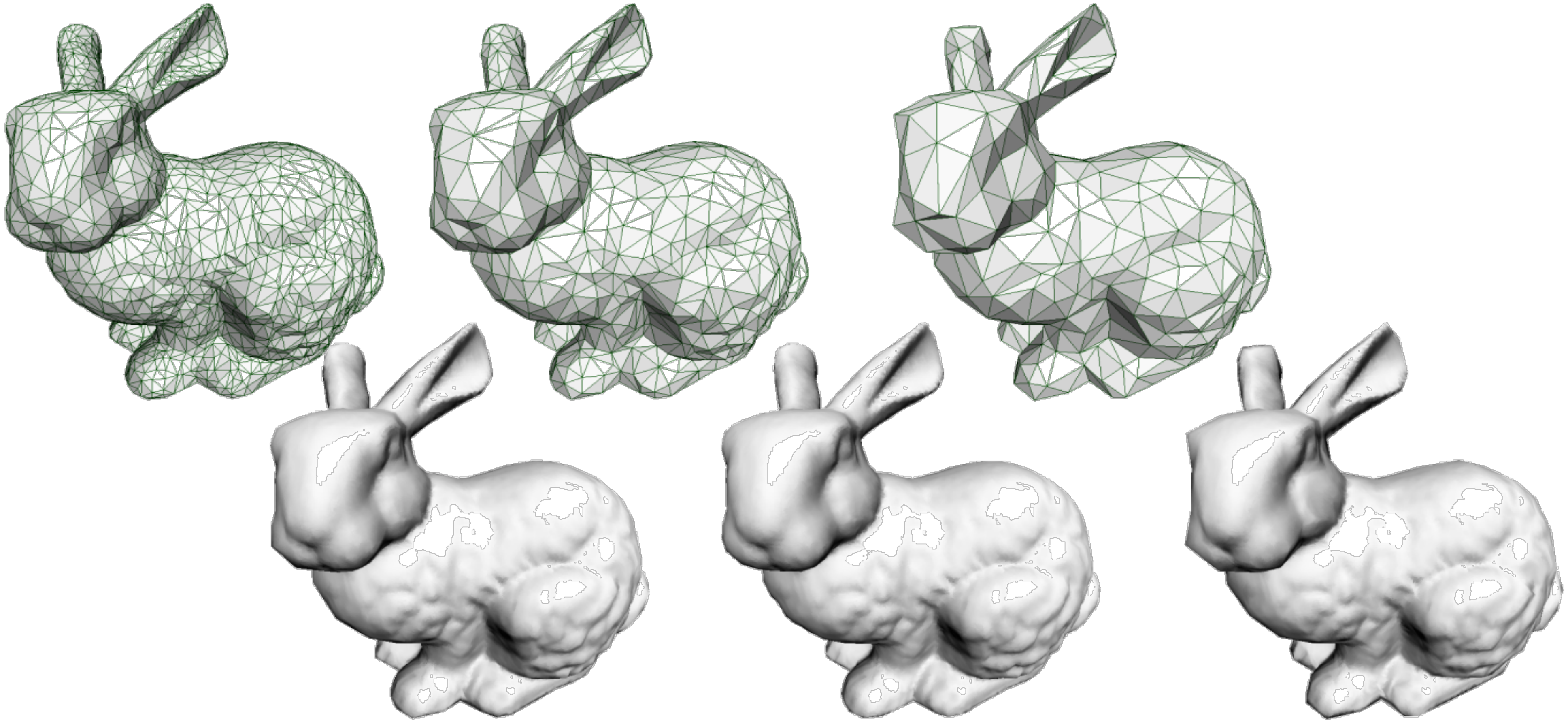
Pere Borrell del Caso,
Der Kritik entfliehend, 1874

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

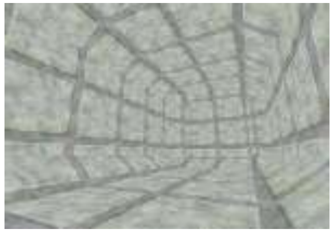


7. Shading-Texturen:

- Shading in hoher Auflösung → Textur
- Bei niedrig aufgelöster Geometrie nur Textur, keine Beleuchtung

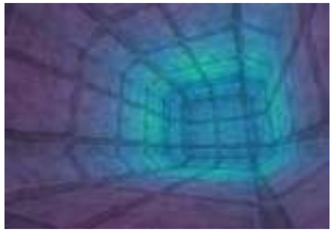


- Light Maps:
  - Zusätzliche Textur wird verwendet, um statische oder dynamische Illumination zur Szene hinzuzufügen



*

=

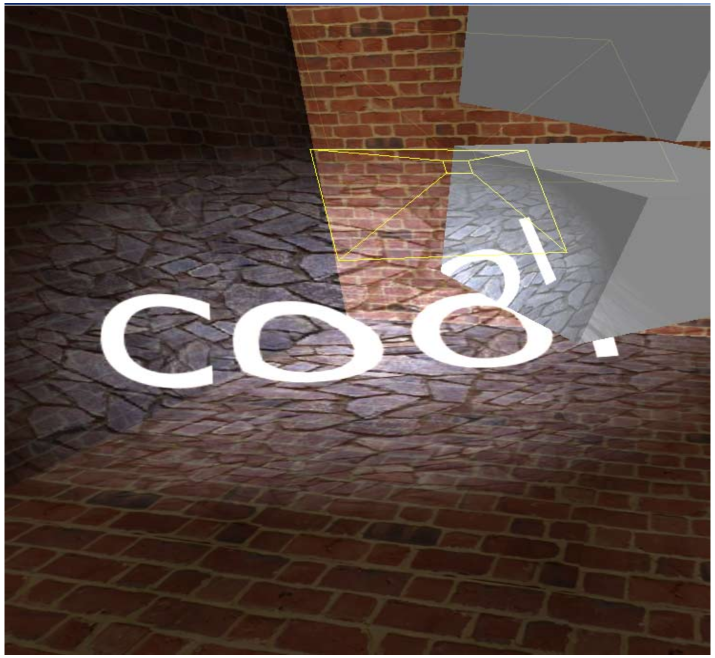


  - Man kann so leicht den Lichtschein eines Bullets wandern lassen
  - Weil die Illumination räumlich nur niedrige Frequenzen hat, ist nur eine gering aufgelöste Textur erforderlich
  - Viele kleine Light Maps können in eine große Textur verpackt werden
  - Light Maps werden gewöhnlich mittels Raytracing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

10. 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:

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



Texturen in Open GL

- 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

- Textur einschalten:

  `glEnable( GL_TEXTURE_{12}D )`

- Zu jedem Eckpunkt gehört eine Texturkoordinate:

