

Bremen



# Computer-Graphik I

## Shader-Programmierung



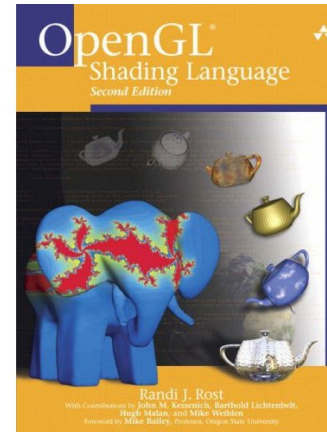
G. Zachmann

University of Bremen, Germany

[cgvr.informatik.uni-bremen.de](http://cgvr.informatik.uni-bremen.de)

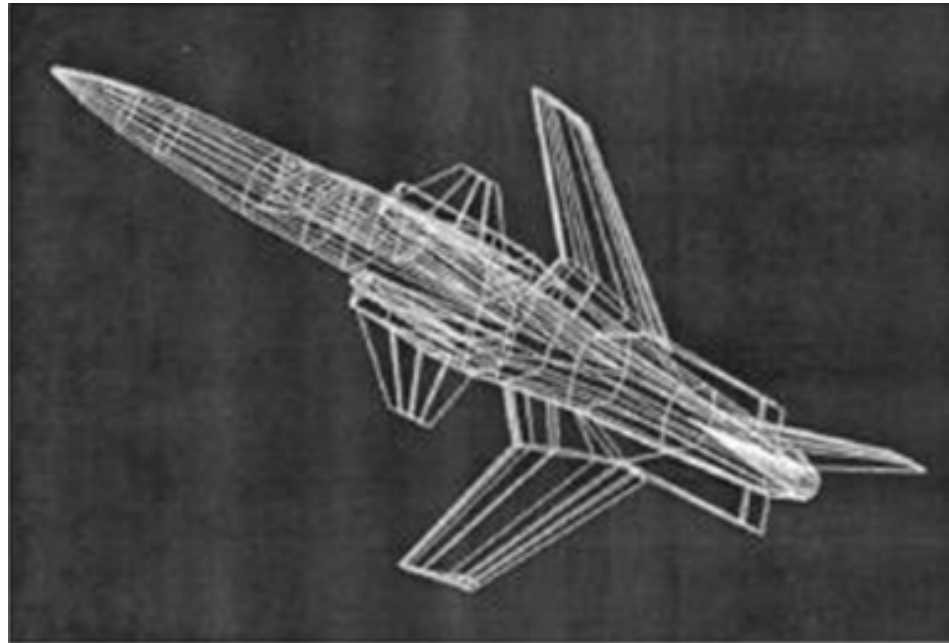


- Das "Orange Book":
  - Randi J. Rost, et al.:  
"OpenGL Shading Language",  
2nd edition, Addison Wesley.



- Auf der Homepage der Vorlesung:
  - Das Tutorial von Lighthouse3D
  - Mark Olano's "*Brief OpenGL Shading Tutorial*"
  - Der "GLSL Quick Reference Guide"
  - ...

- Erste Generation – Wireframe
  - Vertex-Oper.: Transformation, Clipping und Projektion
  - Rasterization: Color Interpolation (Punkte, Linien)
  - Fragment-Op.: Overwrite
  - Zeitraum: bis 1987



## ■ Zweite Generation – Shaded Solids

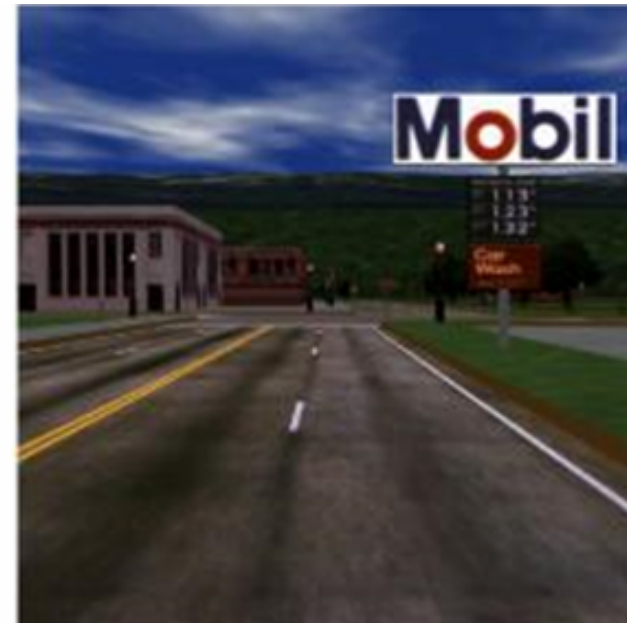
- Vertex-Oper.: Beleuchtungsrechnung & Gouraud-Shading
- Rasterization: Depth-Interpolation
- Fragment-Oper.: Depth-Buffer, Color Blending
- Zeitraum: 1987 - 1992



