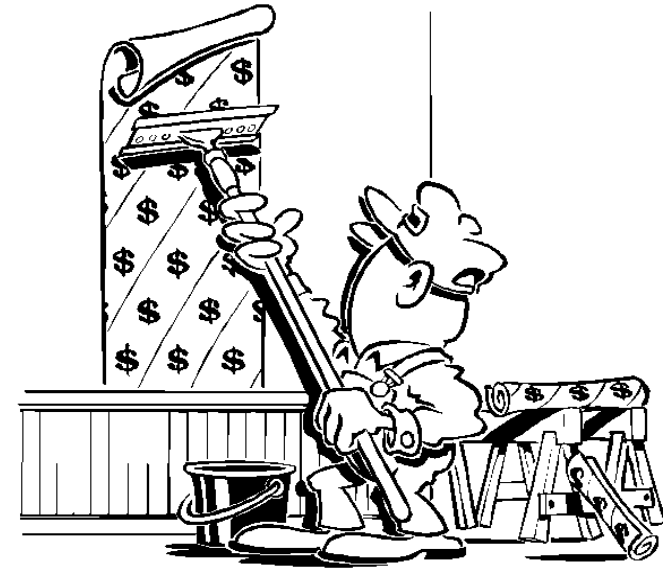


Computer-Graphik I

Texturierung



G. Zachmann

University of Bremen, Germany

cgvr.cs.uni-bremen.de

- 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

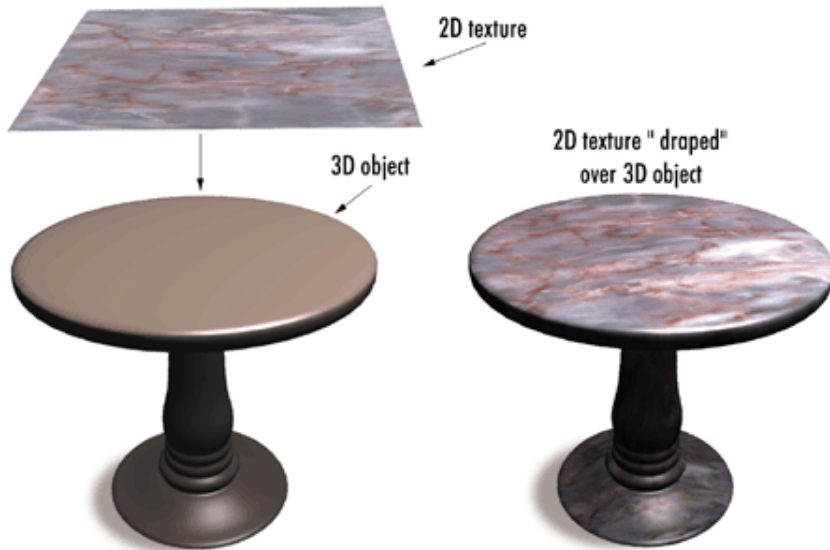
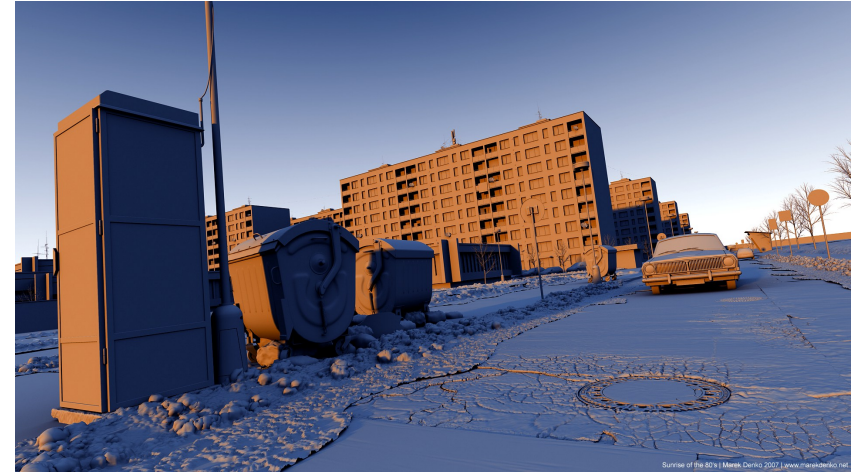
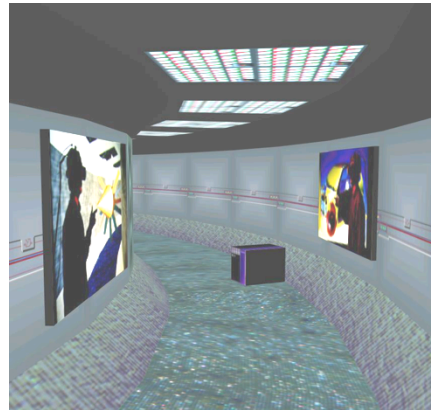
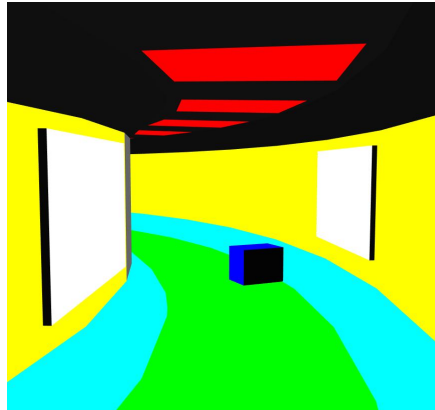
Grundidee der Texturierung

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



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

Weitere Beispiele



Marek Denko

- Eine "Kaustik-Textur" verstärkt den Unterwassereindruck:



- 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:

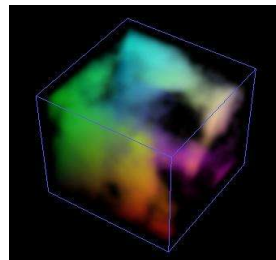
1D Texturen



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:

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

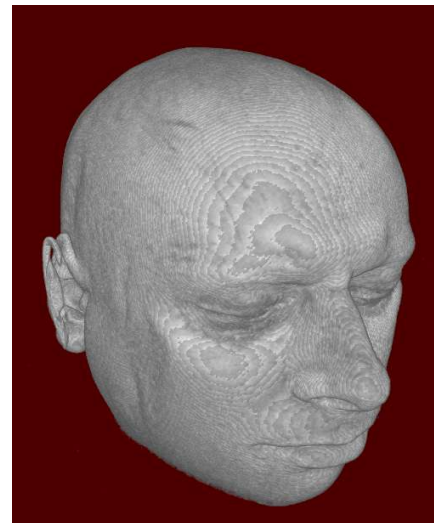
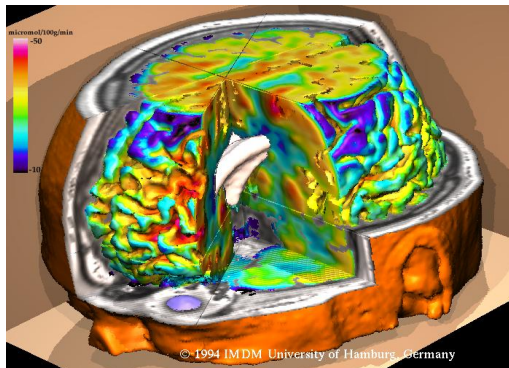
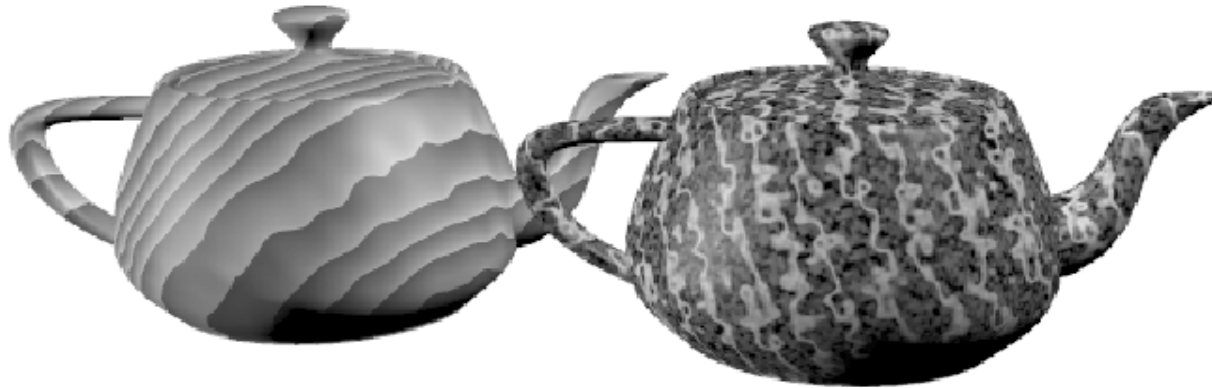
- Die Textur ist also an **jedem** Punkt im Raum definiert
- Das Objekt wird quasi aus dem Texturvolumen "**herausgeschnitzt**"

2D-
Texturierung



3D-
Texturierung

■ Beispiele:

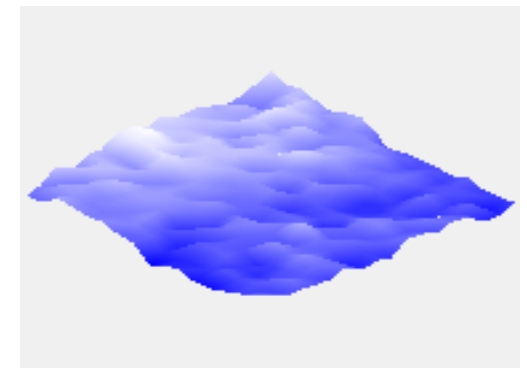
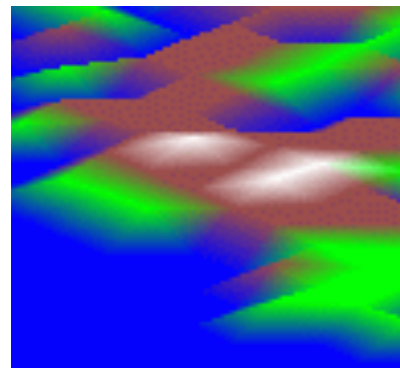
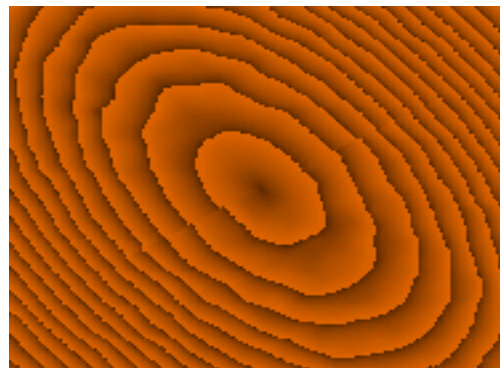
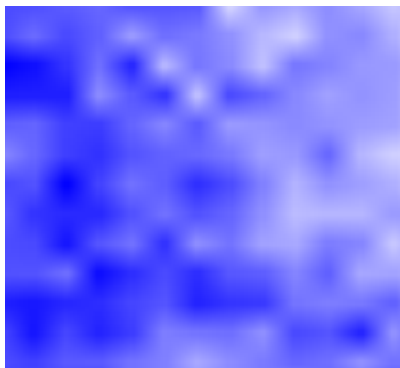


Diskrete und prozedurale Texturen

- 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

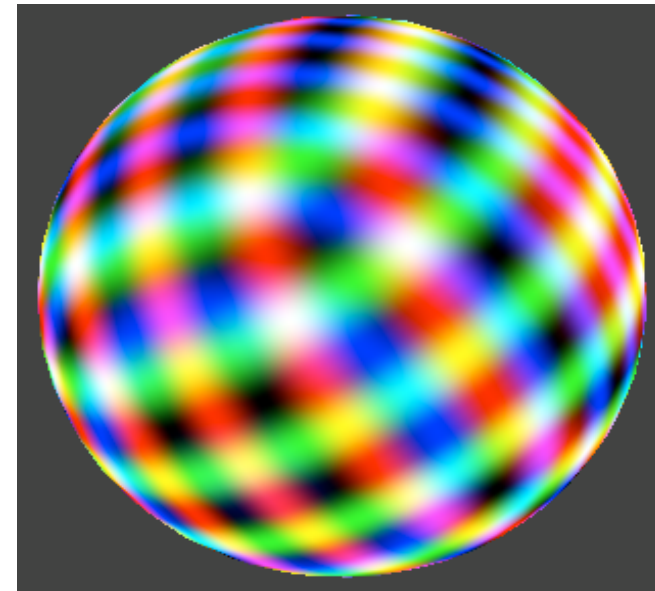
- **Prozedurale Texturen** werden an jeder Stelle im Raum aus einer mathematischen Funktion oder einem Algorithmus berechnet:

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



- Einfaches Beispiel für eine prozedurale 3D-Textur:

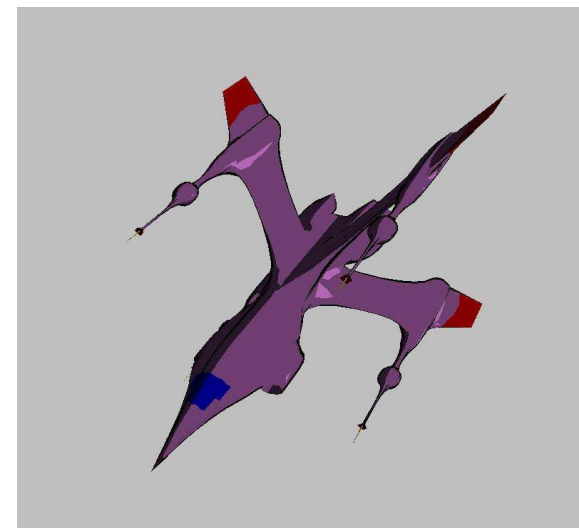
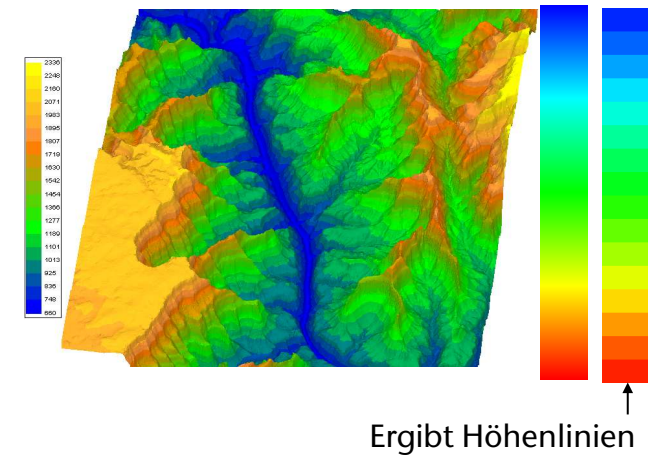
$$C = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(1 + \sin(\frac{\pi}{w_x} P_x)) \\ \frac{1}{2}(1 + \sin(\frac{\pi}{w_y} P_y)) \\ \frac{1}{2}(1 + \sin(\frac{\pi}{w_z} P_z)) \end{pmatrix}$$



- **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?)