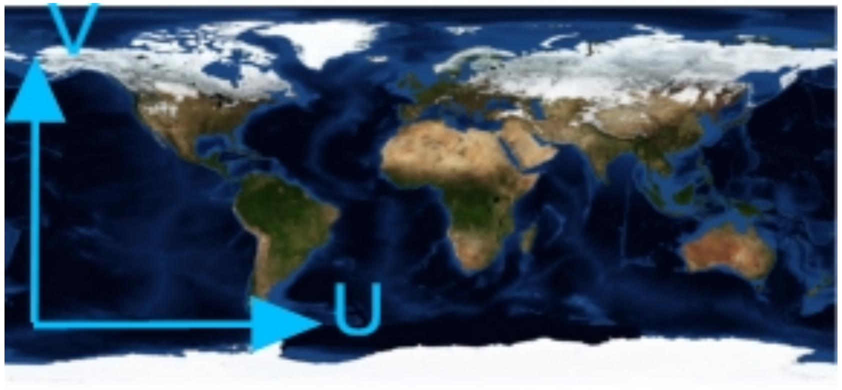
  `glTexCoord{1234}f[v]( value )`

  - 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

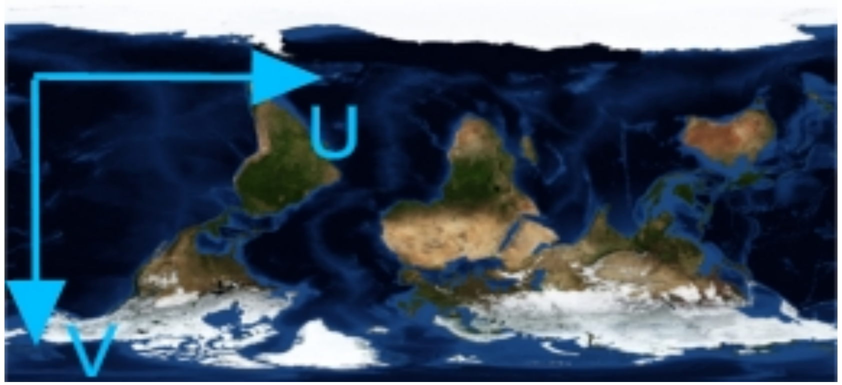
- Achtung: OpenGL hat keinen Image-Loader!
  - Aber: Qt bietet hier Funktionen an (oder andere Libs)
  - Oder: **`glCopyTexImage2D(…)`** liest Bild aus Framebuffer in Texturspeicher

Orientierung

- 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 ...

Die Texturmatrix

- Neben den Matrizen **`GL_MODELVIEW`** und **`GL_PROJECTION`** unterstützt OpenGL eine eigene „globale“ Matrix für Texturen:

  ```
  glMatrixMode( GL_TEXTURE )
  ```

- Die Texturkoordinaten werden vor Benutzung mit dieser Matrix multipliziert
- Anwendung: sich bewegende Texturen, z.B. Wellen auf einer Oberfläche

Beeinflussung der Pixelfarbe in OpenGL

- 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**:

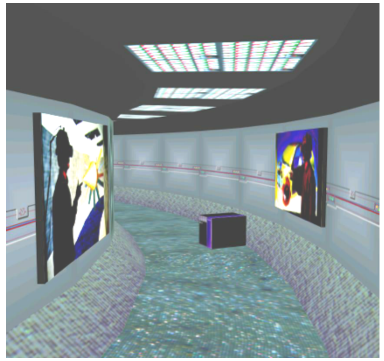
$$\alpha_T \cdot T_{\mathrm{RGB}\alpha} + (1 - \alpha_T) \cdot F_{\mathrm{RGB}\alpha}$$

  - **GL_BLEND**:

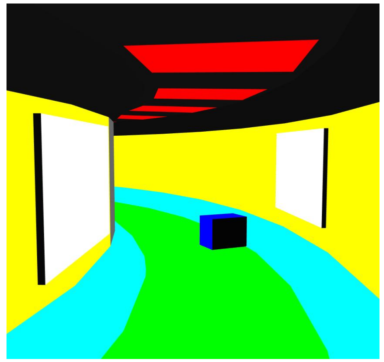
$$F_{\mathrm{RGB}} \cdot (1 - T_{\mathrm{RGB}}) + C_{\mathrm{RGB}} \cdot T_{\mathrm{RGB}}$$

und *C* wird definiert über

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



T = Texelfarbe



F = Pixelfarbe ohne Textur

Koordinaten-Wrap / Textur-Fortsetzung

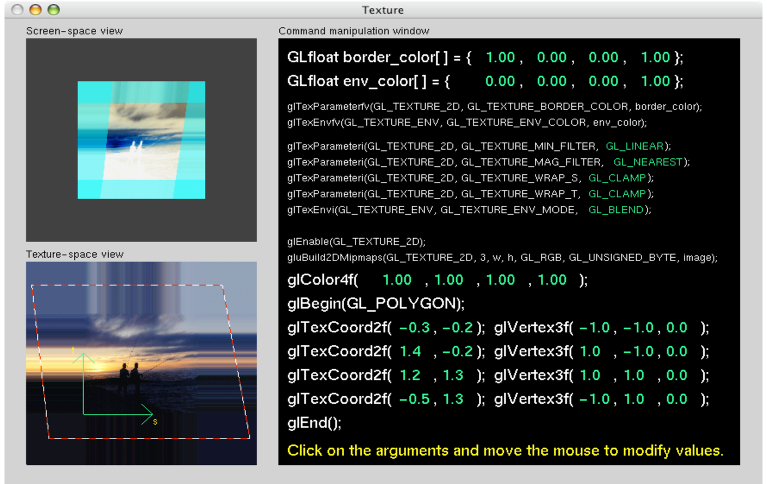
- Was geschieht, wenn Texturkoordinaten außerhalb [0,1]x[0,1] definiert werden?

  `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

- 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):

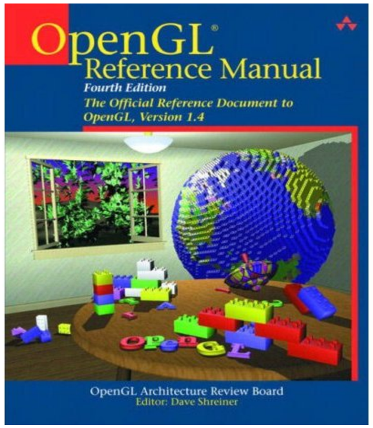
```
void main()
{
    gl_TexCoord[0] = gl_MultiTexCoord0;
    gl_Position = gl_ModelViewProjectionMatrix * gl_Vertex;
}
```

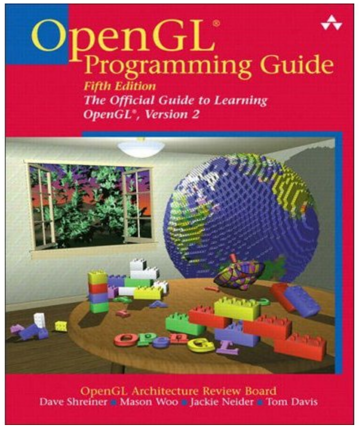
- Im Fragment-Shader geschieht dann die eigtl Texturierung:

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

Zum Nachlesen

- 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





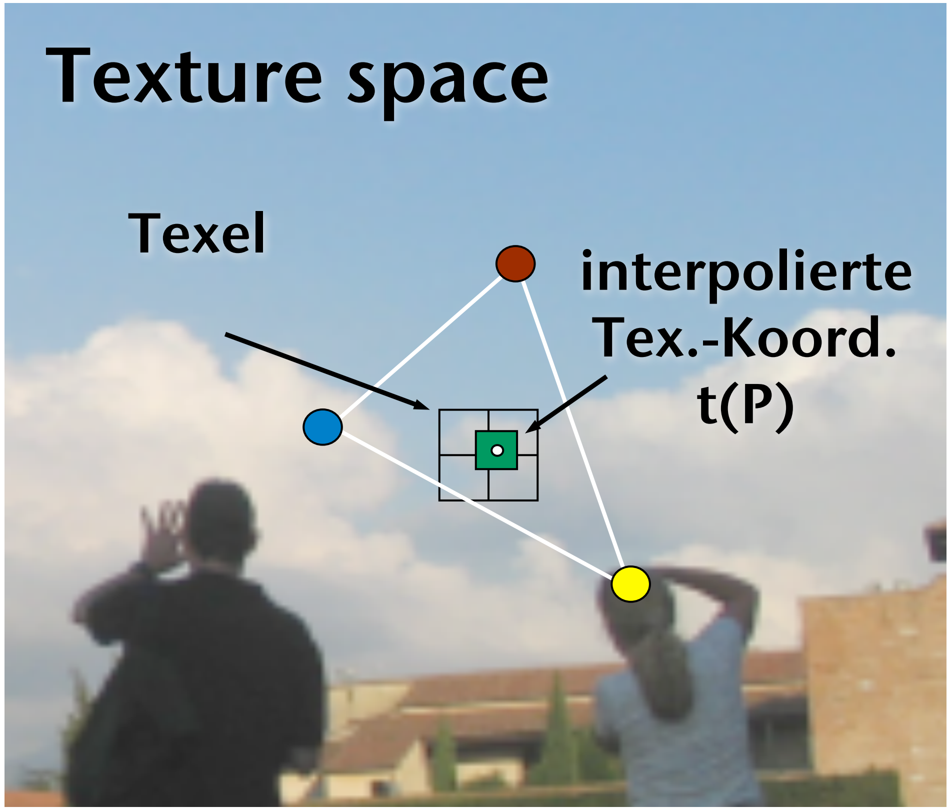
Auch als HTML auf der Homepage der CG-1-Vorlesung