(Dogfight - SGI)

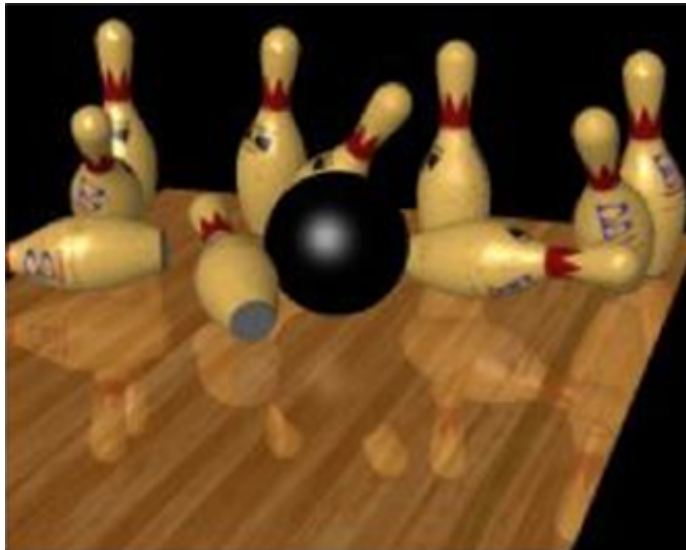
## ■ Dritte Generation – Texture Mapping

- Vertex-Oper.: Textur-Koordinaten-Transformation
- Rasterization: Textur-Koordinaten-Interpolation
- Fragment-Oper.: Textur-Auswertung, Antialiasing
- Zeitraum: 1992 - 2000



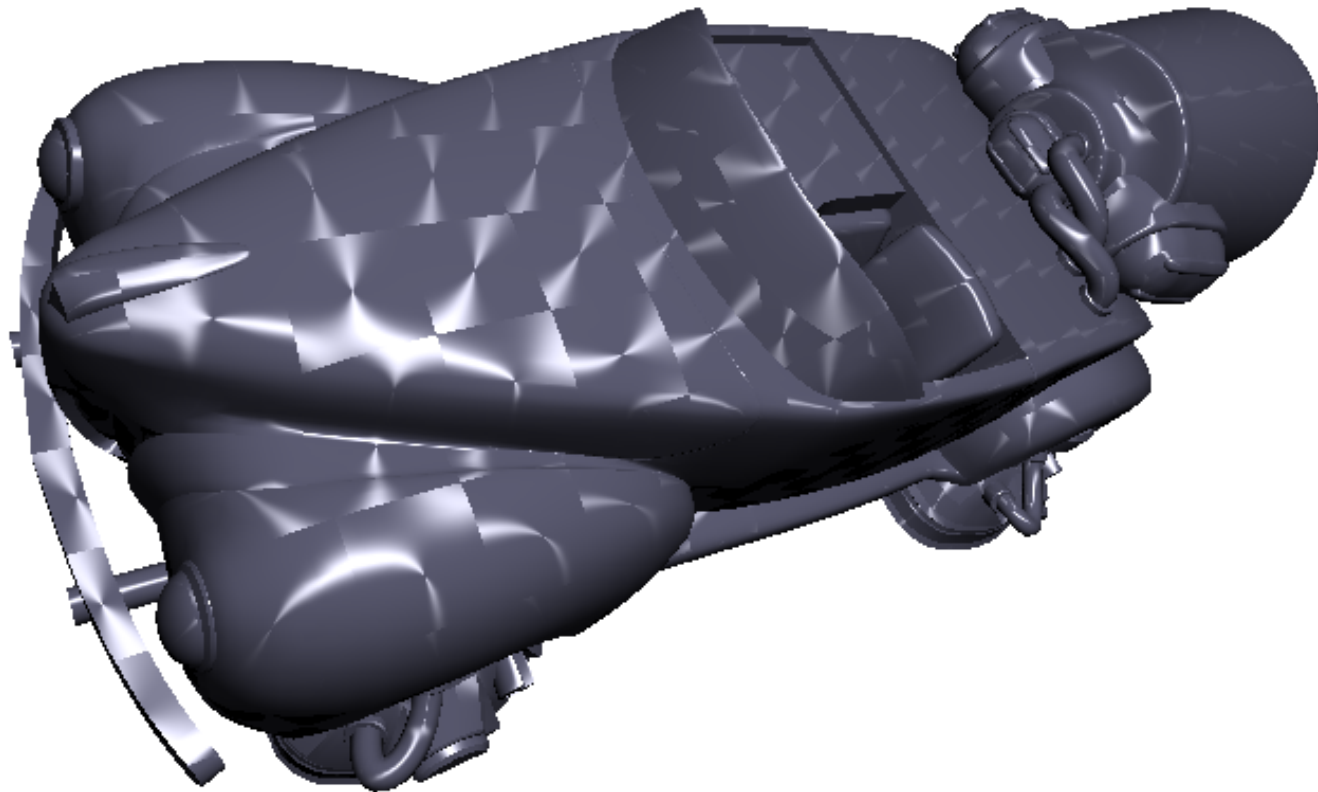
Performertown (SGI)