- 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)



■ Vorteile:

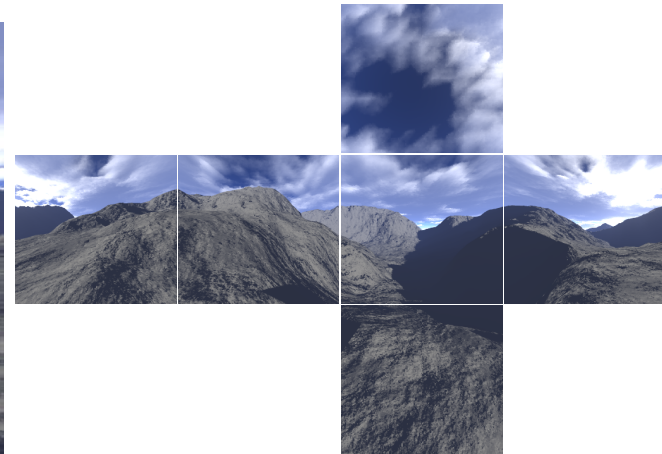
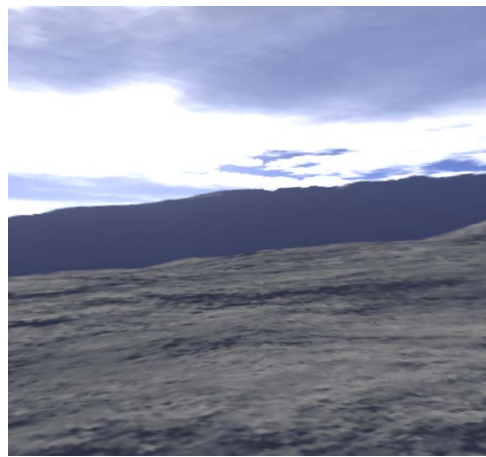
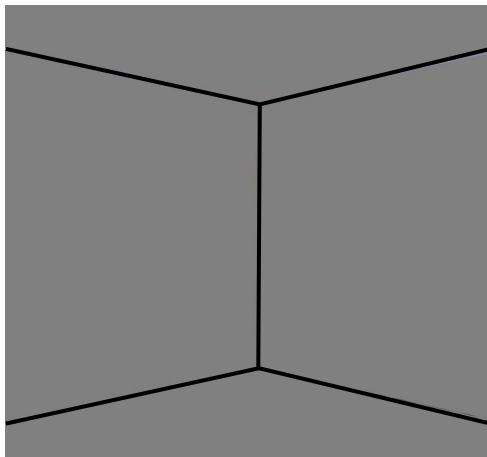
- Vorrat an Bildern nahezu unerschöpflich
- Erzeugung ist einfach (z.B. Photographie)
- Anwendung auf eine Oberfläche ist sehr schnell

■ 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 $S = \text{Dreiecks-Mesh}$

- **Textur** :=

1. Parameterraum Ω
2. Pixelbild oder Funktion (diskret / prozedural)
3. **Parametrisierung / Mapping** = Abbildung f zwischen Textur und Objekt:

$$f : \Omega \leftrightarrow S$$

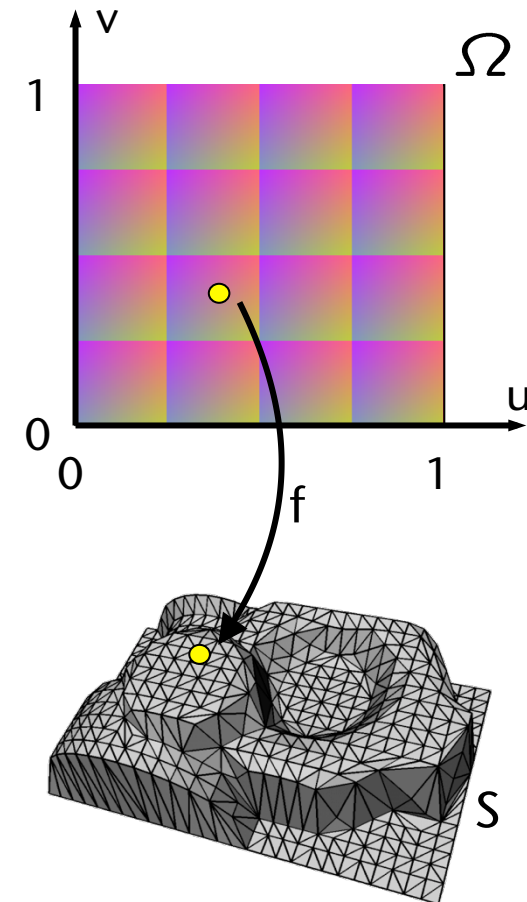
- **Texturierung** ist ein 2-stufiger Prozeß

1. Inverses Mapping:

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

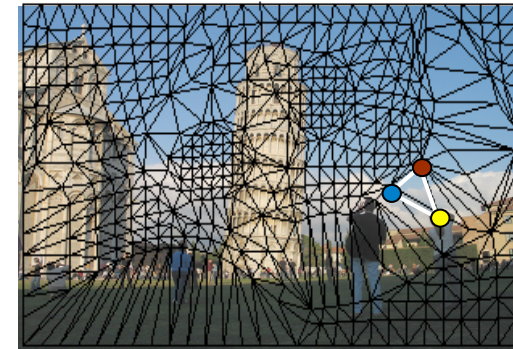
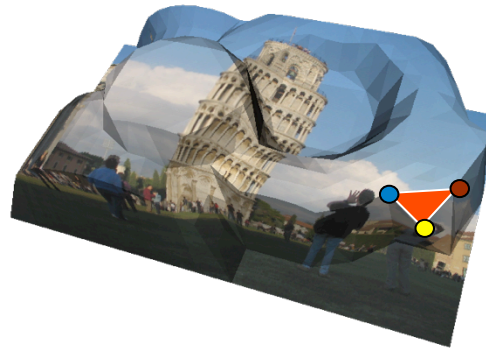
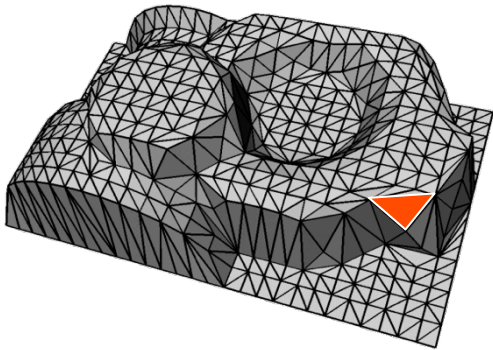
2. Farbe:

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

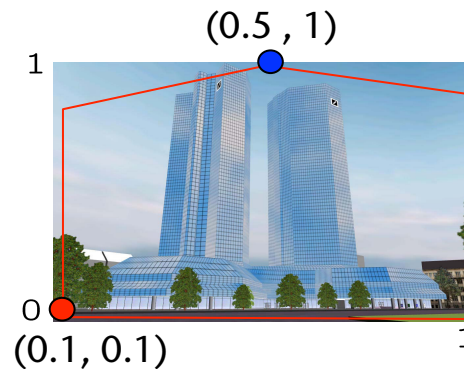
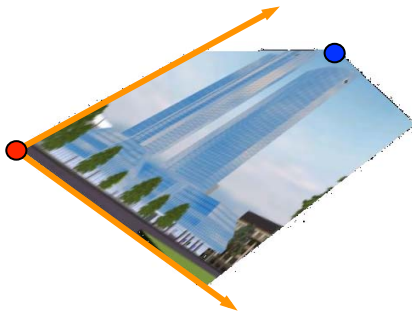


Stückweise lineare Parametrisierung durch Texturkoordinaten

- Texturierung eines kompletten Dreiecks-Mesh:

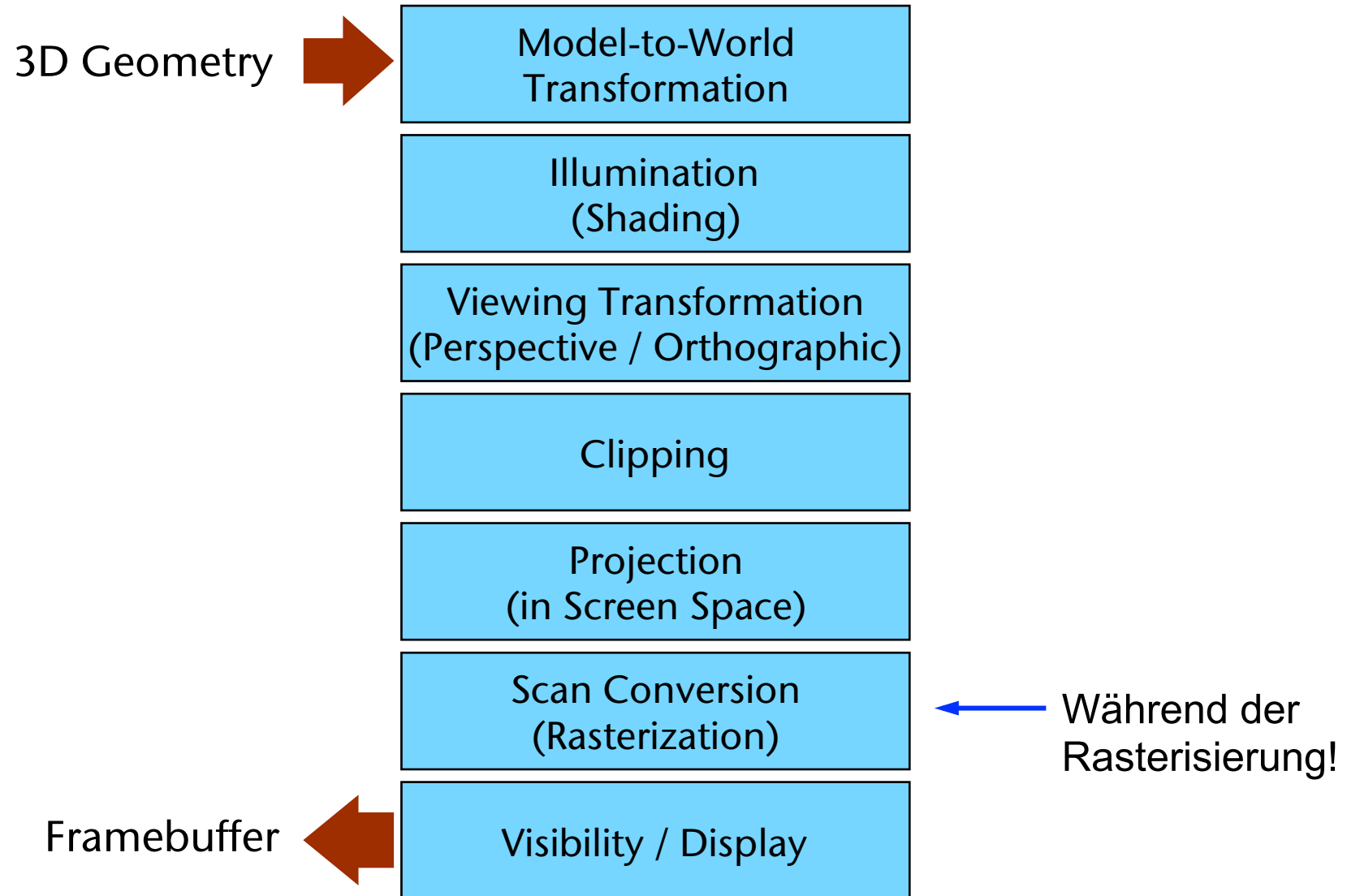


- In OpenGL: für jeden Vertex des Polygon-Meshes müssen zusätzlich **Texturkoordinaten** definiert / berechnet werden, die angeben, welcher Ausschnitt aus der Textur auf das Polygon gemappt wird:



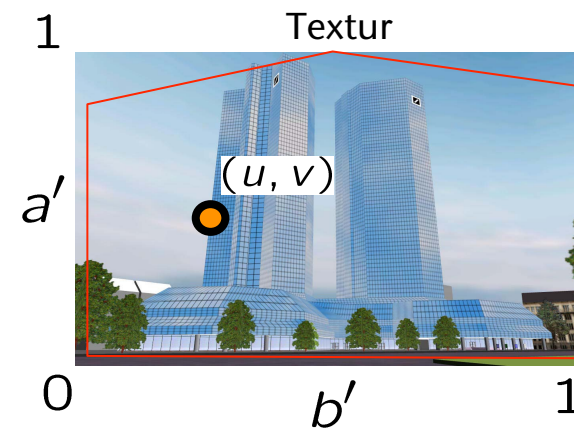
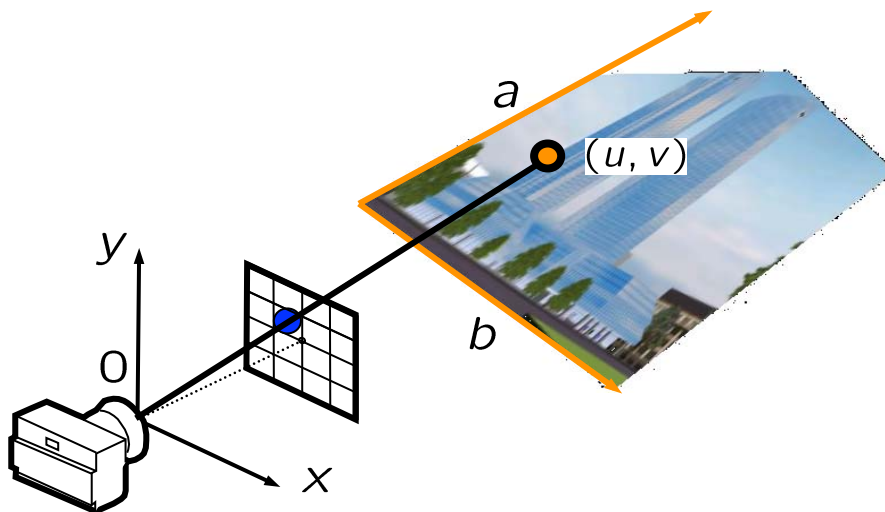
```
glBegin( GL_... )
    glTexCoord2f(...);
    glNormal3f(...);
    glVertex3f(...);
    ...
glEnd();
```

Wo in der Pipeline wird texturiert?



Interpolation der Texturkoordinaten

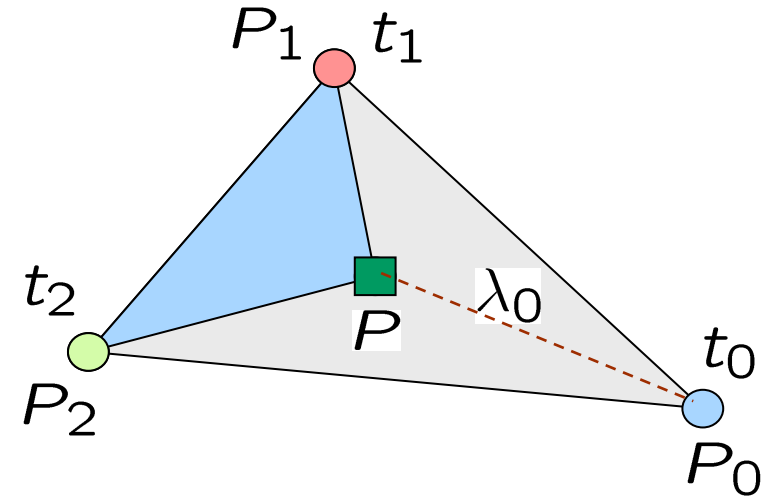
- Bei der Rasterisierung wird *für jedes Pixel* eine Texturcoordinate (u, v) aus den Texturkoordinaten der Vertices generiert (= interpoliert)
- Diese bestimmt im Koordinatensystem der Textur das **Texel (= Pixel der Textur)**, das auf das Pixel (im Framebuffer) gemapt wird



Interpolation der Textur-Koordinaten pro Fragment im Rasterizer

- Erinnerung: baryzentrische Koordinaten

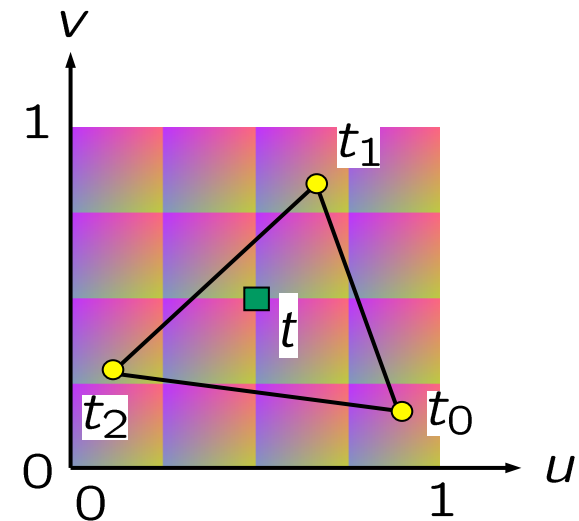
$$\lambda_i(P) = \frac{A(P, P_{i-1}, P_{i+1})}{A(P_0, P_1, P_2)}$$



- Textur-Koordinaten durch baryzentrische Interpolation:

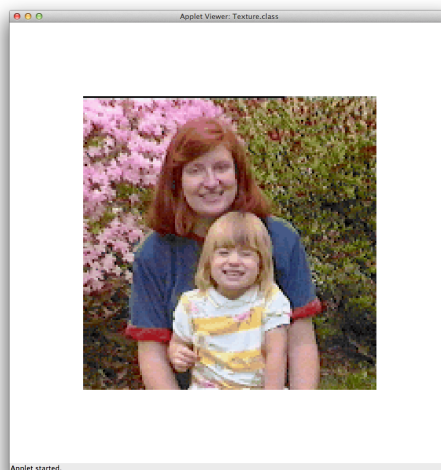
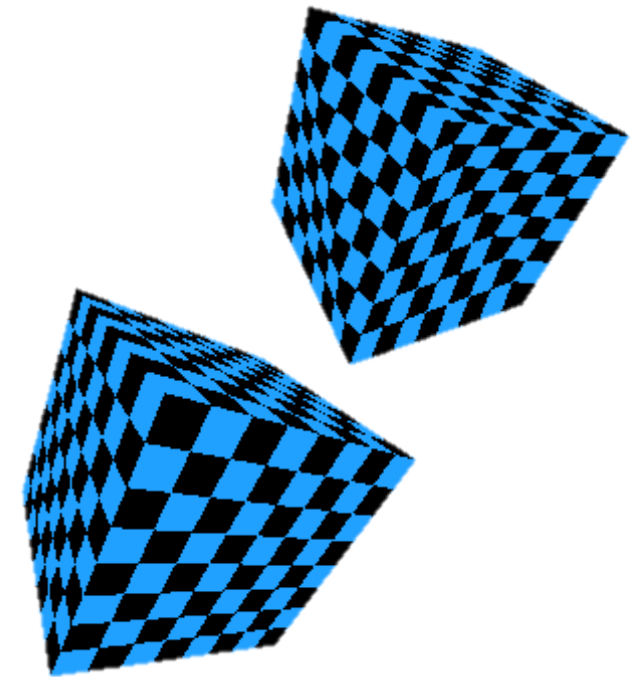
$$t(P) = \sum_{i=0}^2 \lambda_i(P) t_i$$