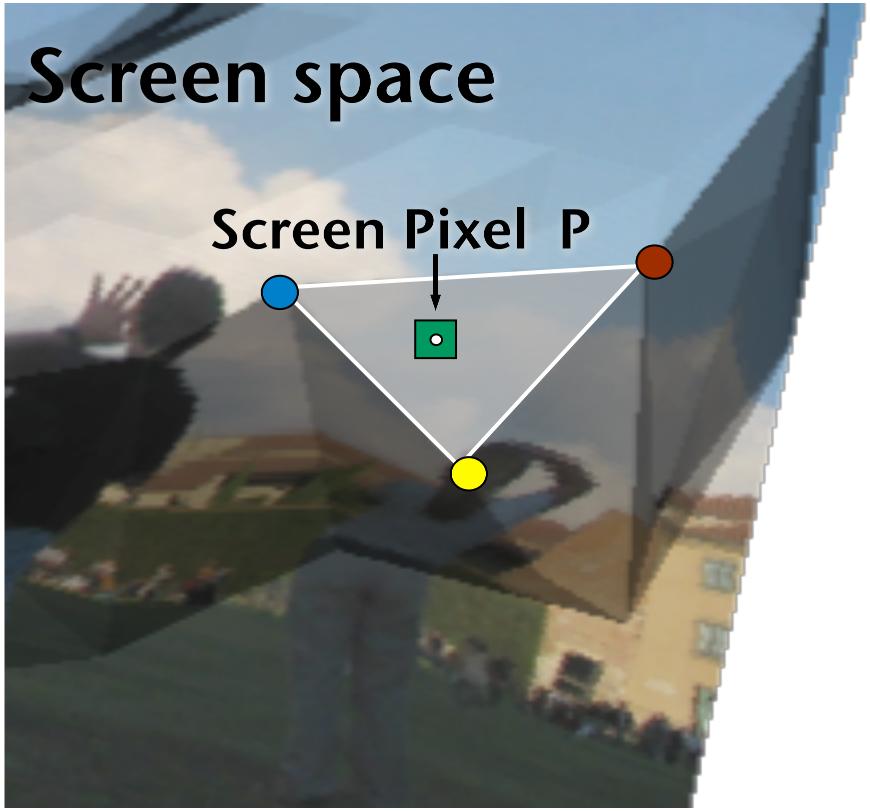
```
xterm-color — less
GLCOPYTEXIMAGE2D(3G)                                    GLCOPYTEXIMAGE2D(3G)

NAME
       glCopyTexImage2D - copy pixels into a 2D texture image

C SPECIFICATION
       void glCopyTexImage2D( GLenum target,
                              GLint level,
                              GLenum internalformat,
                              GLint x,
                              GLint y,
                              GLsizei width,
                              GLsizei height,
                              GLint border )

PARAMETERS
       target          Specifies the target texture.  Must be GL_TEXTURE_2D.

       level           Specifies  the  level-of-detail number.  Level 0 is the
                       base image level.  Level n is the nth mipmap  reduction
                       image.

       internalformat  Specifies the internal  of the texture.  Must be one of
                       the following symbolic constants: GL_ALPHA,  GL_ALPHA4,
                       GL_ALPHA8,   GL_ALPHA12,   GL_ALPHA16,   GL_LUMINANCE,
                       GL_LUMINANCE4,      GL_LUMINANCE8,      GL_LUMINANCE12,
                       GL_LUMINANCE16,                     GL_LUMINANCE_ALPHA,
                       GL_LUMINANCE4_ALPHA4,             GL_LUMINANCE6_ALPHA2,
                       GL_LUMINANCE8_ALPHA8,            GL_LUMINANCE12_ALPHA4,
                       GL_LUMINANCE12_ALPHA12,         GL_LUMINANCE16_ALPHA16,
                       GL_INTENSITY,       GL_INTENSITY4,       GL_INTENSITY8,
                       GL_INTENSITY12,  GL_INTENSITY16,  GL_RGB,  GL_R3_G3_B2,
                       GL_RGB4,    GL_RGB5,    GL_RGB8,    GL_RGB10,    GL_RGB12,
                       GL_RGB16,  GL_RGBA,  GL_RGBA2,  GL_RGBA4,   GL_RGB5_A1,
                       GL_RGBA8, GL_RGB10_A2, GL_RGBA12, or GL_RGBA16.

       x, y            Specify the window coordinates of the lower left corner
                       of the rectangular region of pixels to be copied.

       width           Specifies the width of the texture image.  Must be 0 or
                       (2^n) + 2*border for some integer n.

       height          Specifies  the  height of the texture image.  Must be 0
                       or (2^m) + 2*border for some integer m.

byte 3502
```

Man Pages

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

Textur-Interpolation



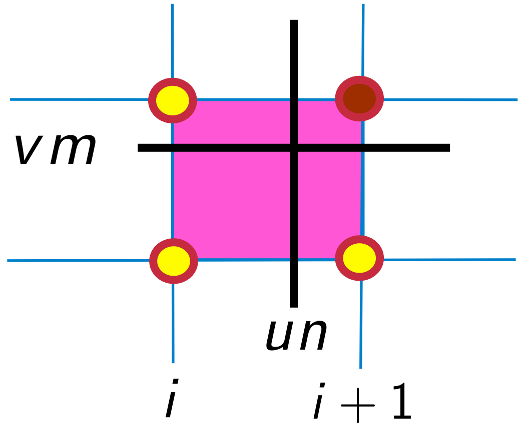


- Nearest neighbour, oder
- Bilineare Interpolation der Texel

Rekonstruktionsmethoden

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

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



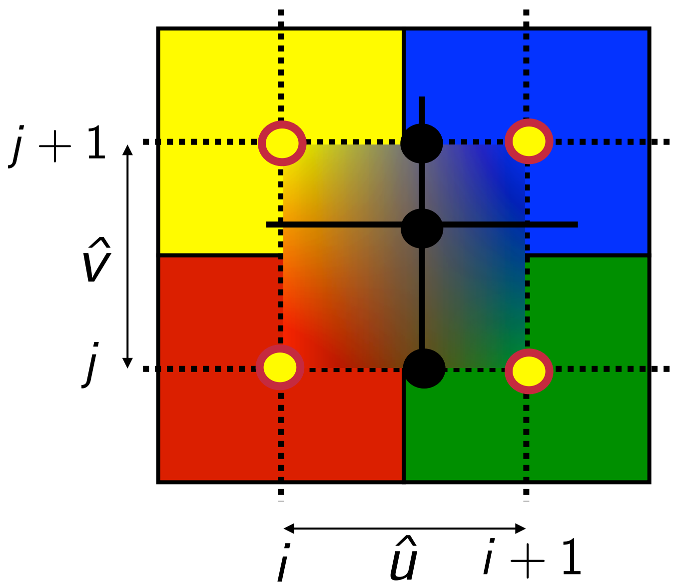
1. Nearest neighbour (Punktfilter):