- Vierte Generation – Programmierbarkeit
  - Vertex-Oper.: eigenes Programm
  - Rasterization: Interpolation der (beliebigen) Ausgaben des Vertex-Programms
  - Fragment: eigenes Programm
  - Zeitraum: ab 2000

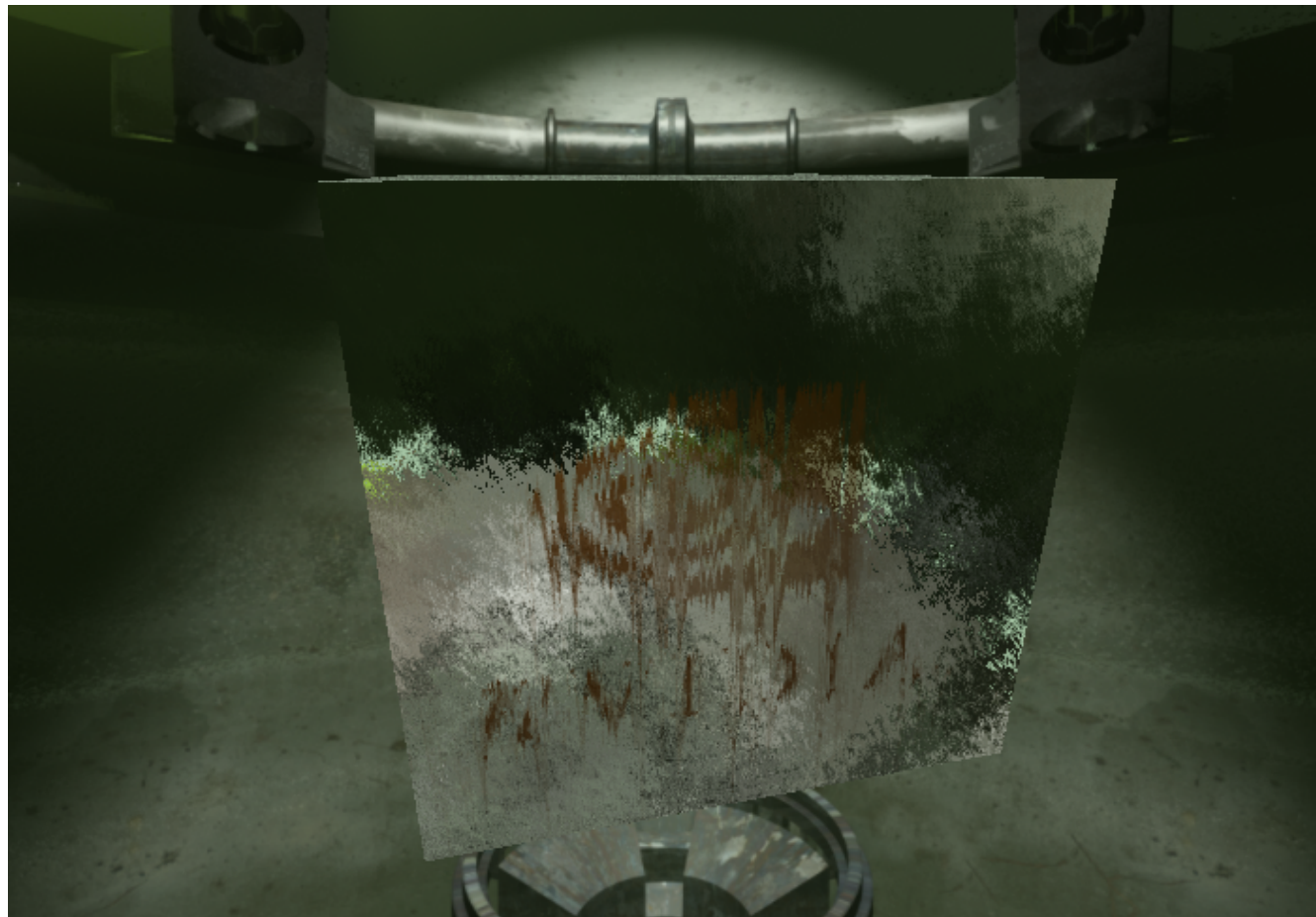


Final Fantasy

- Brushed Steel:
  - Prozedurale Textur
  - Anisotropes Lighting-Model

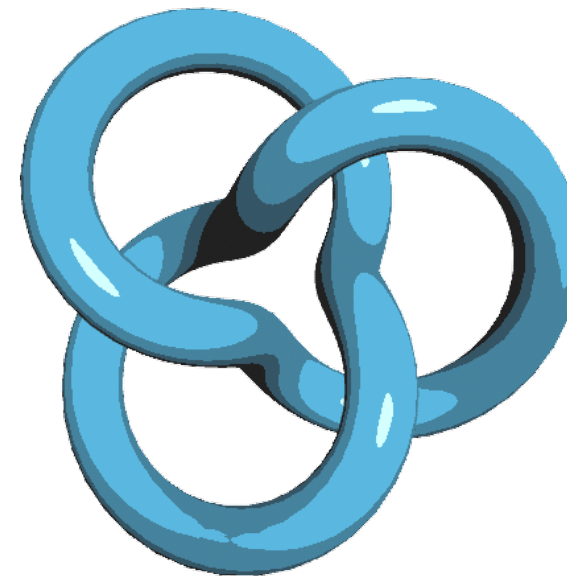
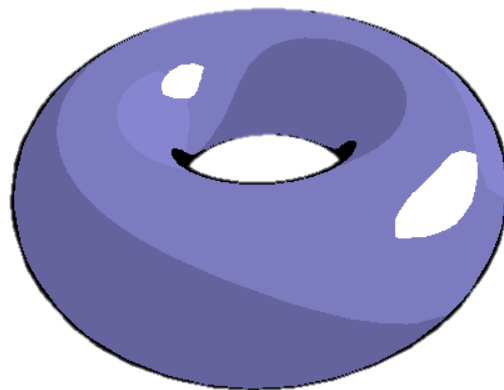


- Schmelzendes Eis:
  - Prozedurale, animierte Textur
  - Bump-mapped environment map