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

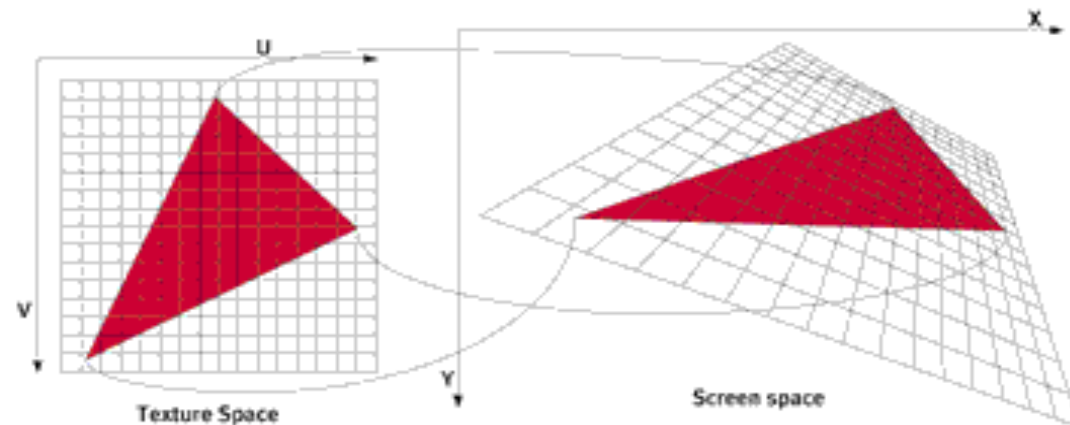


Perspektivisch korrekte Texturkoordinateninterpolation

- 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)

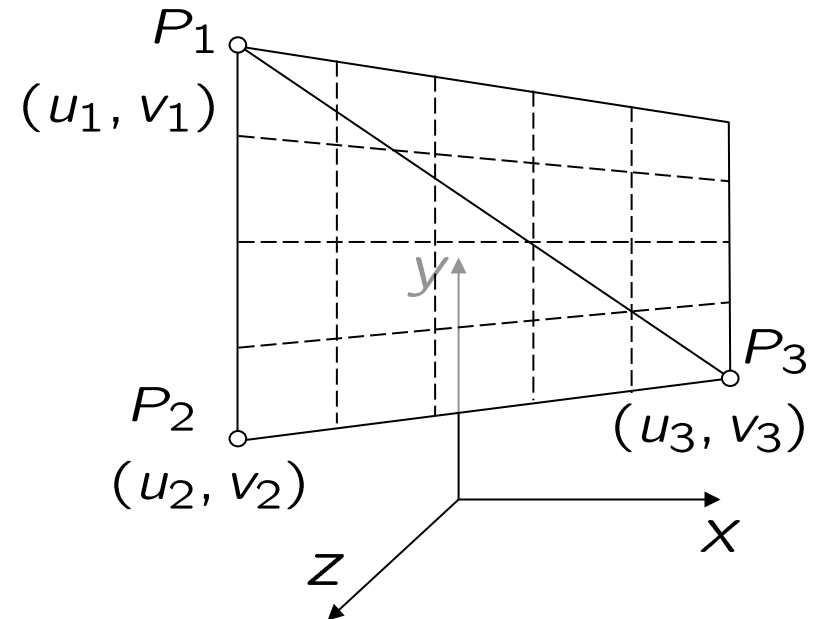


- Erinnerung: was passiert bei der perspektivischen Projektion

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

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



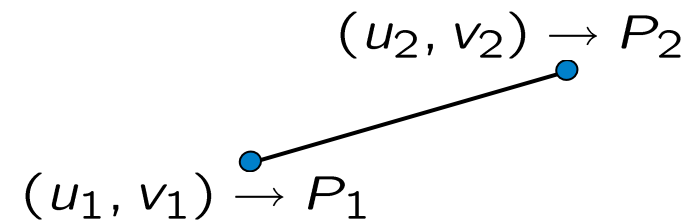
- Betrachte im Folgenden nur die Interpolation auf einer Linie
- Gegeben: t , zur linearen Interpolation zwischen \hat{P}_1 und \hat{P}_2 , d.h.

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

- 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:

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

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

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

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

- Frage: wie sieht $\text{Proj}(P(t))$ 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:

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

$$\frac{x_1(w_1 + t(w_2 - w_1)) + tw_2w_1 \left(\frac{x_2}{w_2} - \frac{x_1}{w_1} \right)}{w_1(w_1 + t(w_2 - w_1))} =$$

$$\frac{x_1w_1 + tw_2x_1 - tw_1x_1 + tw_1x_2 - tw_2x_1}{w_1^2 + tw_2w_1 - tw_1^2} =$$

$$\frac{x_1w_1 - tw_1x_1 + tw_1x_2}{w_1^2 + tw_2w_1 - tw_1^2} = \frac{x_1 - tx_1 + tx_2}{w_1 + tw_2 - tw_1} =$$

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

- 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

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

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

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

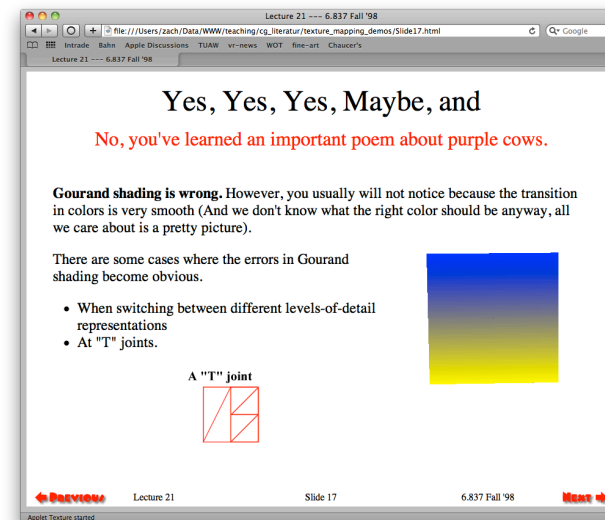
$$\Rightarrow t = \frac{sw_1}{w_2 + s(w_1 - w_2)}$$

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

- Analog funktioniert es bei 3 baryzentrischen Koordinaten:

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

- 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

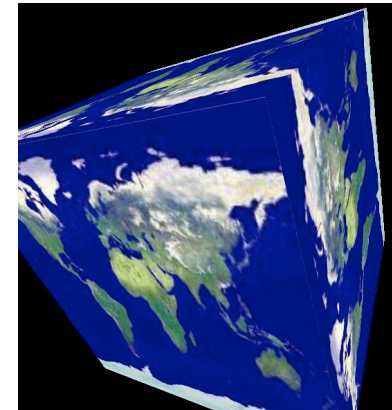
- Wie kann ein Texturwert die Beleuchtungsrechnung beeinflussen?
(Was kann man mit einer Textur machen?)
- Erinnerung: das Blinn-Phong-Modell

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

1. Ersetzen der Objektfarbe (*replace*)

- Einfachste Art der Texturierung
- Jegliche Beleuchtung wird entfernt

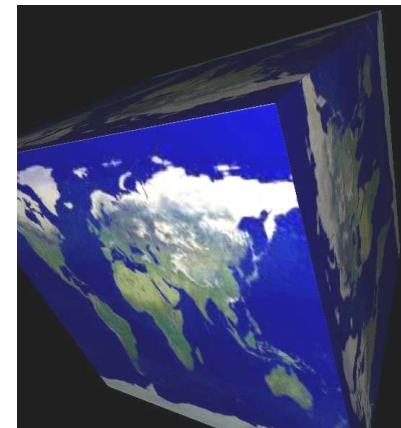
$$L_{\text{out}} = C_{\text{tex}}(u, v)$$



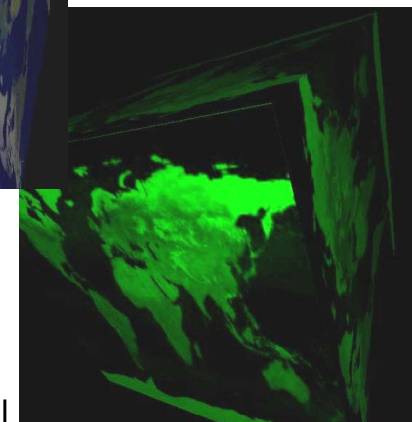
2. A posteriori Skalierung der Farbe (*modulate*)

- 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

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

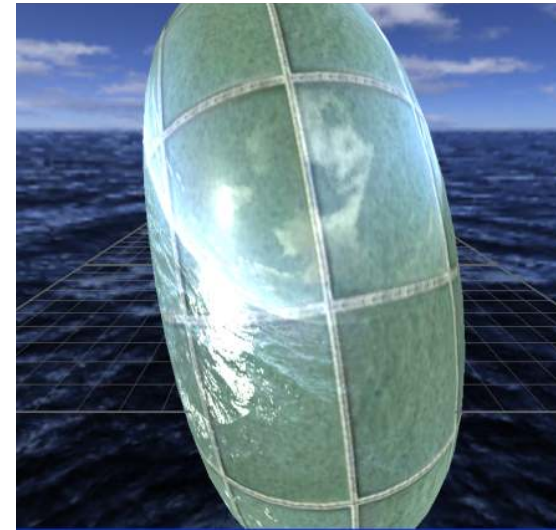
- Erinnerung: Farbe des Objektes wird durch r_a und r_d bestimmt
- Wichtig: im Unterschied zu (2) bleibt der spekulare Anteil von der Textur **unbeeinflusst**

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

- Analog zu (3) für r_s

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

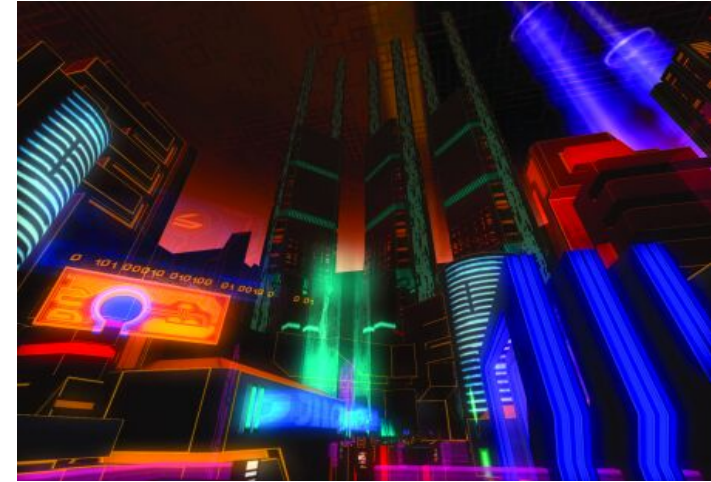
- Erlaubt Modellierung unregelmäßiger "*shininess*" (z.B. verschmutzte / fettige Flächen)
- Geht nur mit Vertex- und Fragment-Shaders



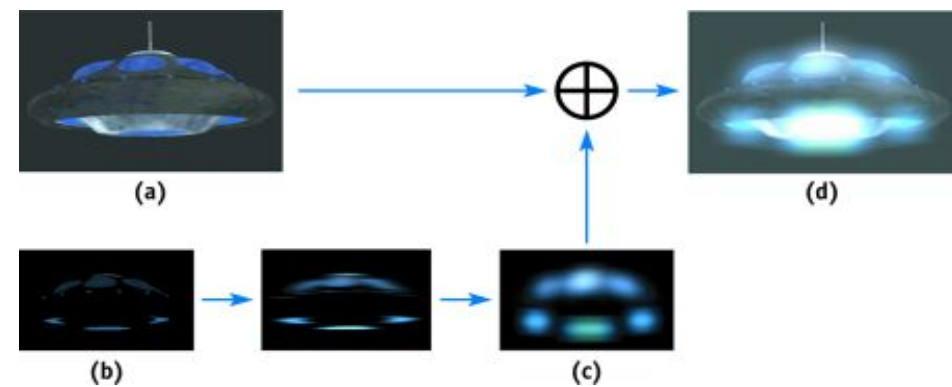
4.1 "Glow"-Effekt:

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

- For neon signs, TV, laser beams etc.

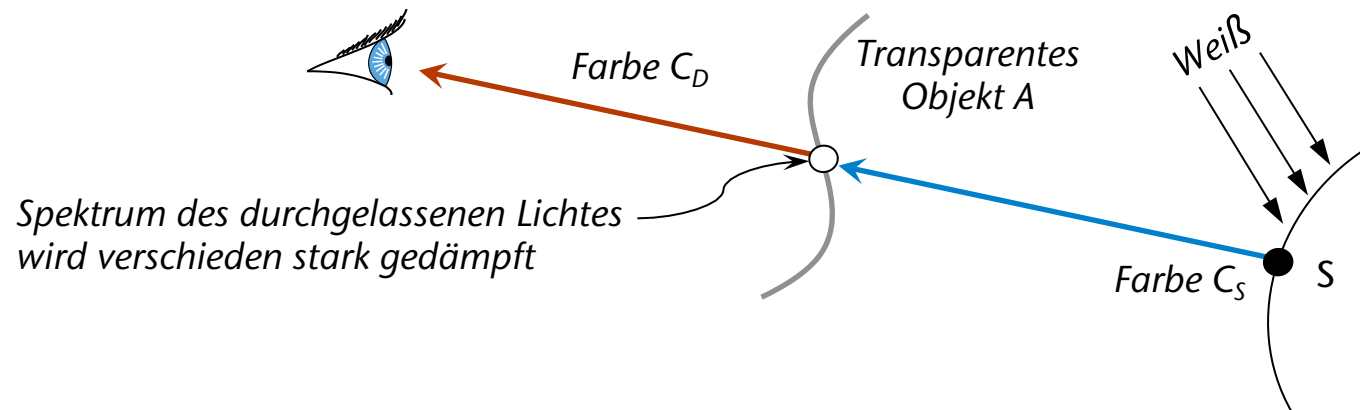


- Solche Effekte (Halos) gehen aber nur mit Multi-Pass-Rendering (Filterung):



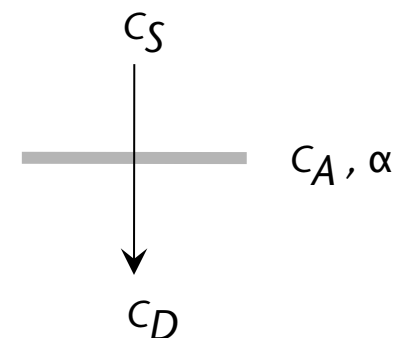
Exkurs: das Rendering transparenter Objekte

- Transparenz \approx 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:

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



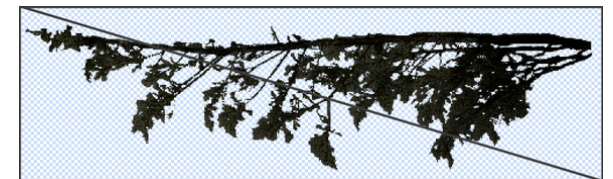
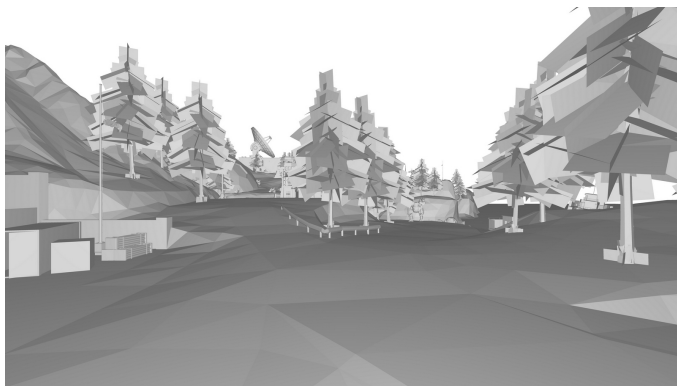
wobei $C_D / C_S =$ Farbe im Framebuffer nach / vor dem Rendern von Obj. A ist

5. Modulation der Transparenz

- Speichern der „Durchsichtigkeit“ in einer Textur:

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

- Pixel mit $\alpha=0$ sind voll durchsichtig und Pixel mit $\alpha=1$ sind voll undurchsichtig (opak)
- Ermöglicht komplexe Umrisse