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

2. Bilineare Interpolation:

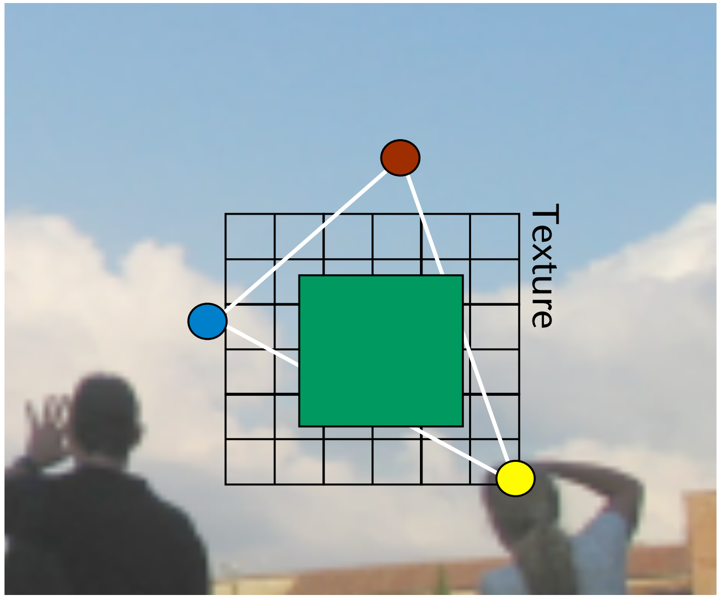
$$\hat{u} = un - \lfloor un \rfloor \;,\; \hat{v} = vm - \lfloor vm \rfloor$$

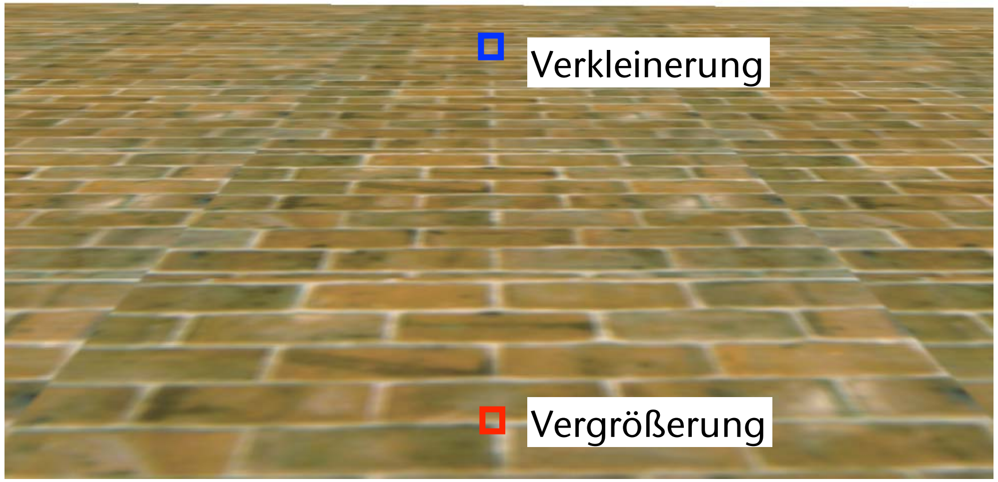
$$c = (1-\hat{u})\big((1-\hat{v}){\color{red}\blacksquare} + \hat{v}\,{\color{yellow}\blacksquare}\big) + \hat{u}\big((1-\hat{v}){\color{green}\blacksquare} + \hat{v}\,{\color{blue}\blacksquare}\big)$$

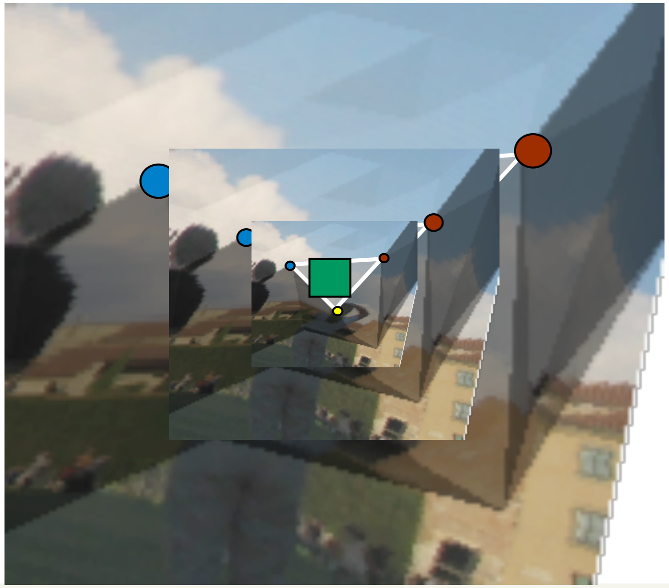


Texturverkleinerung

- 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"?