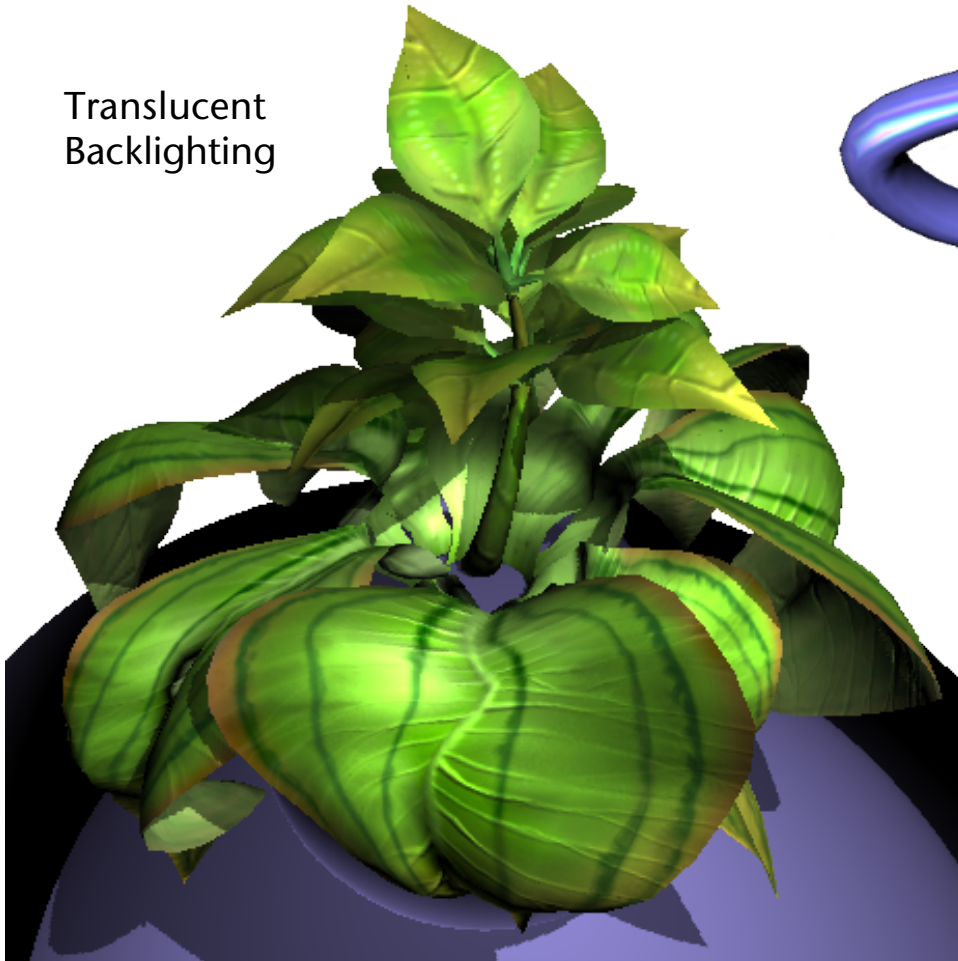


- Sog. „Toon Shading“
  - Ohne Texturen
  - Mit Anti-Aliasing
  - Gute Silhouetten ohne zu