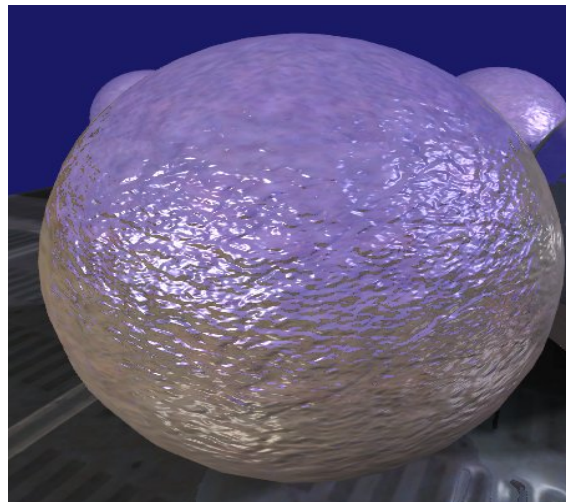


Enemy Territory: Quake Wars. Splash Damage & Intel

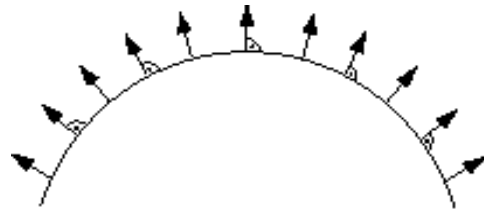
6. Perturbation der Normale (*Bump- / Normal-Mapping*)

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

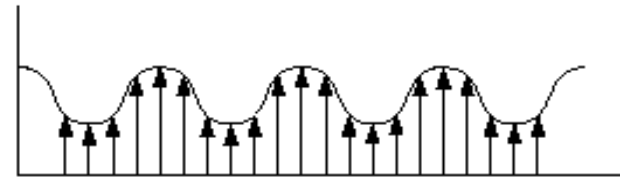
$$\mathbf{n}(x, y) = f(C_{\text{tex}}(u, v))$$



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



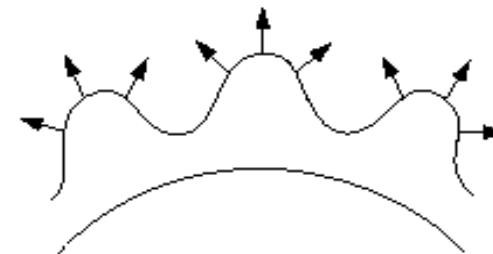
Original-Oberfläche $P(u, v)$
mit Normalen $N(u, v)$



Bump-Map $F(u, v)$



Offset-Oberfläche \hat{P}

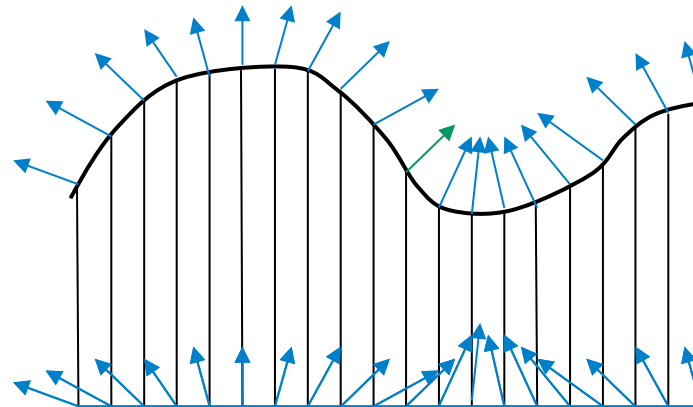


Perturbierte Normalen $\hat{N}(u, v)$

- **Bump-Map** = Offset entlang der orig. Normale = skalare Textur

- Resultierende Oberfläche :
$$\hat{P}(u, v) = P(u, v) + F(u, v) \frac{N(u, v)}{\|N(u, v)\|}$$

- 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 \rightarrow 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:

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

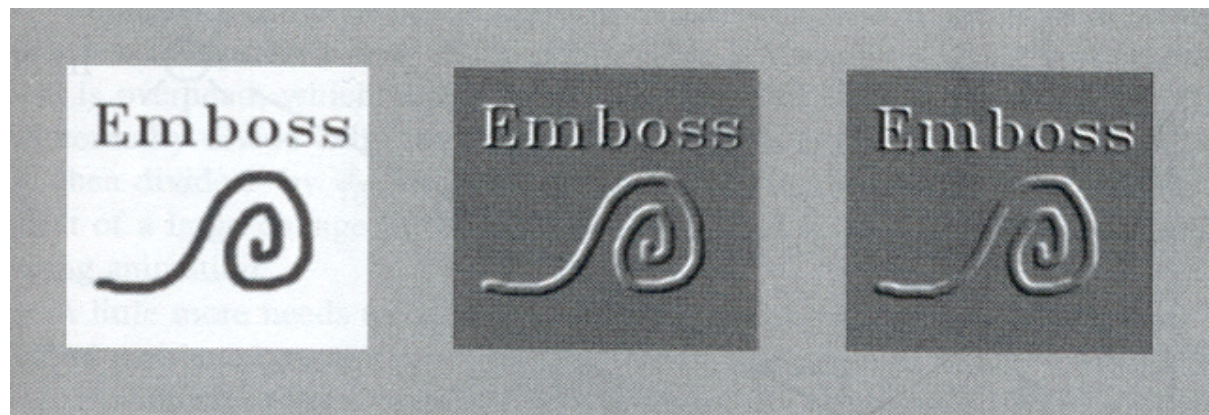
- Die Ableitungen F_u und F_v können mit **finiten Differenzen** approximiert werden
- Finite Differenzen auf uniformem Gitter der Gittergröße h (im 1D)

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

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

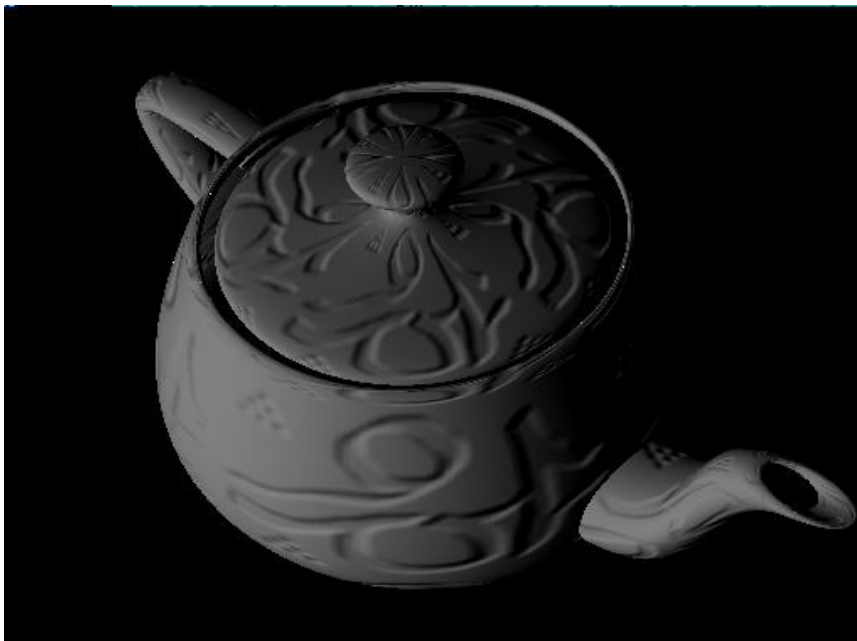
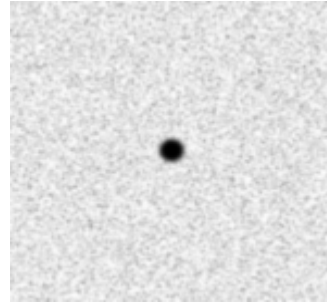
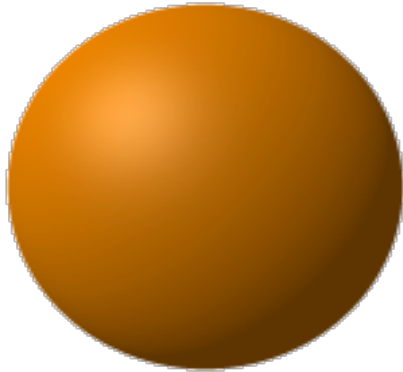
- Zentrale Differenzen:
$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2h}$$

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

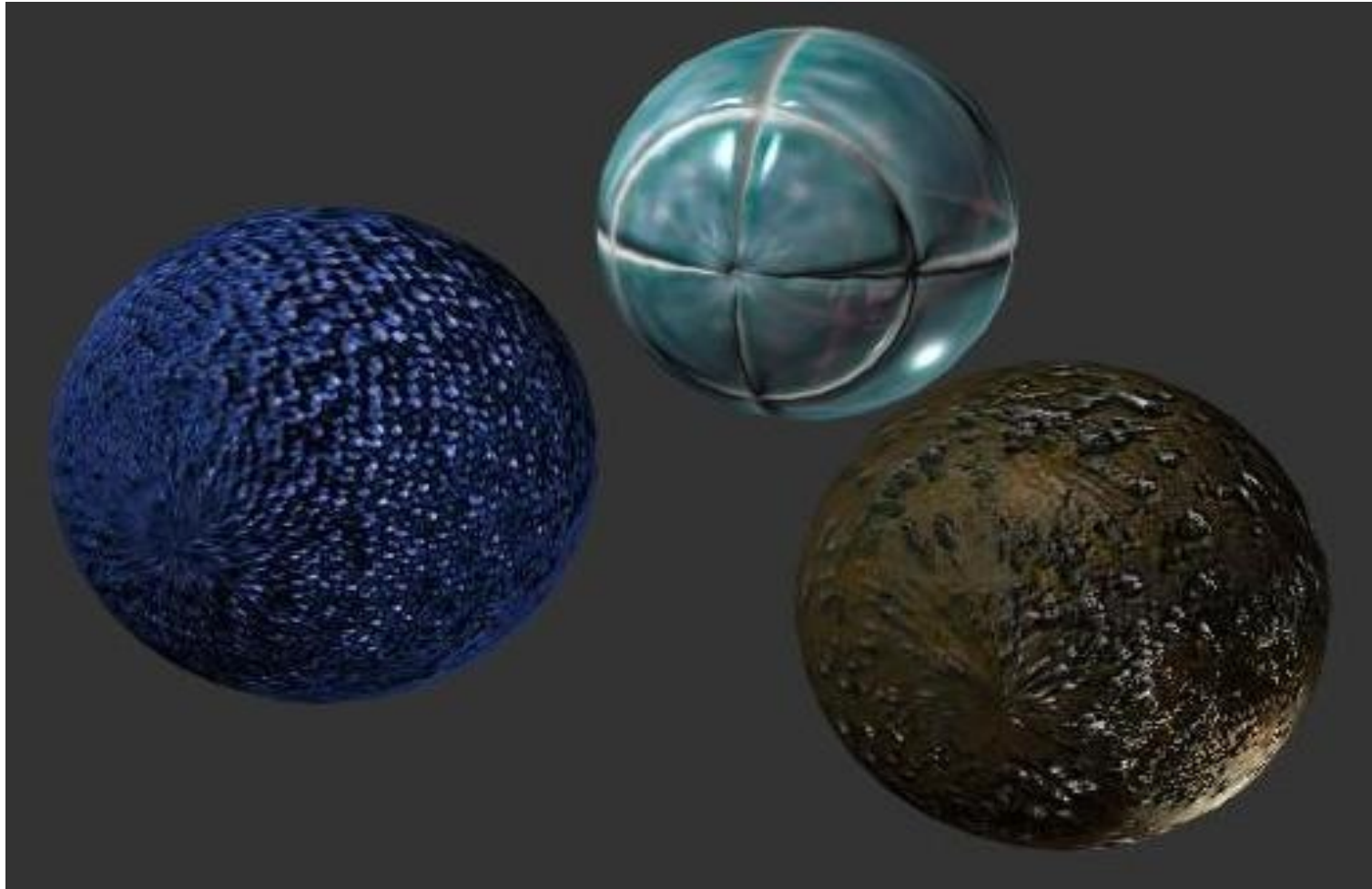


Original Höhenfeld u-Richtungsableitung v-Richtungsableitung

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



Multi-Textures (Bump und Environment)

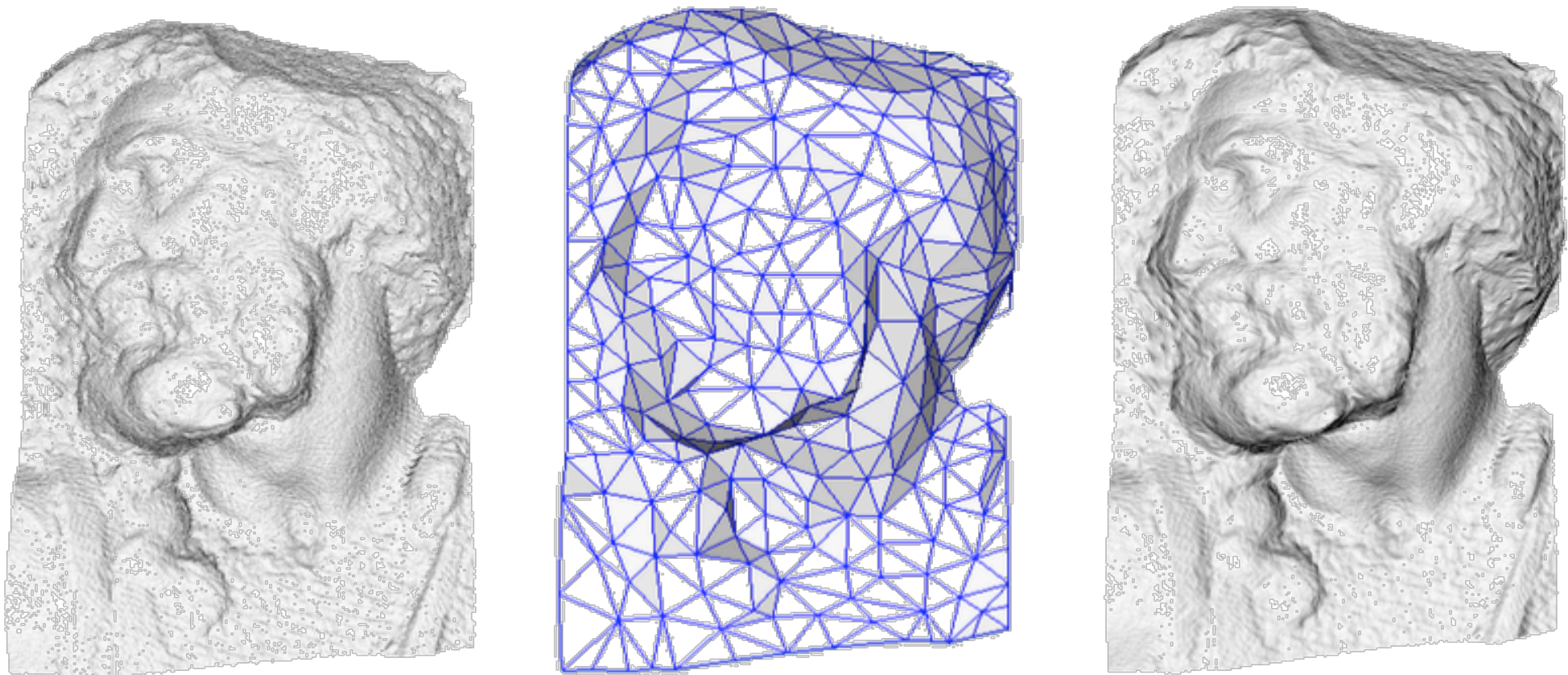




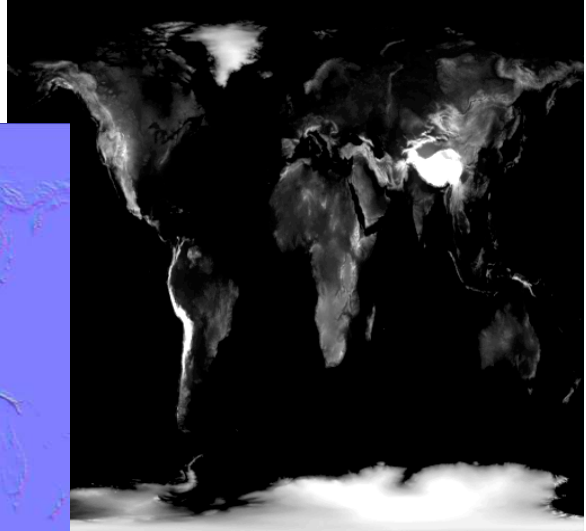
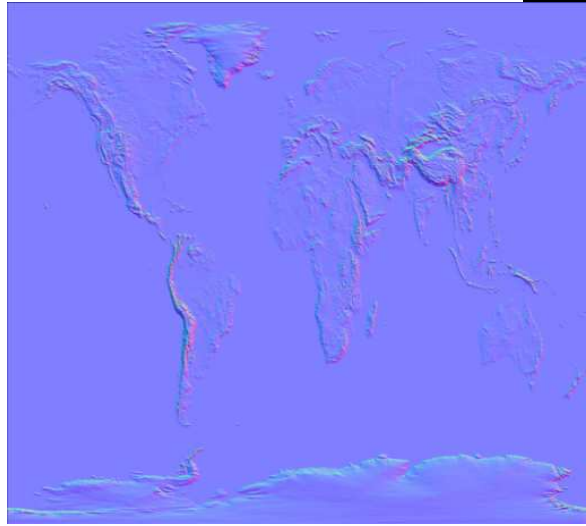
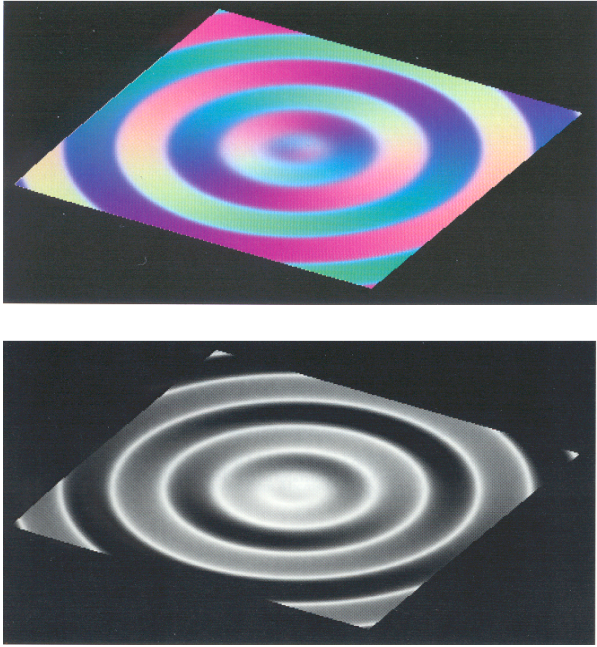
Enemy Territory: Quake Wars. Splash Damage & Intel