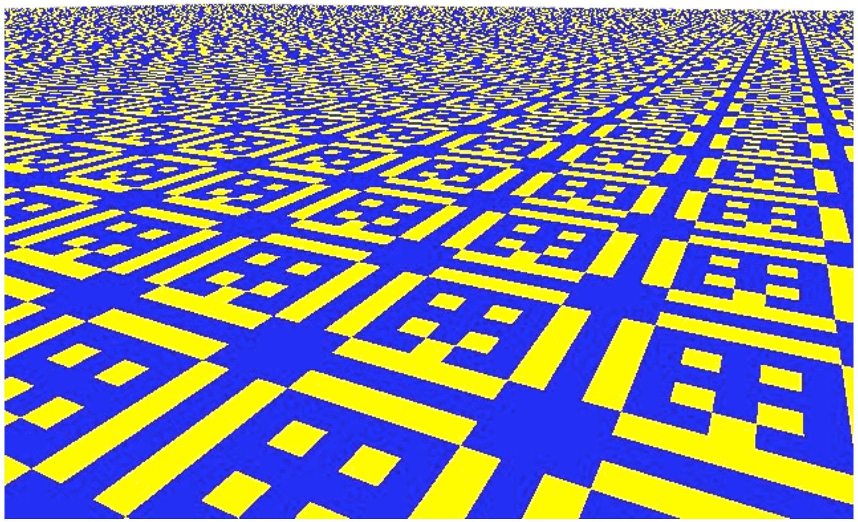


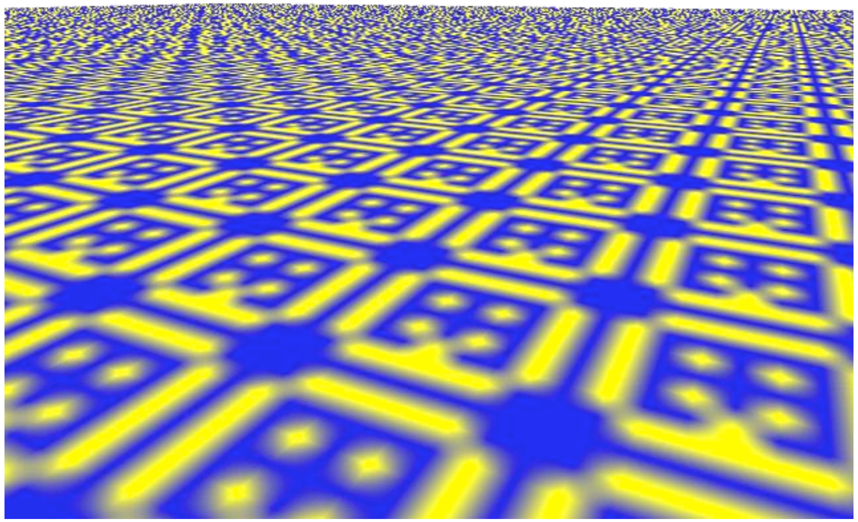




- Schwierigeres und "heißes" Problem
- Es gibt viele Möglichkeiten zur Lösung

1. Auch hier den einfachen Punktfilter → Aliasing
2. Lineare Interpolation hilft nur wenig

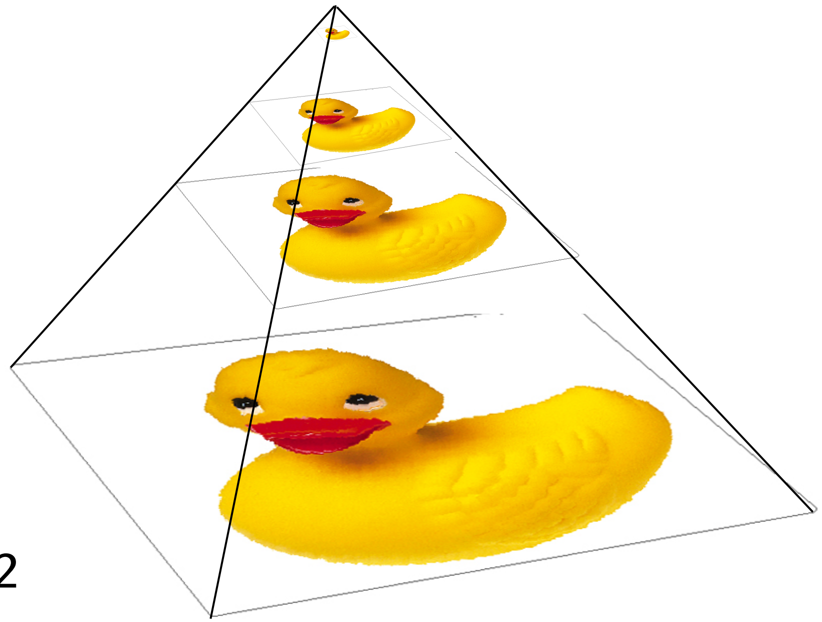


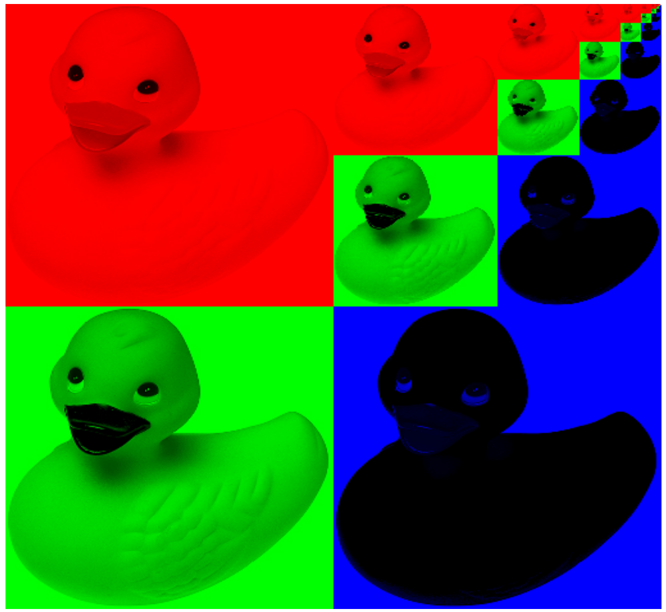


- Bei starker Verkleinerung müsste eigentlich eine Mittelung von vielen Texeln durchgeführt werden, da sie alle auf 1 Pixel auf dem Bildschirm abgebildet werden
- Für Echtzeitanwendungen und Hardwarerealisierungen ist das zu aufwendig
- Lösung: Preprocessing
  - Vor dem Start verkleinerte Versionen der 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

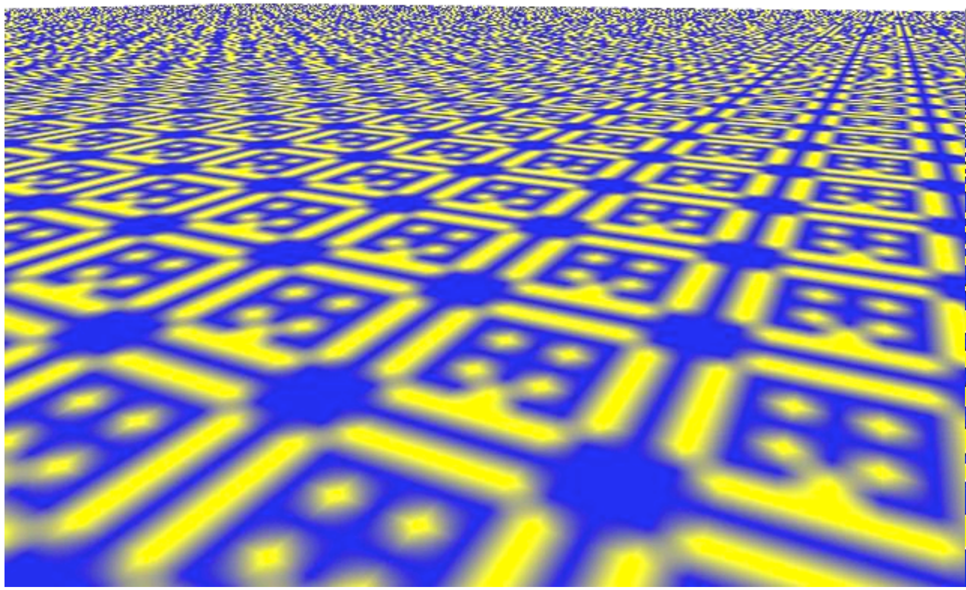
→MIP-Maps (lat. "multum in parvo" = Vieles im Kleinen")

- 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.

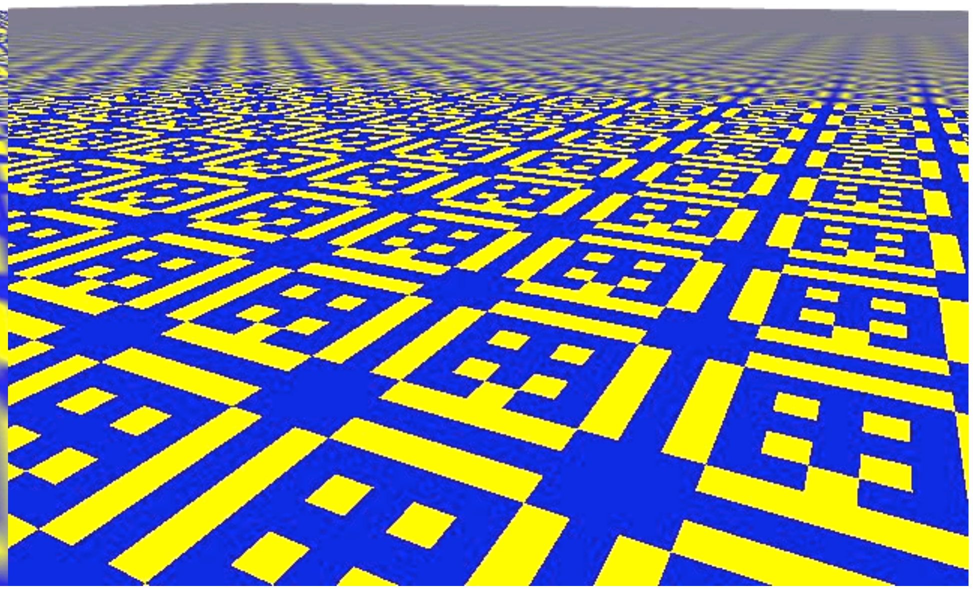




- Abhängig von der Distanz des Betrachters zum Pixel wird von OpenGL entschieden, welcher Texturlevel sinnvoll ist (pro Pixel)
- Der ideale Level ist der, bei dem 1 Texel auf 1 Pixel abgebildet wird