starke Verdunkelung



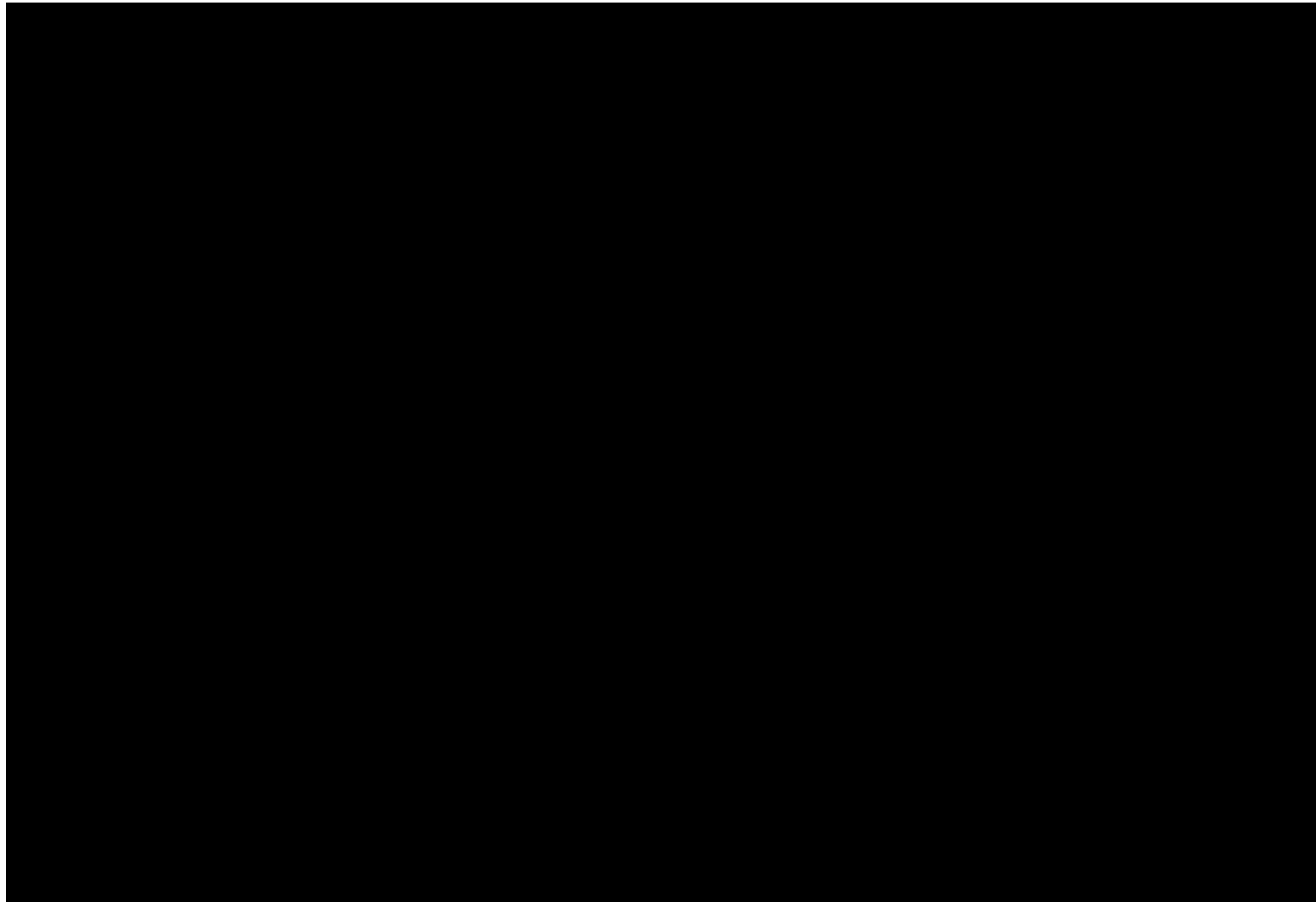
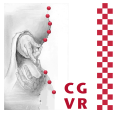
- Vegetation & *Thin Film*