Normal Maps

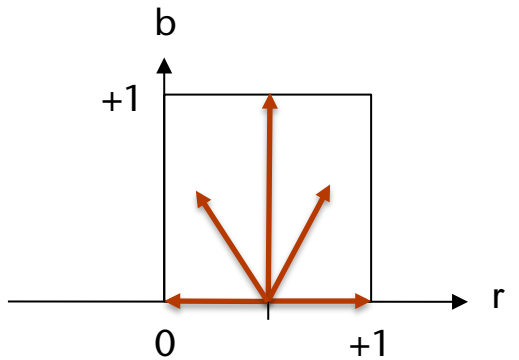
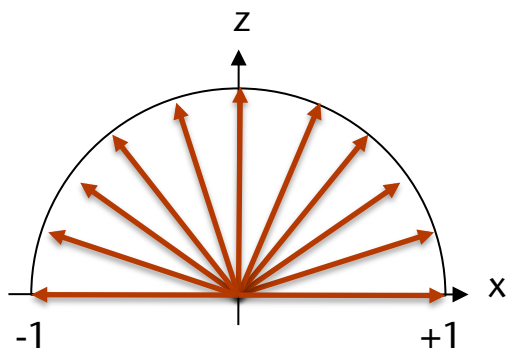
- Normalen in hoher Auflösung in Textur speichern
- Für niedrig aufgelöste Geometrie



■ Beispiele:

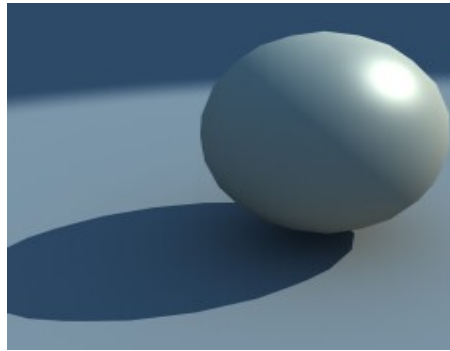


■ Kodierung der Normalen:

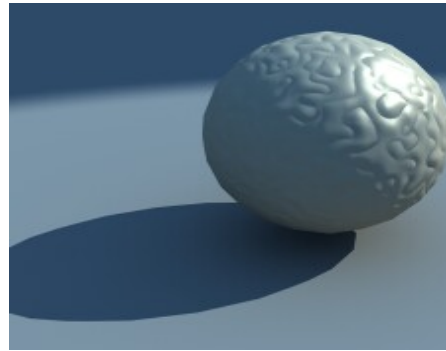


- Unterschied zwischen Normal Maps und Bump Maps:
 - Bump Maps sind **unabhängig** von der Geometrie, man kann sie auf jede beliebige (genügend "flache") Geometrie aufbringen.
 - Normal Maps kann man nur für genau die Geometrie verwenden, für die sie erzeugt wurden.

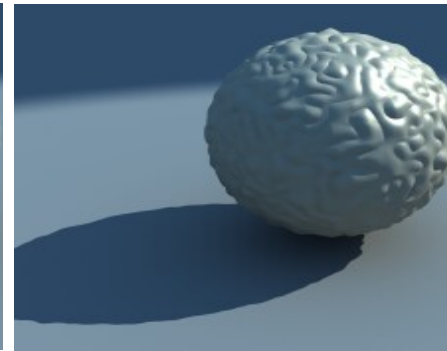
Beispiele für Displacement-Mapping



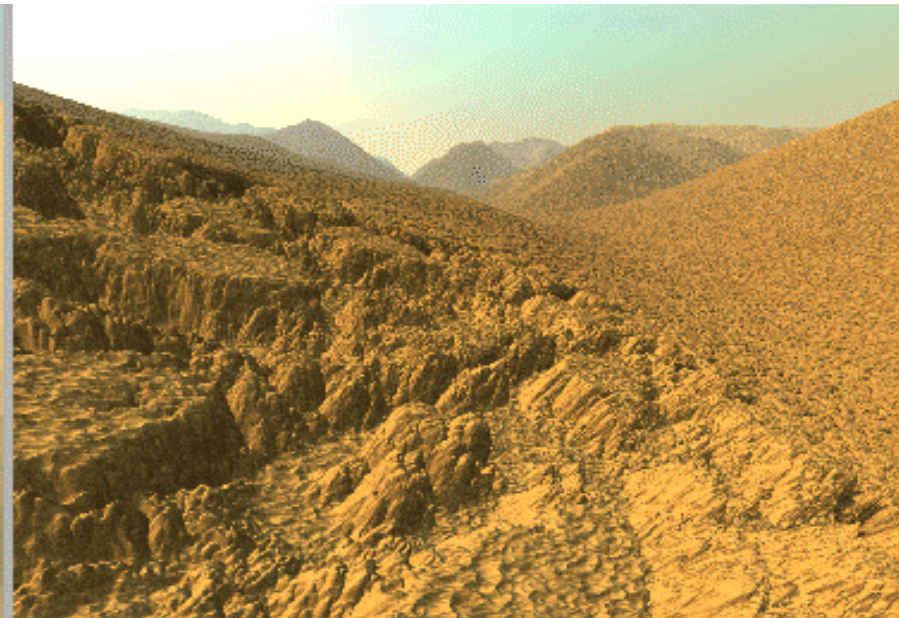
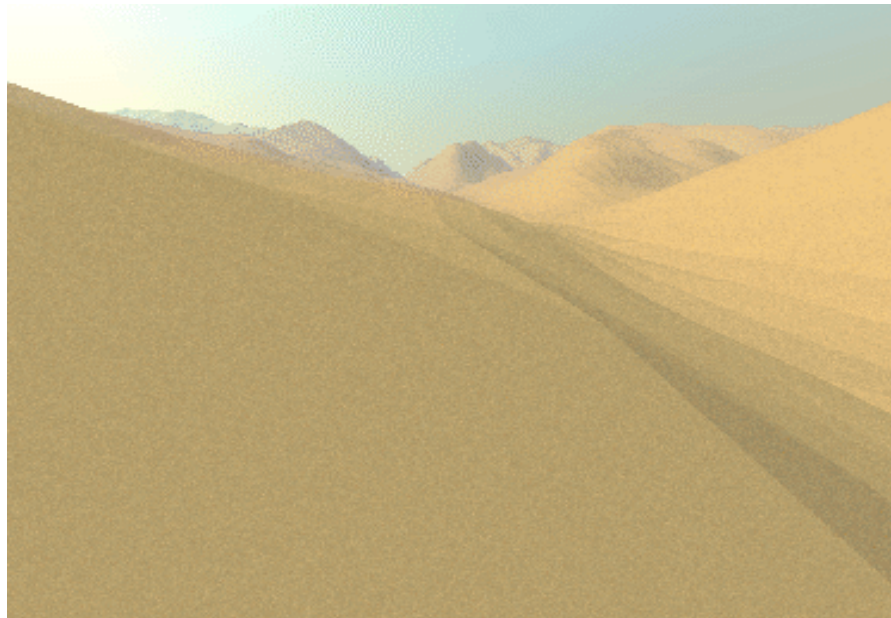
Geometrie



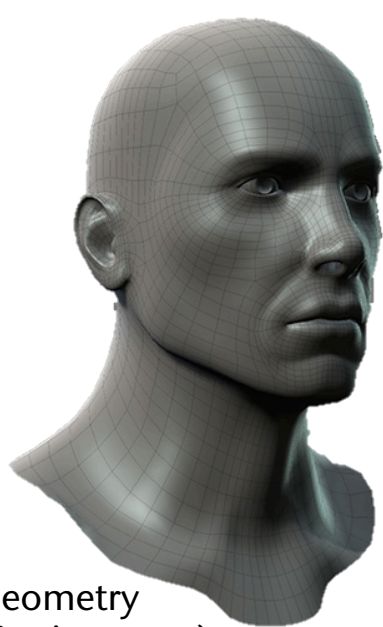
Bump Mapping



Displacement Mapping



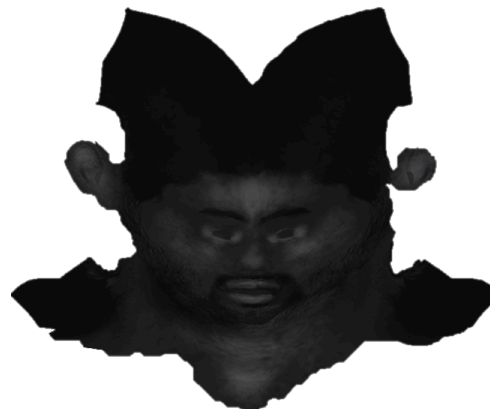
Beispiel für eine Kombination der Textur-Arten



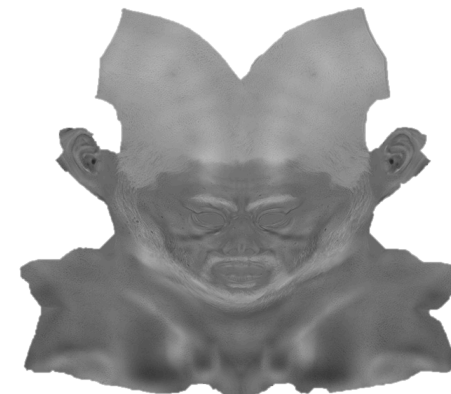
Geometry
(2 mio pgons)



Diffuse Map



Gloss Map (specularity map)



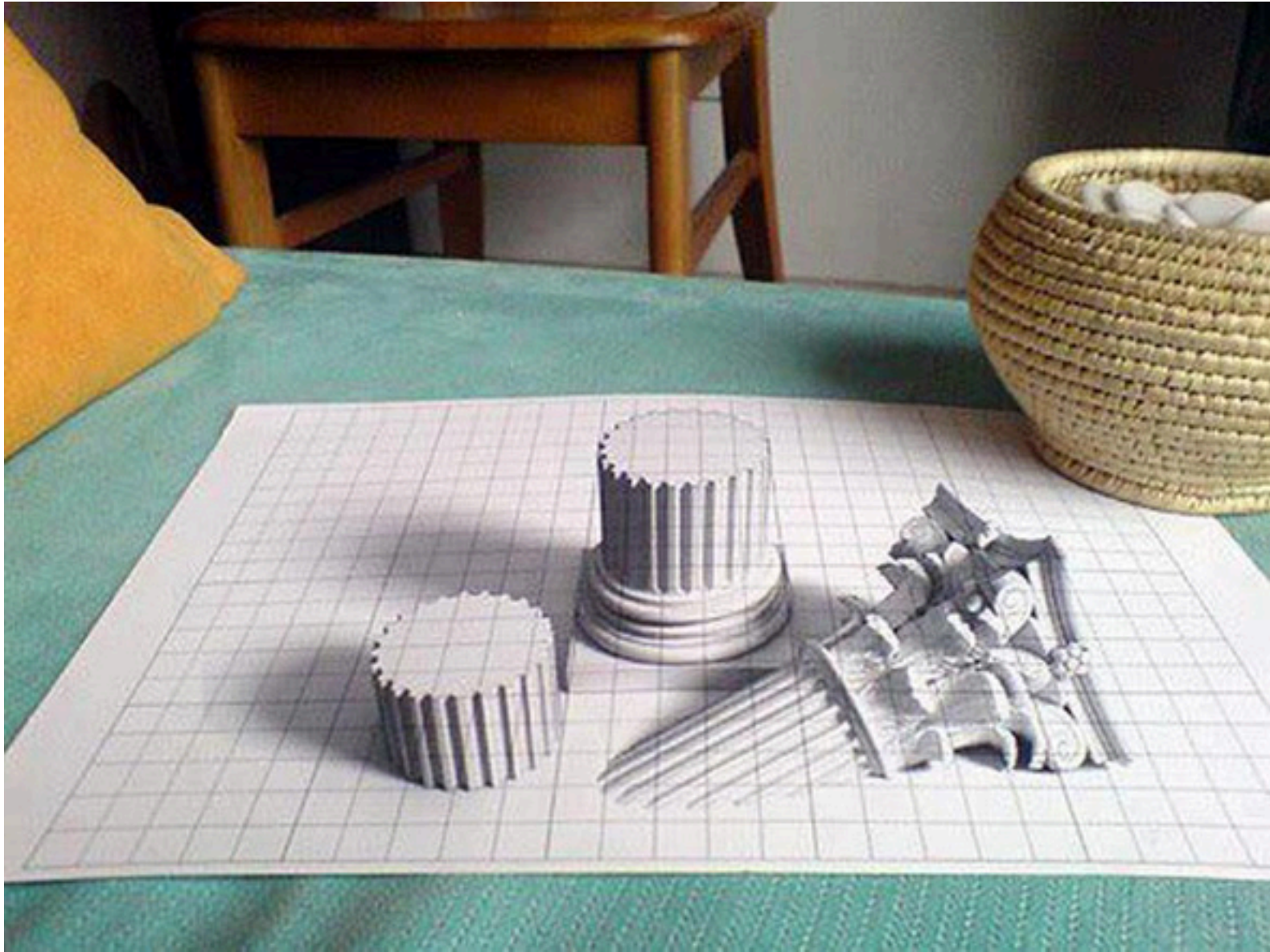
Bump Map



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

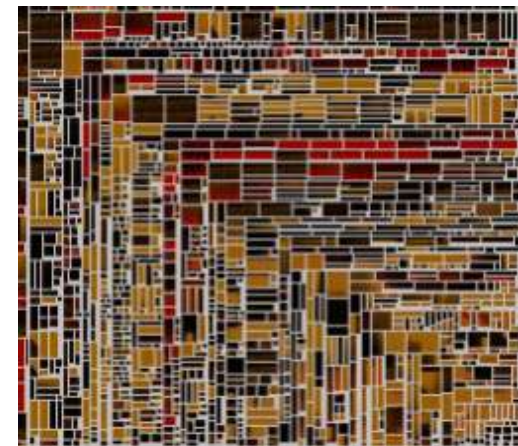


- Light Maps:

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



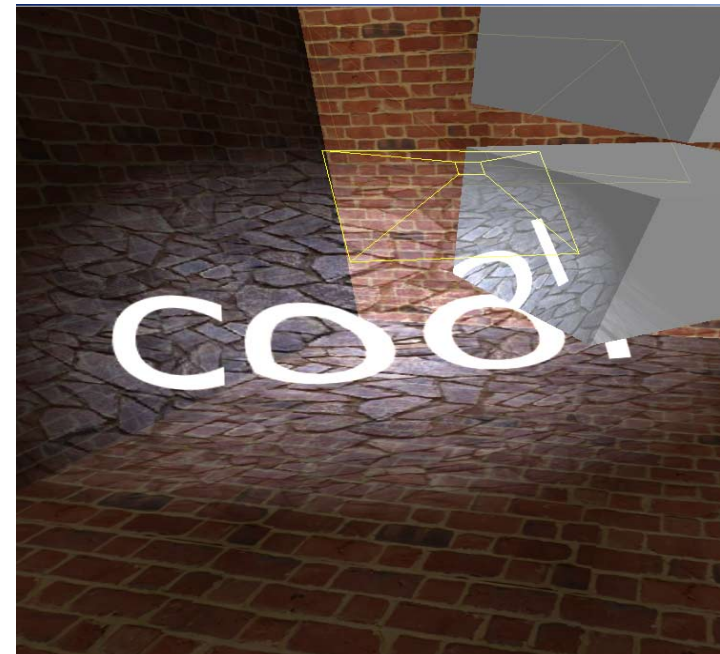
- So kann man leicht den Lichtschein eines Bullets wandern lassen
 - Weil die Illumination räumlich nur niedrige Frequenzen hat, ist nur eine gering aufgelöste Textur erforderlich
 - Viele kleine Light Maps können in eine große Textur verpackt werden
 - Light Maps werden gewöhnlich mittels Raytracing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

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



- 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** = $2^n + 2 * \text{border}$ 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:

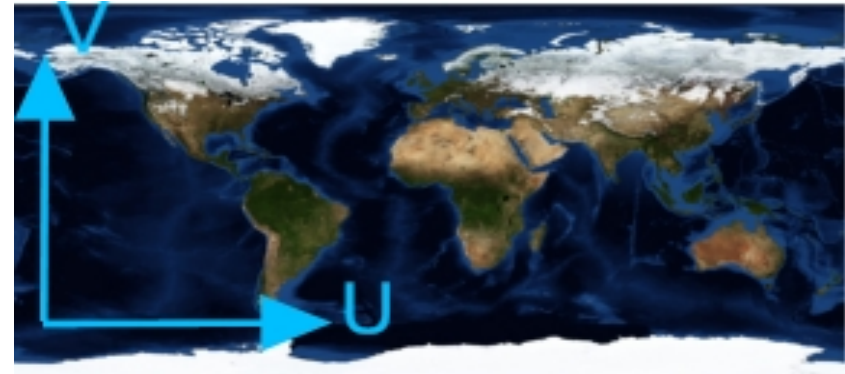
```
glTexCoord{1234}f[v]( value )
```

- das Bild liegt dabei im Bereich $[0,1] \times [0,1]$
- 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

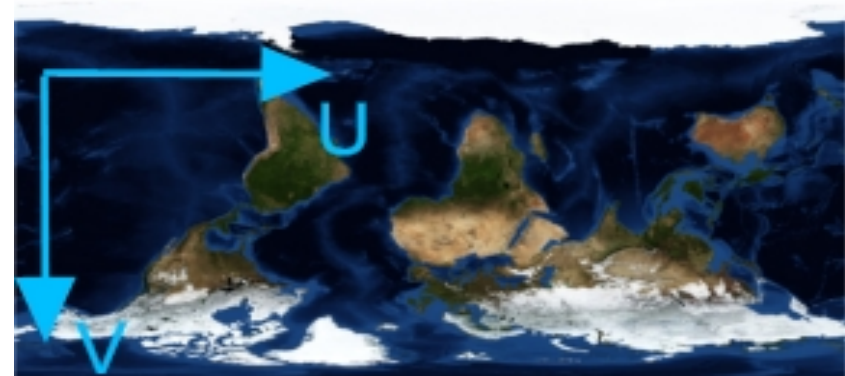
Orientierung

- 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 ...

- 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:

```
glTexEnvf( 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

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

- **GL_DECAL**:

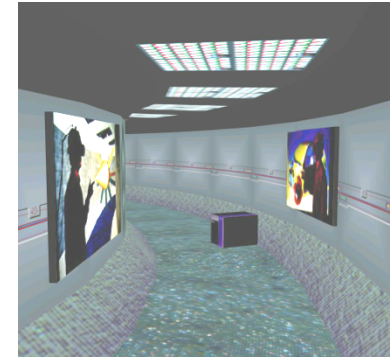
$$\alpha_T \cdot T_{RGB\alpha} + (1 - \alpha_T) \cdot F_{RGB\alpha}$$

- **GL_BLEND**:

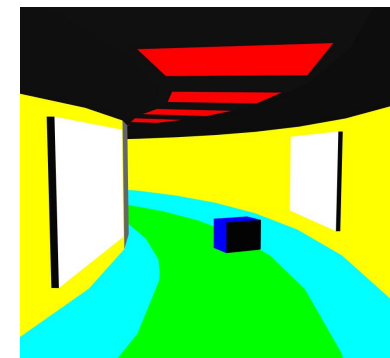
$$F_{RGB} \cdot (1 - T_{RGB}) + C_{RGB} \cdot T_{RGB}$$

und C wird definiert über

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



T = Texelfarbe



F = Pixelfarbe
ohne Textur

- Was geschieht, wenn Texturkoordinaten außerhalb $[0,1] \times [0,1]$ definiert werden?

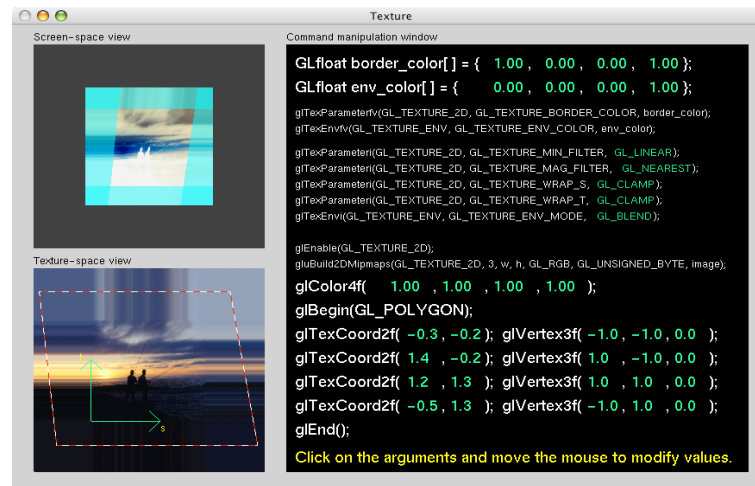
```
glTexParameteri( GL_TEXTURE_{12}D, name, value )
```

```
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>

- 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();
```

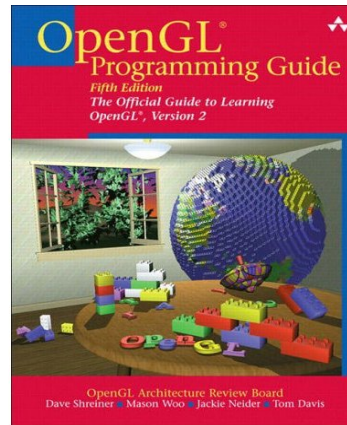
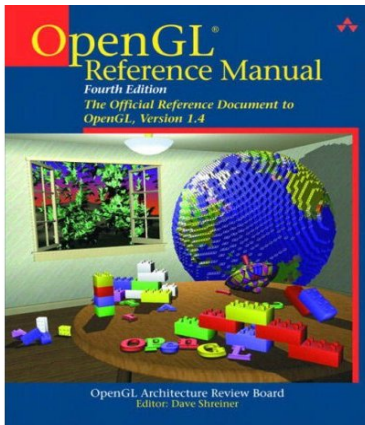
- Im Vertex-Shader werden die Texturkoordinaten im Wesentlichen einfach nur "durchgereicht" (oder überhaupt erst erzeugt):