binlinear gefiltert



MIP-Map

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 )
```

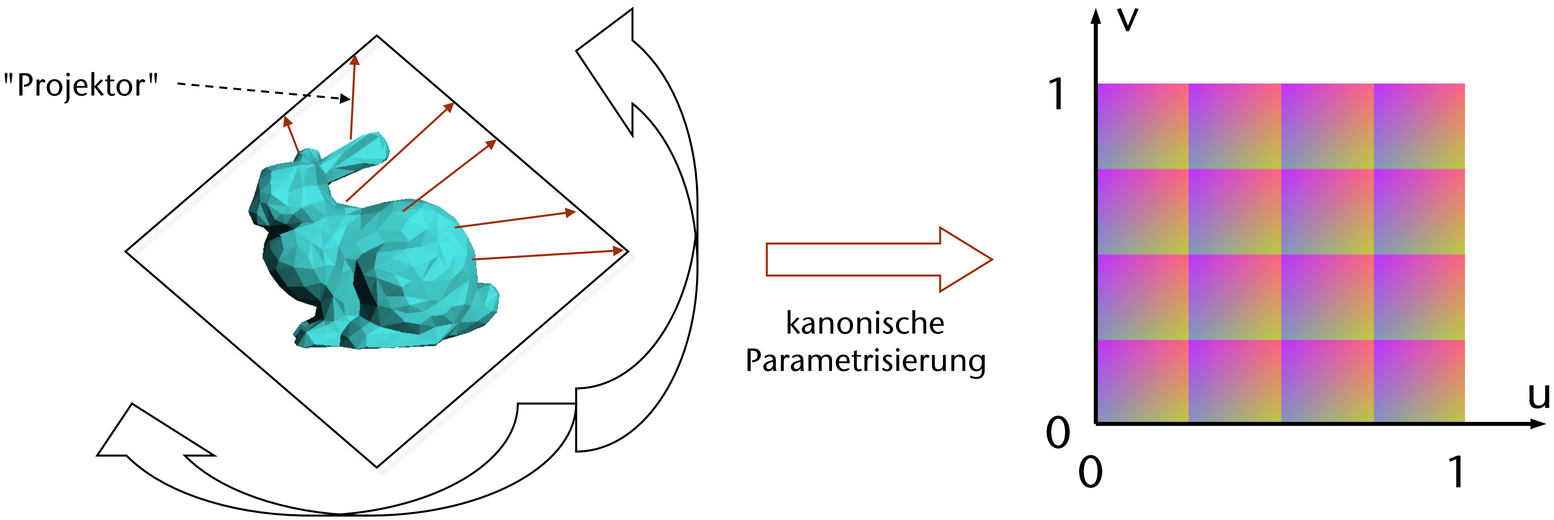
mit Parametern wie **`glTexImage{12}D()`**

Einfache Parametrisierung

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

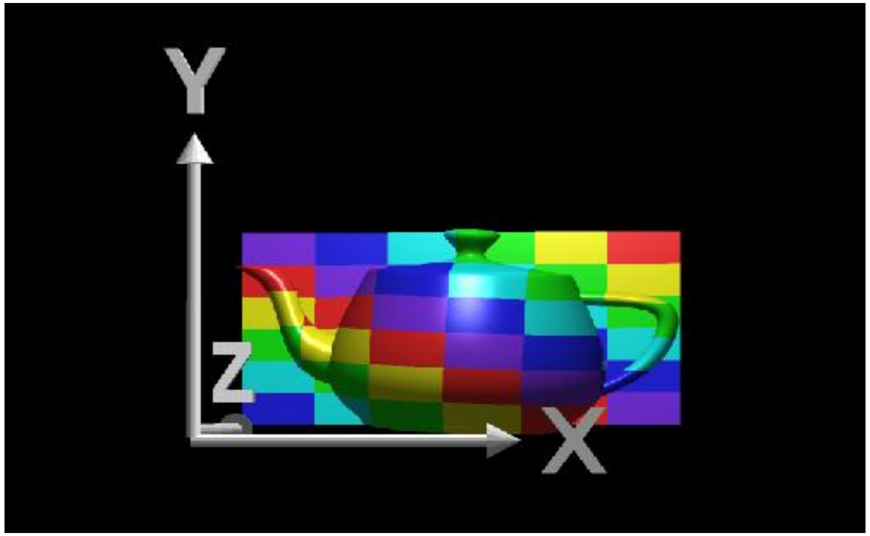
  - Achtung: dies ist nicht notwendig eine "gute" Texturierung!

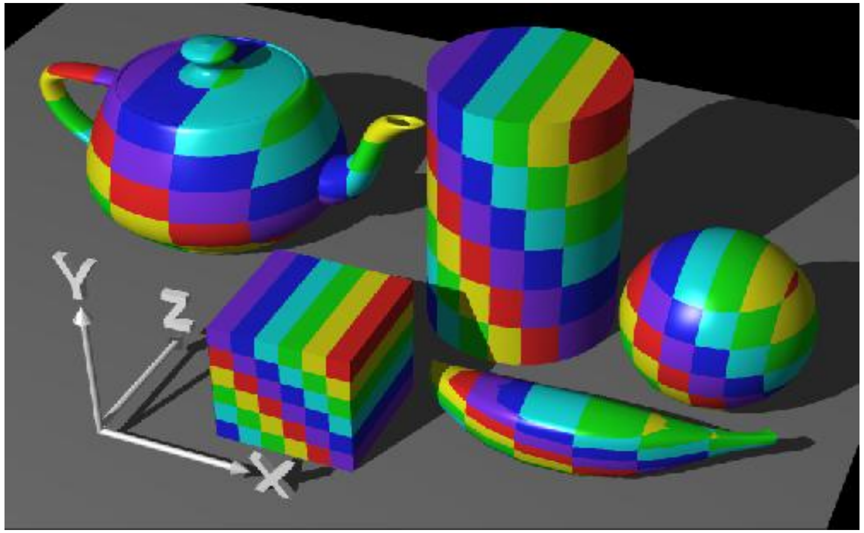
- Idee: ein 2-stufiger Prozess [Bier & Sloan, 1986]
  - Lege (konzeptionell) einen "kanonisch" parametrisierbaren Hüllkörper um das ganze Objekt
  1. Projiziere Vertices (nicht notw. dessen Vertex-Koord.!) auf diesen Hüllkörper
  2. Verwende die Texturkoordinaten des projizierten Punktes auf dem Hüllkörper



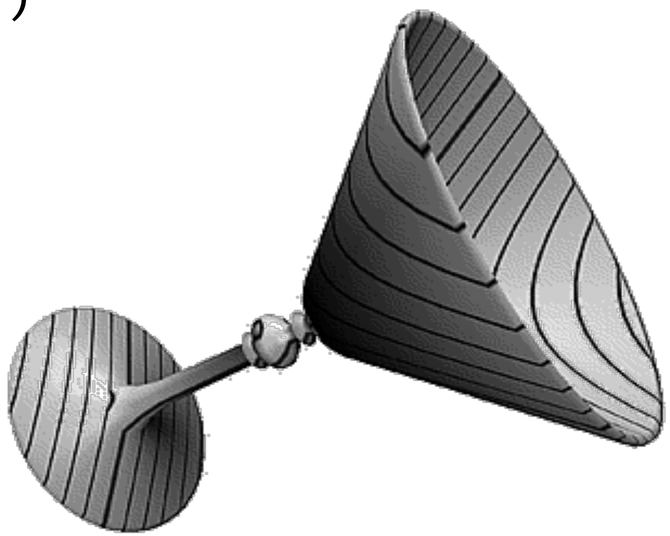
Einige Hüllkörper und deren Parametrisierung

- 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
  - $u := \text{dist}(P, E_1)$
    $v := \text{dist}(P, E_2)$
  - Dieses Feature bietet OpenGL