Translucent  
Backlighting

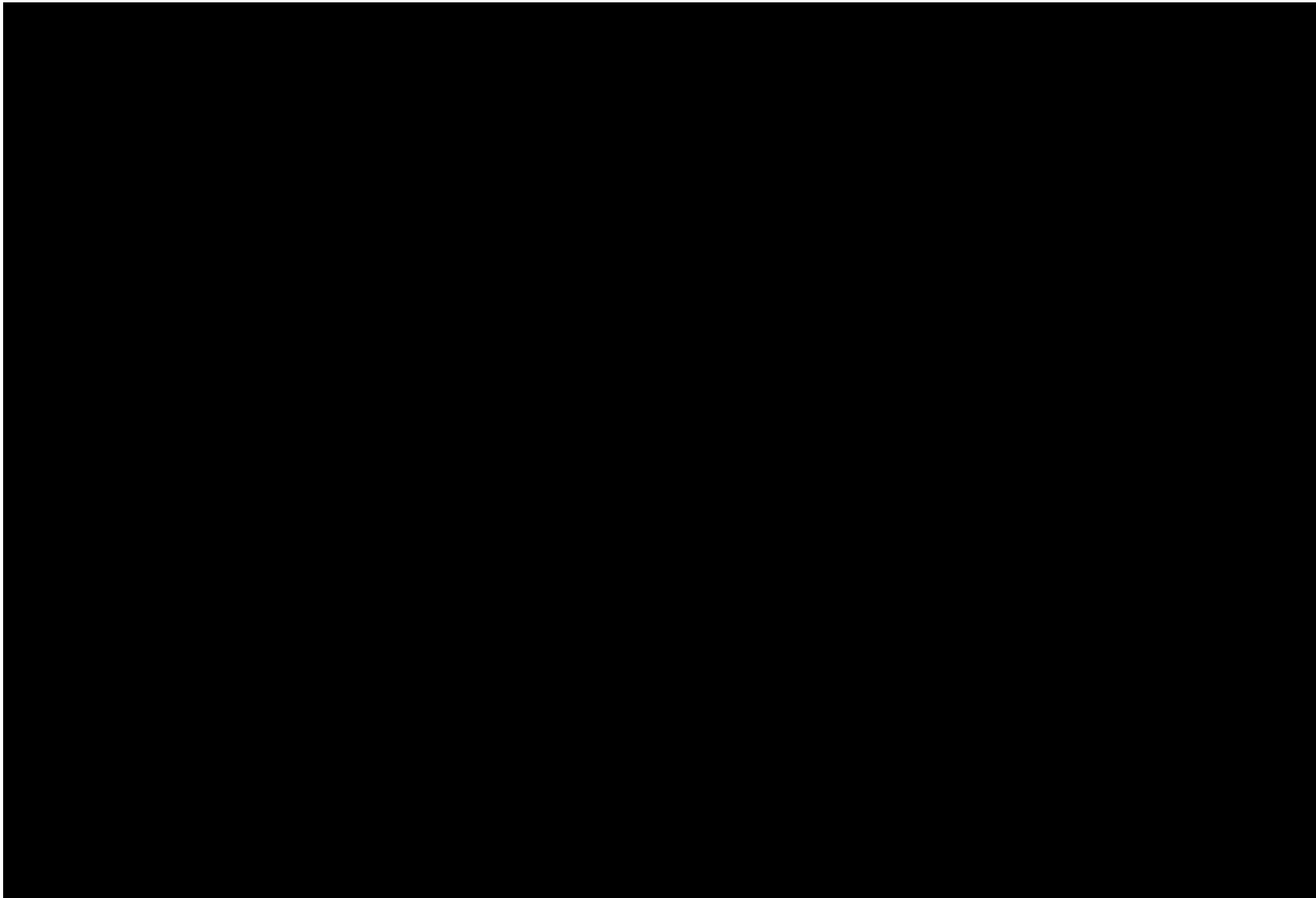


Beispiel von selbstgemachter  
Beleuchtungsrechnung; hier:  
Simulation von Schillern