```
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 );  
}
```

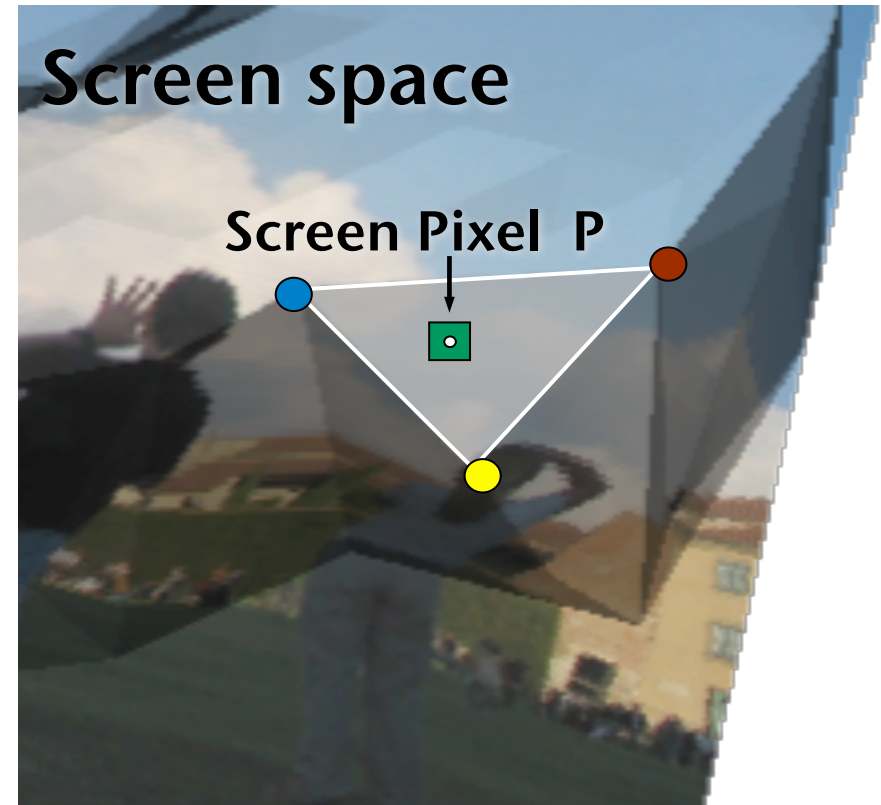
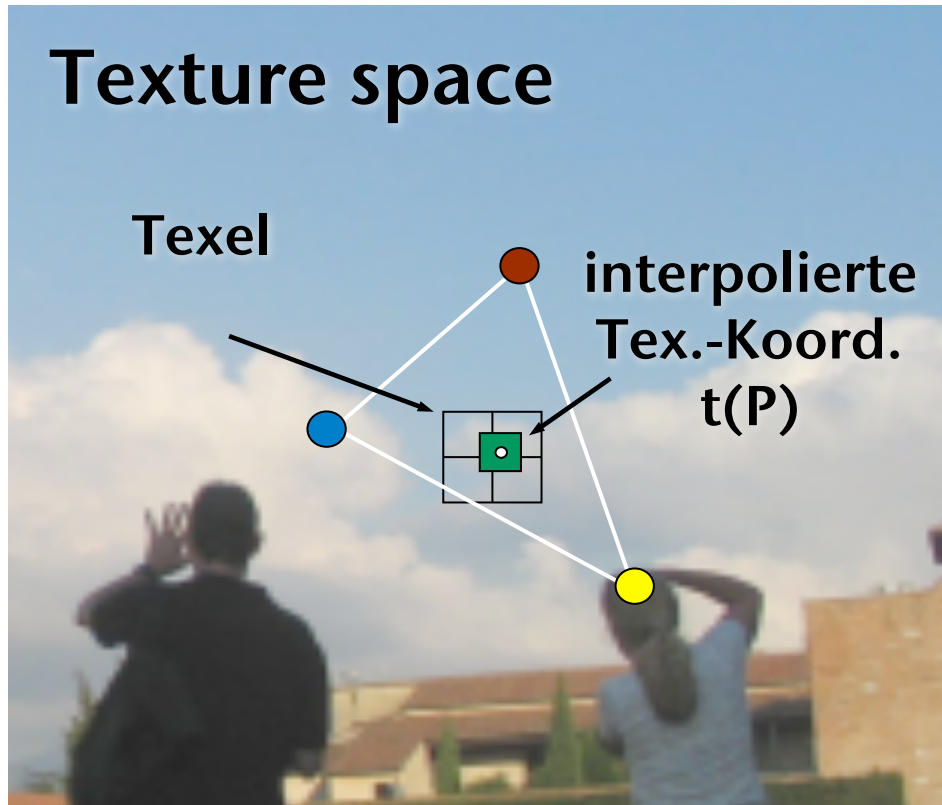
- Texturierung an sich ist eine sehr mächtige (und etwas komplexe) Technik
- Texturierung in OpenGL ist – zwangsläufig – etwas komplexer als die meisten anderen Teile des APIs
- Besser vor einer Implementierung nochmals nachlesen



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

Man Pages

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

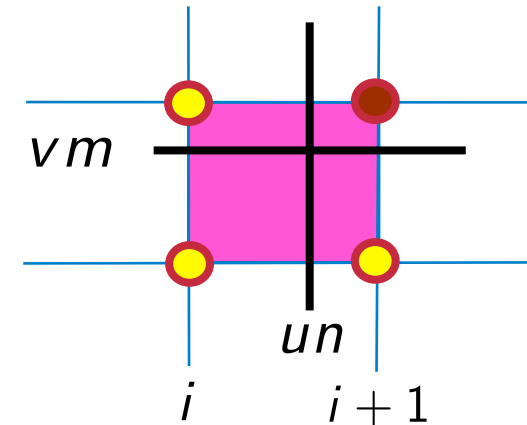


- Nearest neighbour, oder
- Bilineare Interpolation der Texel

- Textur = $m \times n$ Array C von Texeln,
 $t(P) = (u, v) \in [0, 1] \times [0, 1]$

1. Nearest neighbour (Punktfilter):

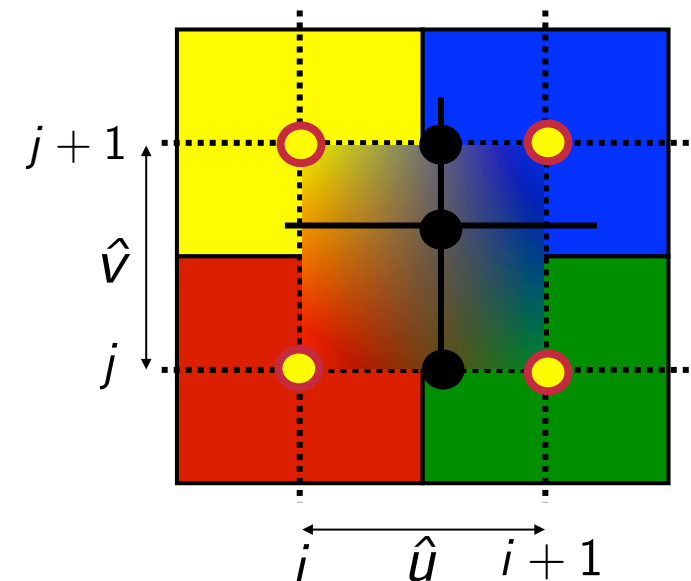
$$C_{\text{tex}} = C[\lfloor un \rfloor, \lfloor vm \rfloor]$$



2. Bilineare Interpolation:

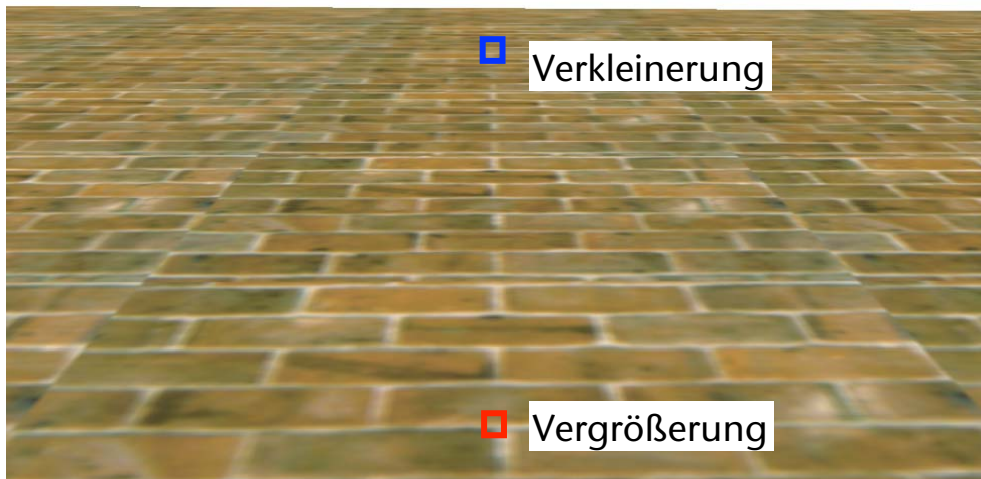
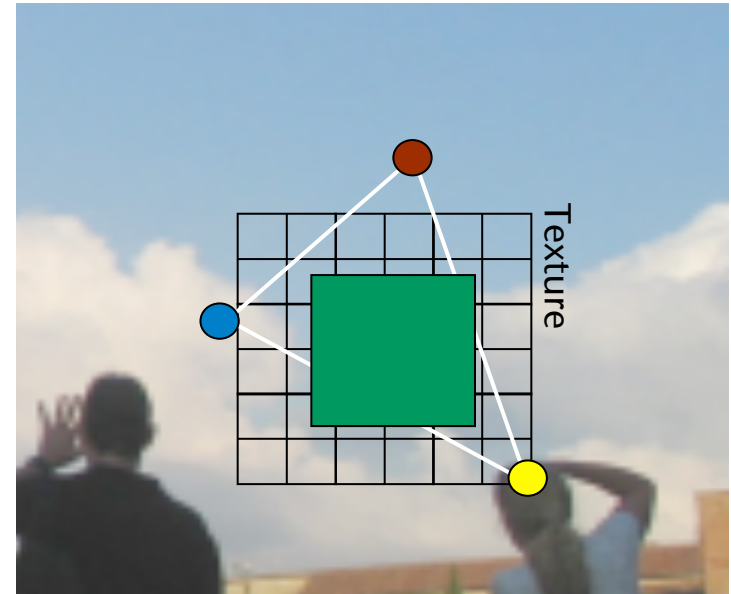
$$\hat{u} = un - \lfloor un \rfloor, \quad \hat{v} = vm - \lfloor vm \rfloor$$

$$c = (1 - \hat{u}) \left((1 - \hat{v}) \text{red} + \hat{v} \text{yellow} \right) + \hat{u} \left((1 - \hat{v}) \text{green} + \hat{v} \text{blue} \right)$$

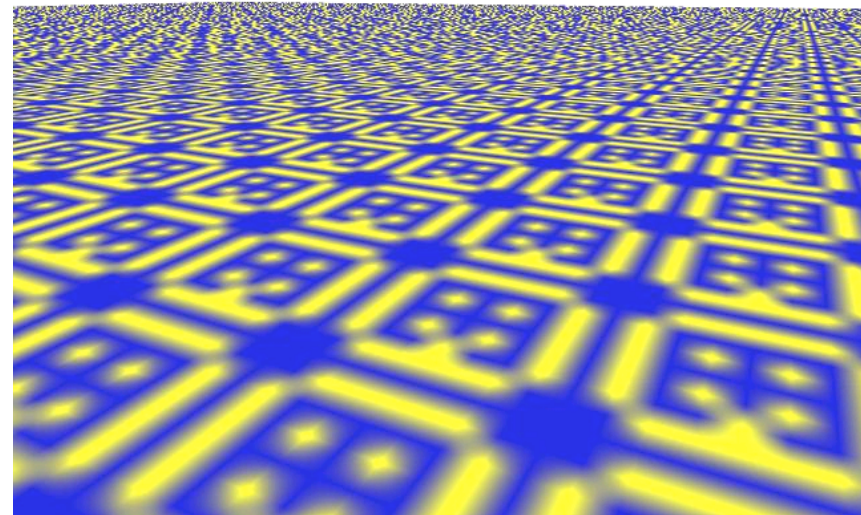
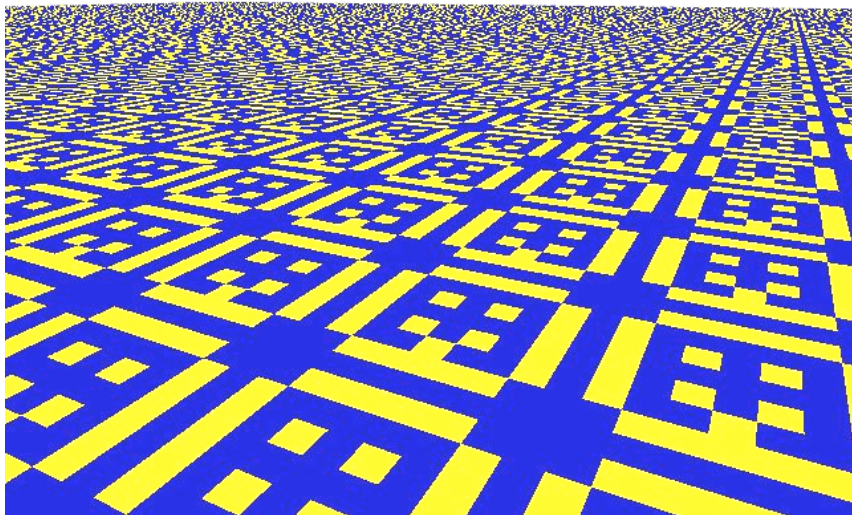


Texturverkleinerung

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



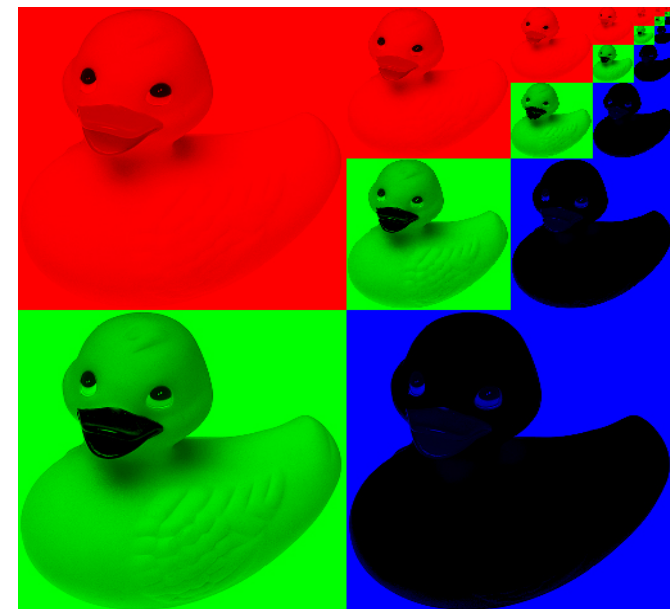
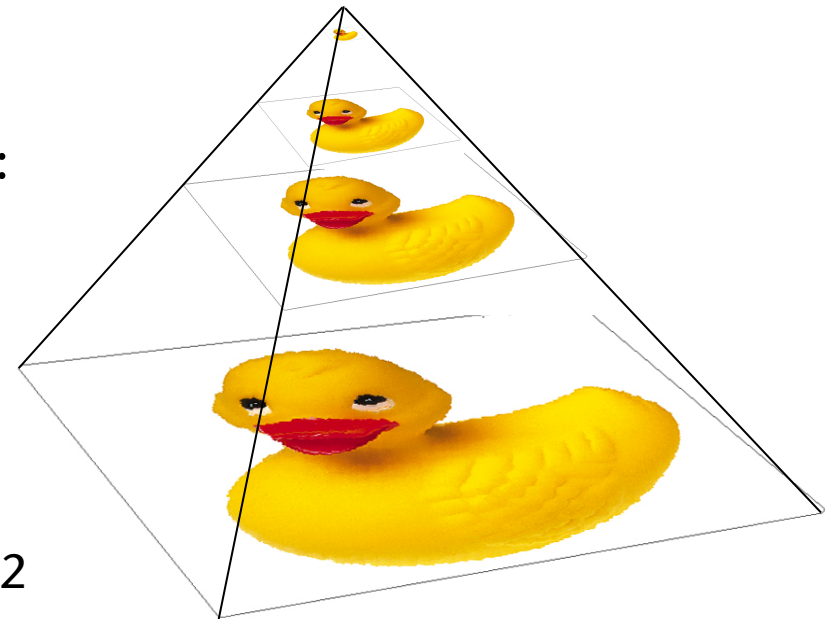
- Schwierigeres und "heißes" Problem
- Es gibt viele Möglichkeiten zur Lösung
 1. Auch hier den einfachen Punktfiler → Aliasing
 2. Lineare Interpolation hilft nur wenig



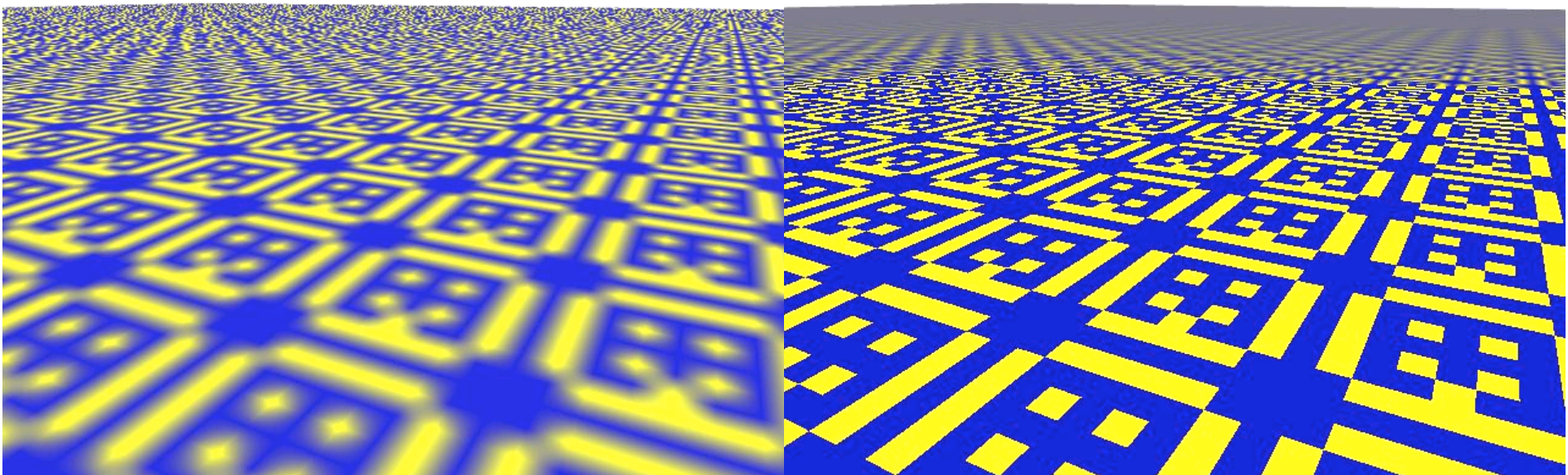
- Bei starker Verkleinerung müsste eigentlich eine Mittelung von vielen Texeln durchgeführt werden, da sie alle auf 1 Pixel auf dem Bildschirm abgebildet werden
- Für Echtzeitanwendungen und Hardwarerealisierungen ist das zu aufwendig
- Lösung: Preprocessing
 - Vor dem Start verkleinerte Versionen der 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 $2^n \times 2^n$ groß sein!
 - Einfachste Art der Zusammenfassung: 2×2 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 $1.3 \times$ 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



- Magnification:

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

- *param* = `GL_NEAREST`: Punktfiler

= `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 nächstes Texel

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

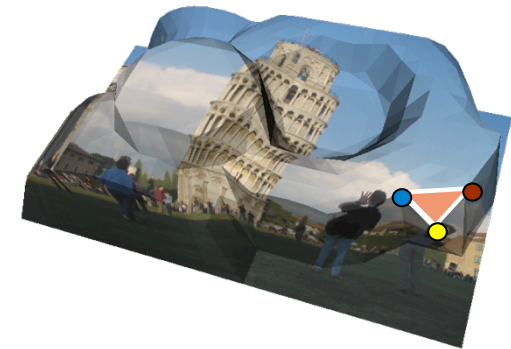
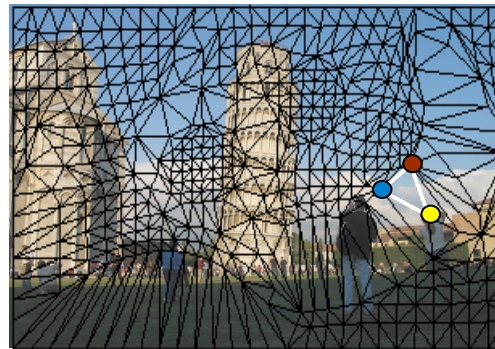
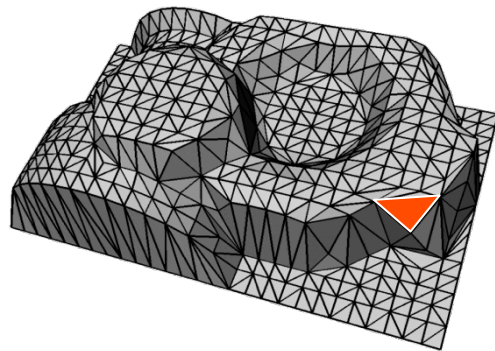
- Der `level` Parameter von `glTexImage2D` bestimmt, welcher Level der Mipmap gesetzt wird
- 0 ist die größte Map, jede weitere hat dann halbe Größe, bis hin zu 1x1
- Alle Größen müssen vorhanden sein
- Hilfsfunktion:

```
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 projizieren

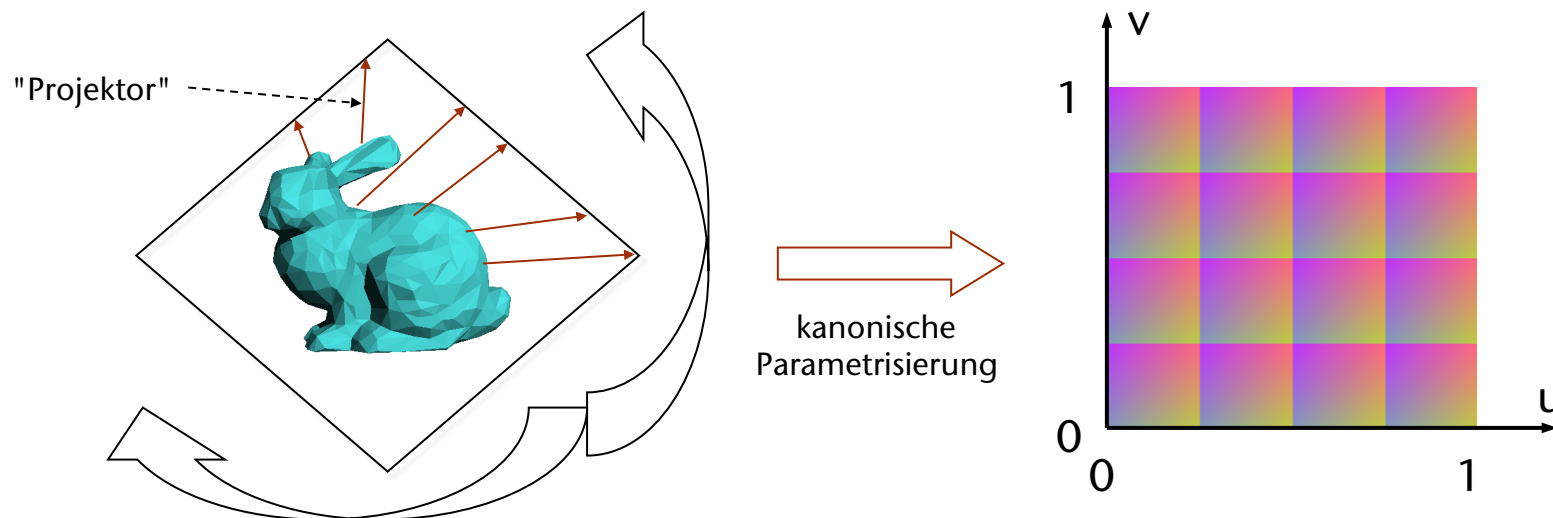


- Achtung: dies ist nicht notwendig eine "gute" Texturierung!