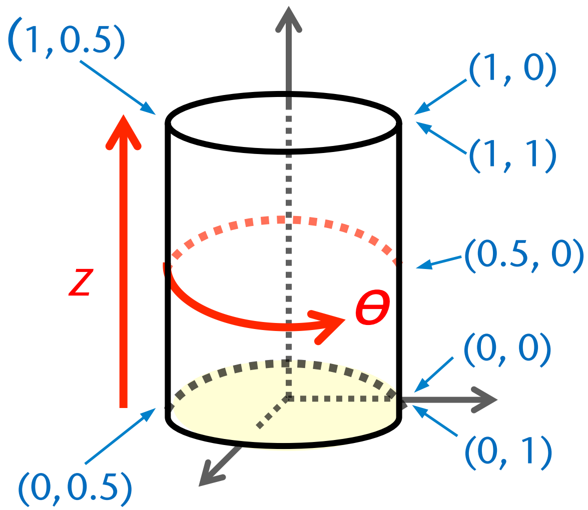


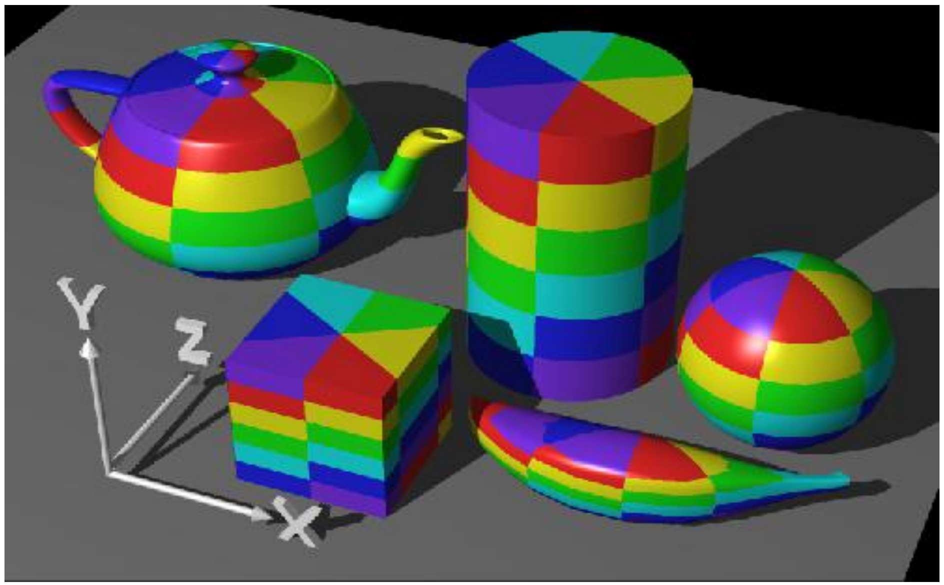
- Erzeuge Höhenlinien mittels dieser Technik:
  - Verwende 1D-Textur
  - u := dist(P, E_1)



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

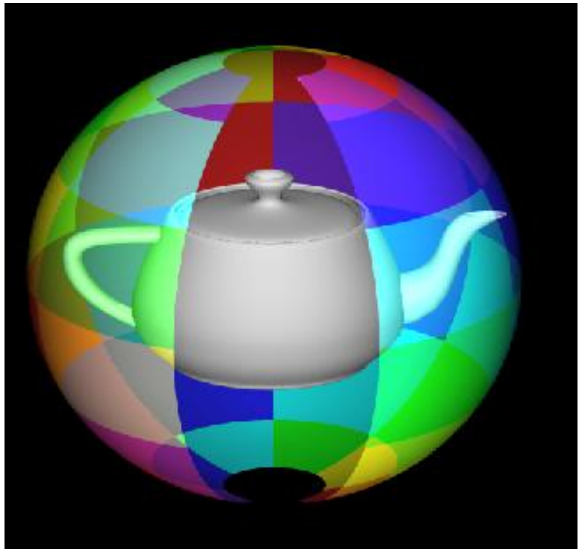
- Zylinder-Parametrisierung:
  - Konvertiere kartesische Koord. (x,y,z) in zylindrische Koord. $\rightarrow (r \sin \Theta, r \cos \Theta, z)$
  - $(u, v) = (\Theta / 2\pi, z)$
- Beachte "Naht" bei ($\theta = 0$ & $\theta = 2\pi$)

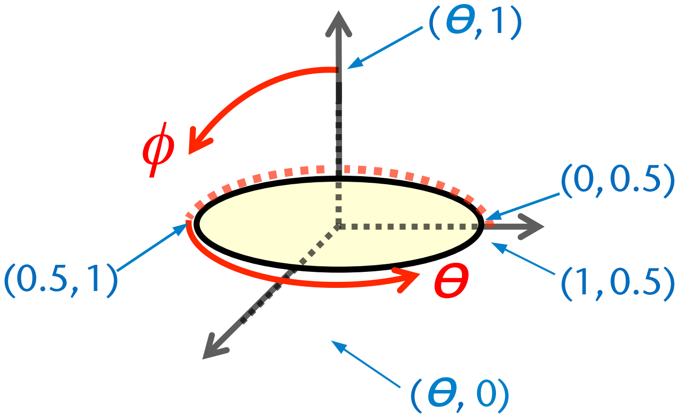


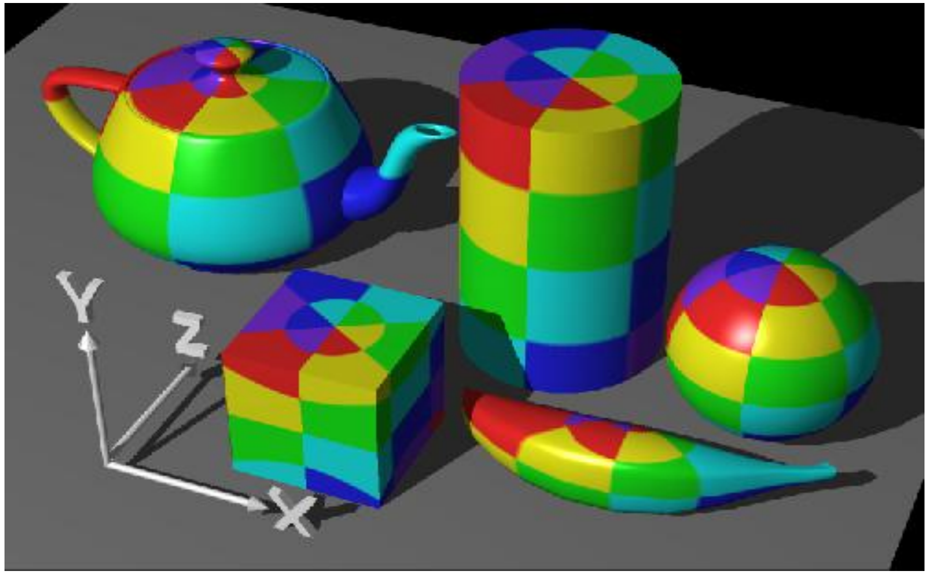


- Weiteres Beispiel für die Verwendung von Texturen: Image-Warping

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

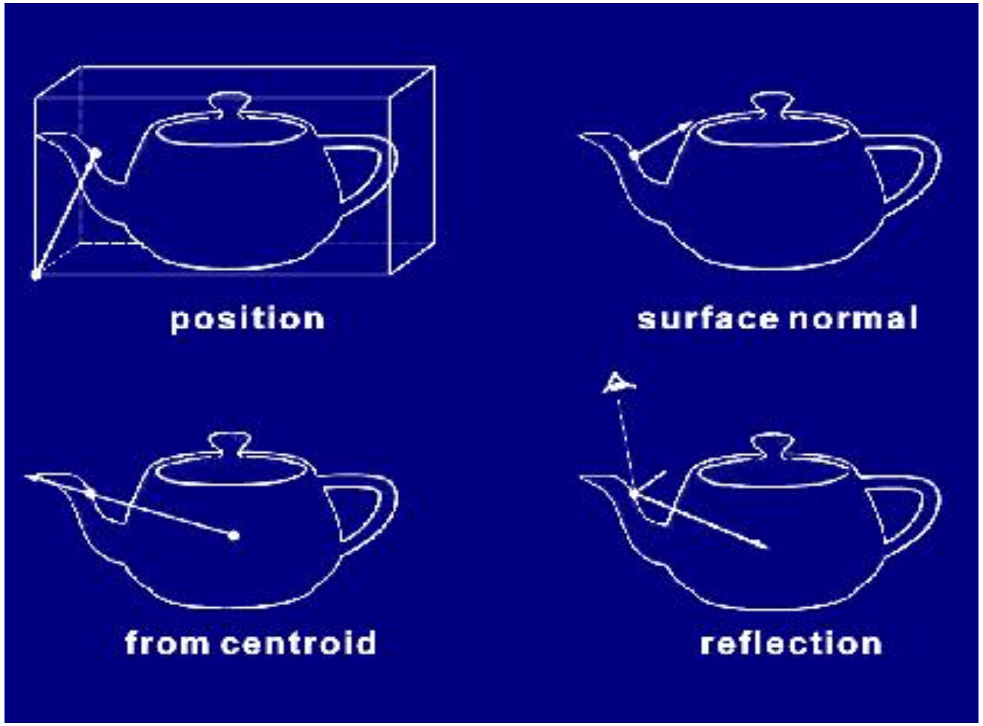




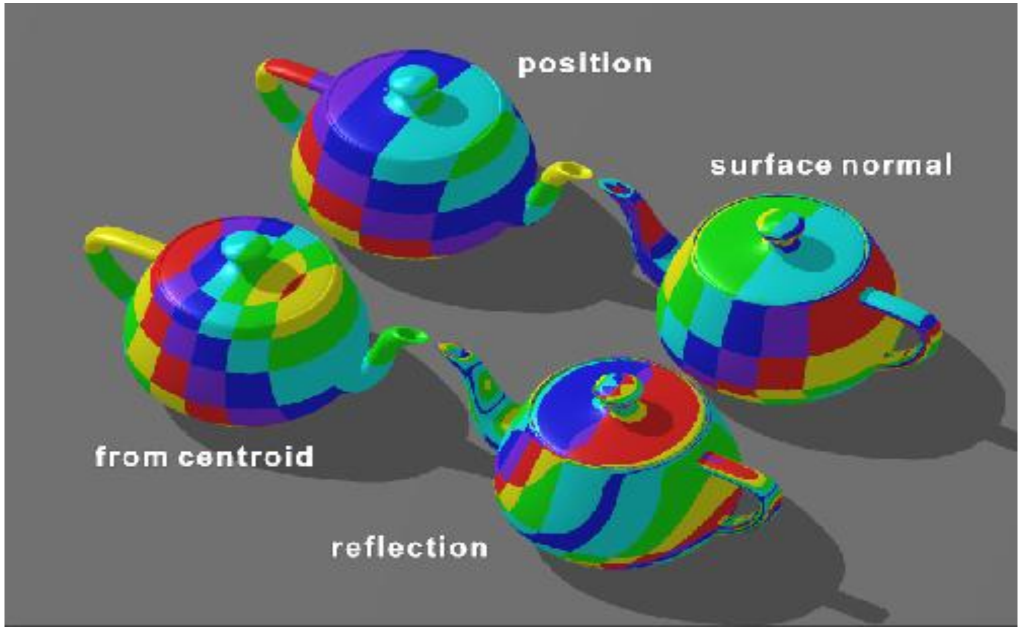


Was soll man projizieren?

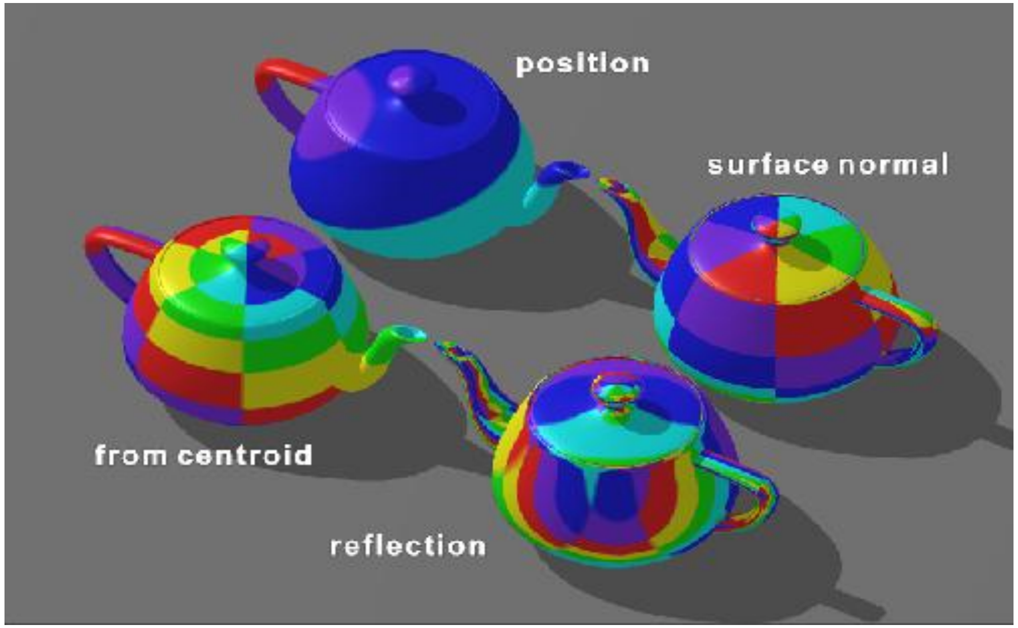
- Bisher: einfach die Koordinaten (x,y,z) des Vertex auf den (gedachten) Hüllkörper projiziert