# Animusic's Pipe Dream



<http://ati.amd.com/developer/demos.html>



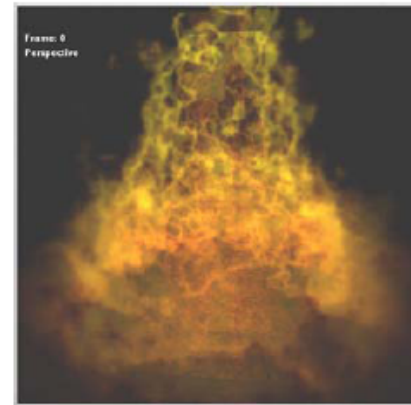
<http://ati.amd.com/developer/demos.html>



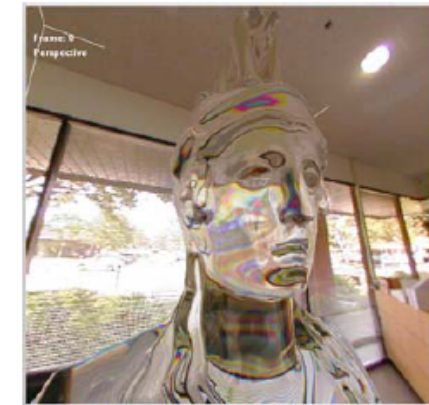
Subsurface Scattering



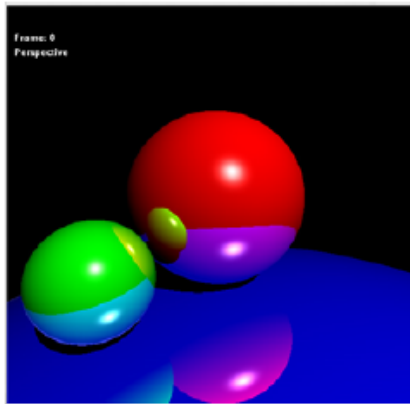
NPR Renders



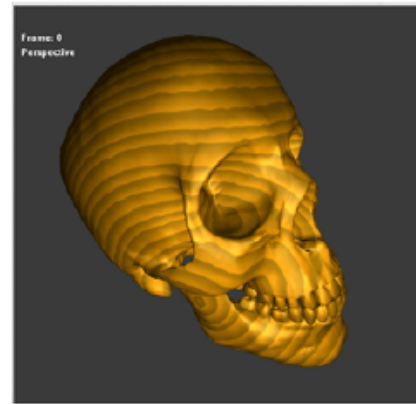
Fire Effects



Refraction