■ Idee: ein 2-stufiger Prozess

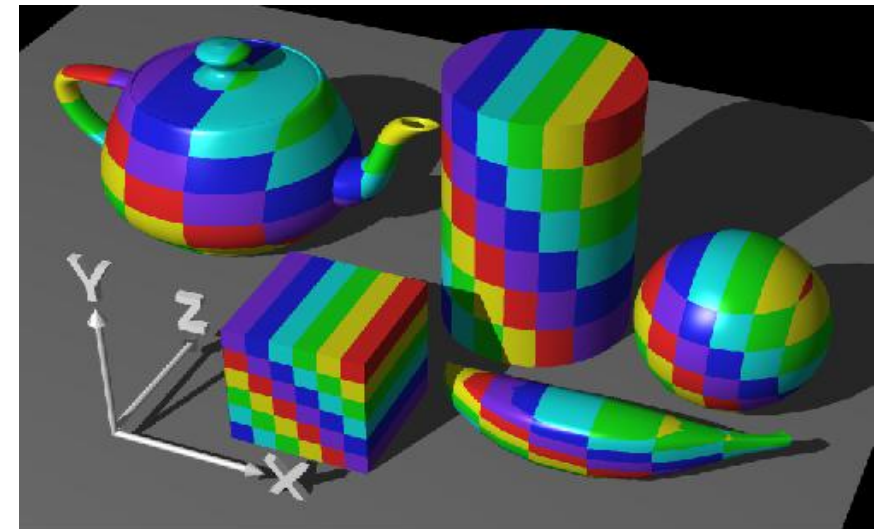
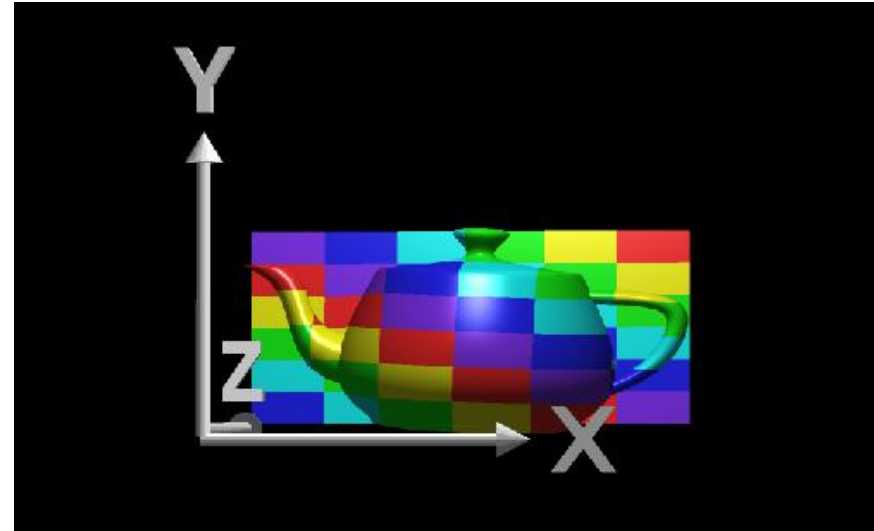
[Bier & Sloan, 1986]

- 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



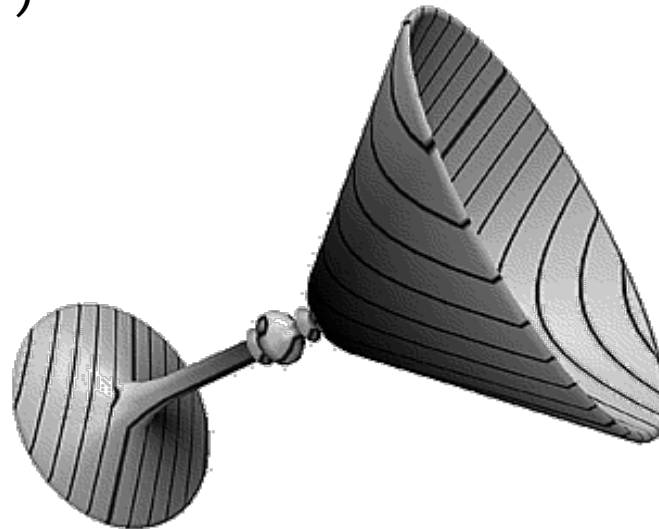
Einige Hüllkörper und deren Parametrisierung

- 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



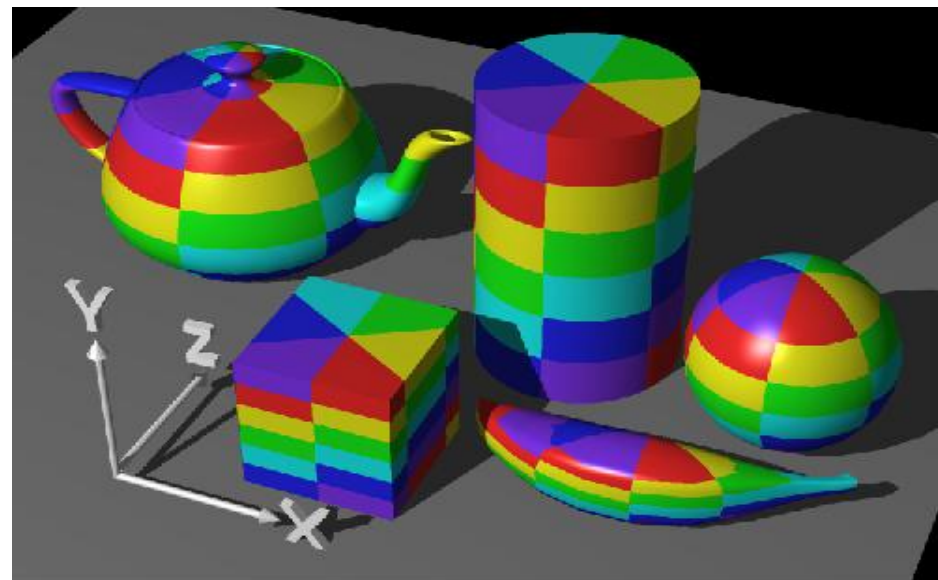
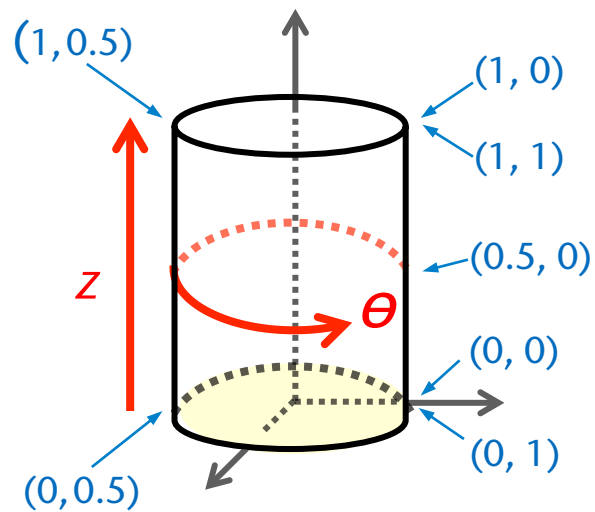
Beispiel

- Erzeuge Höhenlinien mittels dieser Technik:
 - Verwende 1D-Textur
 - $u := \text{dist}(P, E_1)$



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

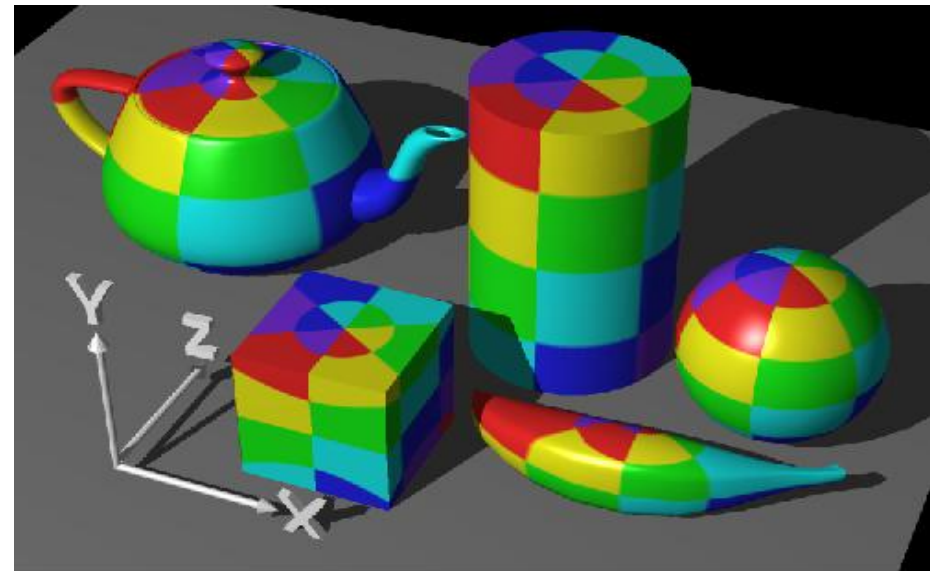
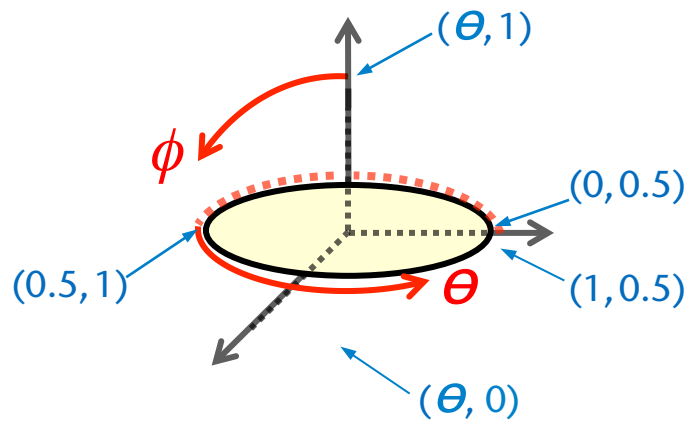
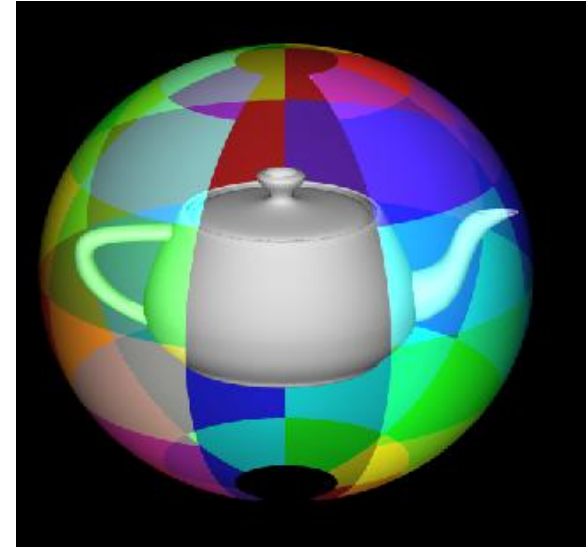
- Zylinder-Parametrisierung:
 - Konvertiere kartesische Koord. (x,y,z) in zylindrische Koord.
 $\rightarrow (r \sin \Theta, r \cos \Theta, z)$
 - $(u, v) = (\Theta/2\pi, z)$
- Beachte "Naht" bei $(\theta = 0 \ \& \ \theta = 2\pi)$



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

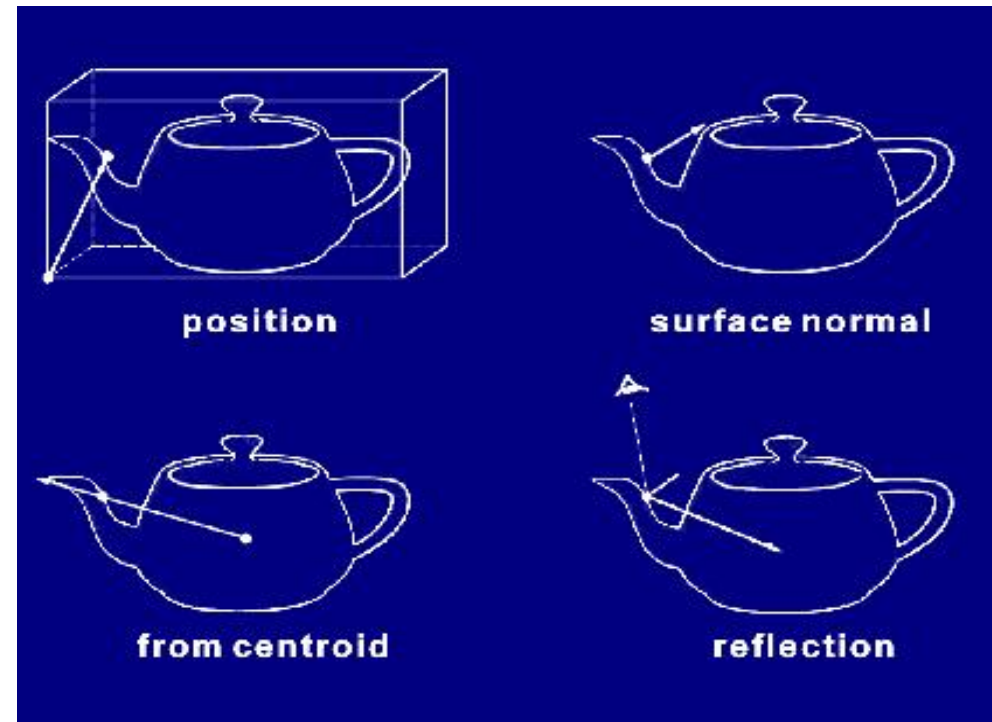


- Kugel-Parametrisierung:
 - Stelle Punkt in sphärischen Koord. dar
 $\rightarrow r \cdot (\sin \theta \sin \phi, \cos \theta \sin \phi, \cos \phi)$
 - $(u, v) = (\theta/2\pi, \phi/\pi + 1)$
- Beachte: Singularität bei Nord- und Südpol!

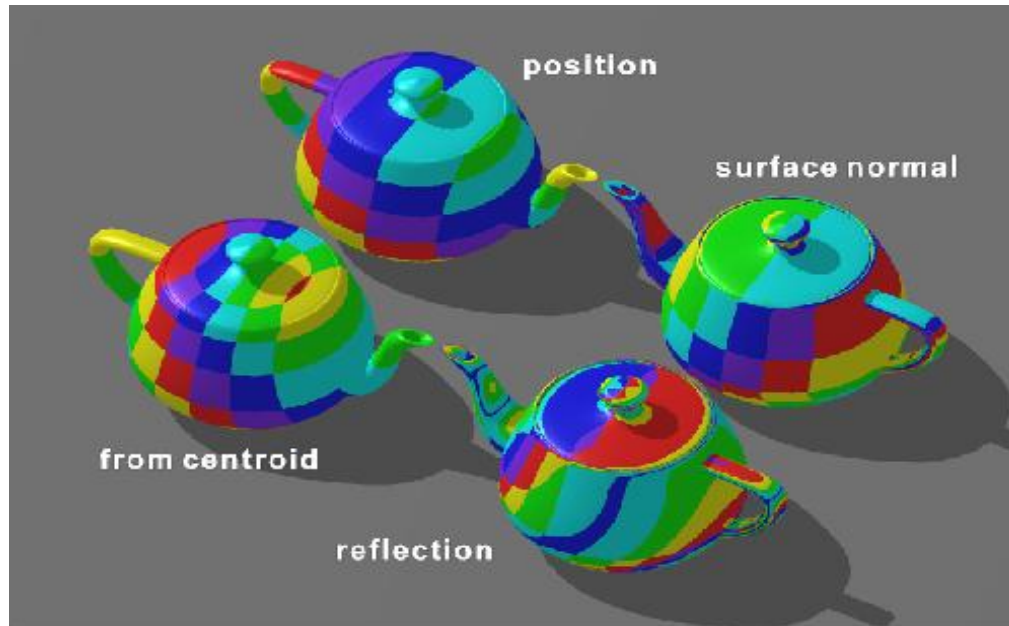


Was soll man projizieren?

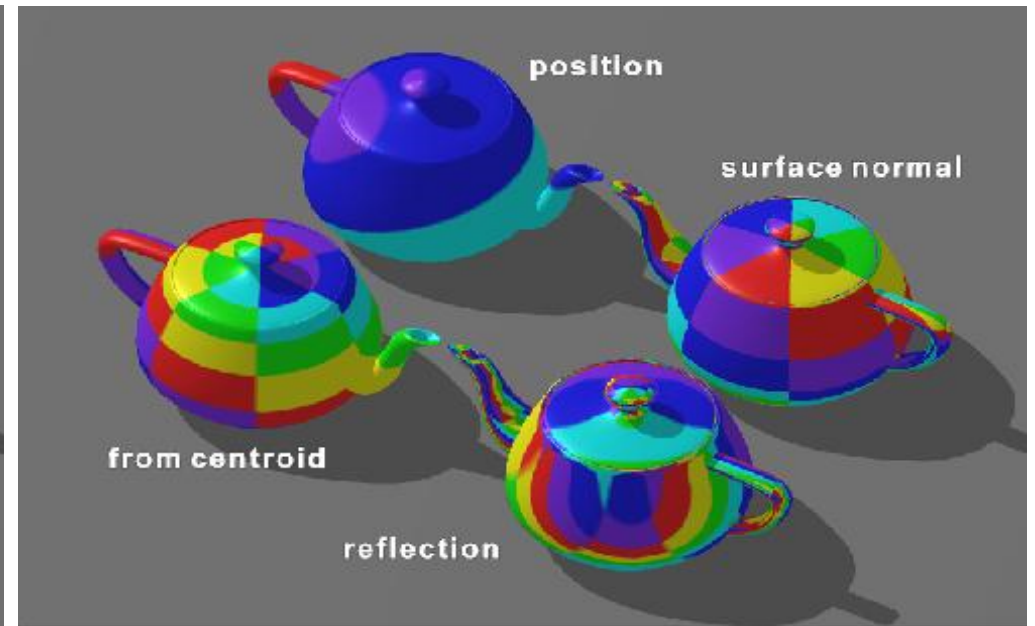
- Bisher: einfach die Koordinaten (x,y,z) des Vertex auf den (gedachten) Hüllkörper projiziert
- Verallgemeinerung: statt dessen kann man genauso gut (oder schlecht) andere Attribute des Vertex projizieren, z.B.
 - Normale
 - Vektor vom Zentrum des Objektes durch den Vertex
 - Reflektierter Viewing-Vektor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



■ 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`

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