- Verallgemeinerung: statt dessen kann man genauso gut (oder schlecht) andere Attribute des Vertex projizieren, z.B.
  - Normale
  - Vektor vom Zentrum des Objektes durch den Vertex
  - Reflektierter Viewing-Vektor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



- Beispiele:



planar



cylindrical

Automatische Erzeugung von Textur-Koordinaten in OpenGL

- `glEnable( GL_TEXTURE_GEN_S );` // S, T, R, Q
- `glTexGeni( GL_S, GL_TEXTURE_GEN_MODE,` *mode*);
- mode =

  `GL_OBJECT_LINEAR` : Texturkoord. = Distanz des Vertex von einer Ebene; die Ebene wird spezifiziert mit

  `glGenTexfv( GL_S, GL_OBJECT_PLANE, v )`

  `GL_EYE_LINEAR` : benutze Vertex-Koord. **nach** `MODEL_VIEW`

  `GL_SPHERE_MAP` : für Environment-Mapping (später)

  `GL_NORMAL_MAP`

  `GL_REFLECTION_MAP`

Beispiel

```
glEnable( GL_TEXTURE_GEN_S );
glTexGeni( GL_S,
           GL_TEXTURE_GEN_MODE,
           GL_OBJECT_LINEAR );
glTexGenfv( GL_S,
            GL_OBJECT_PLANE,
            xPlane );
```