Ray Tracing



Solid Textures

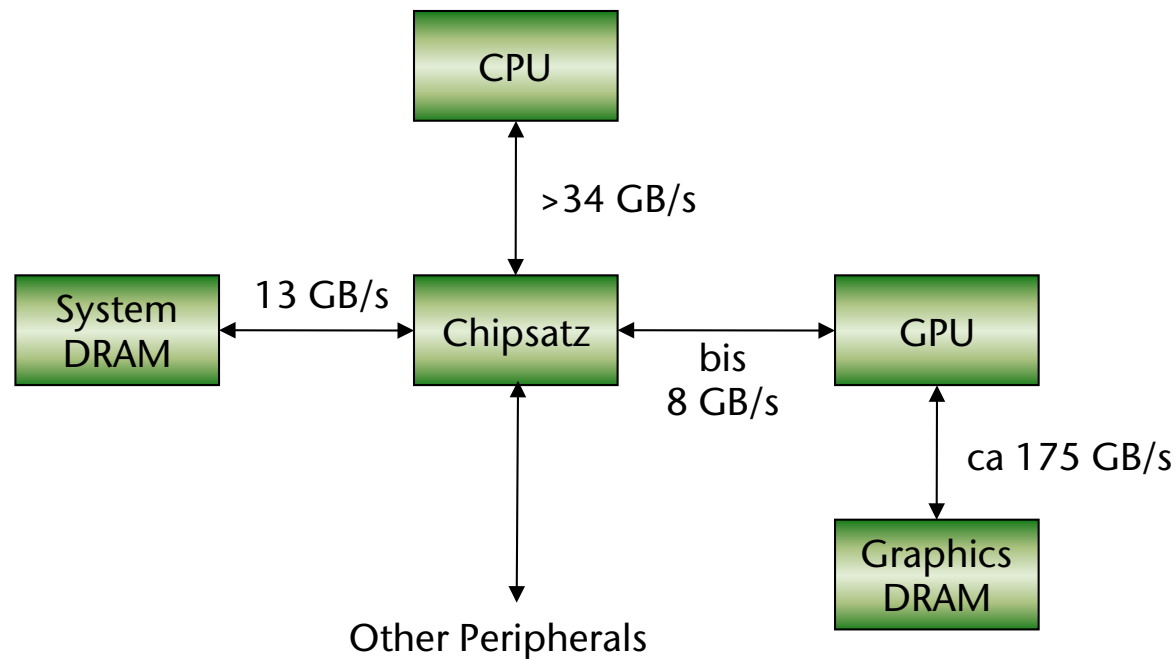


Ambient Occlusion



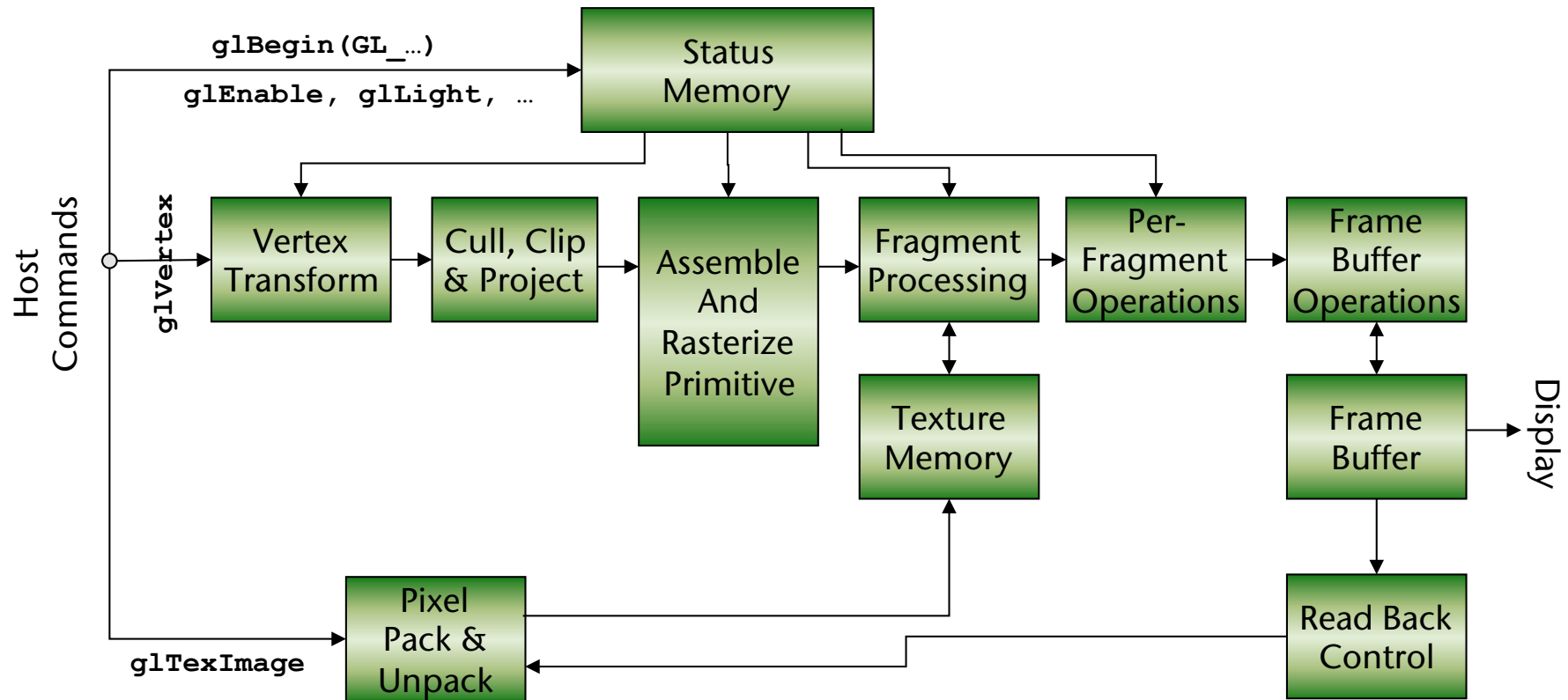
Cloth Simulation

- Dedicated bus zwischen “host” CPU und GPU (*graphics processing unit* = Graphikkarte) (PCIexpress)
- Separater Speicher für die GPU (framebuffer, textures, etc.)
- GPU hat DMA zum Hauptspeicher

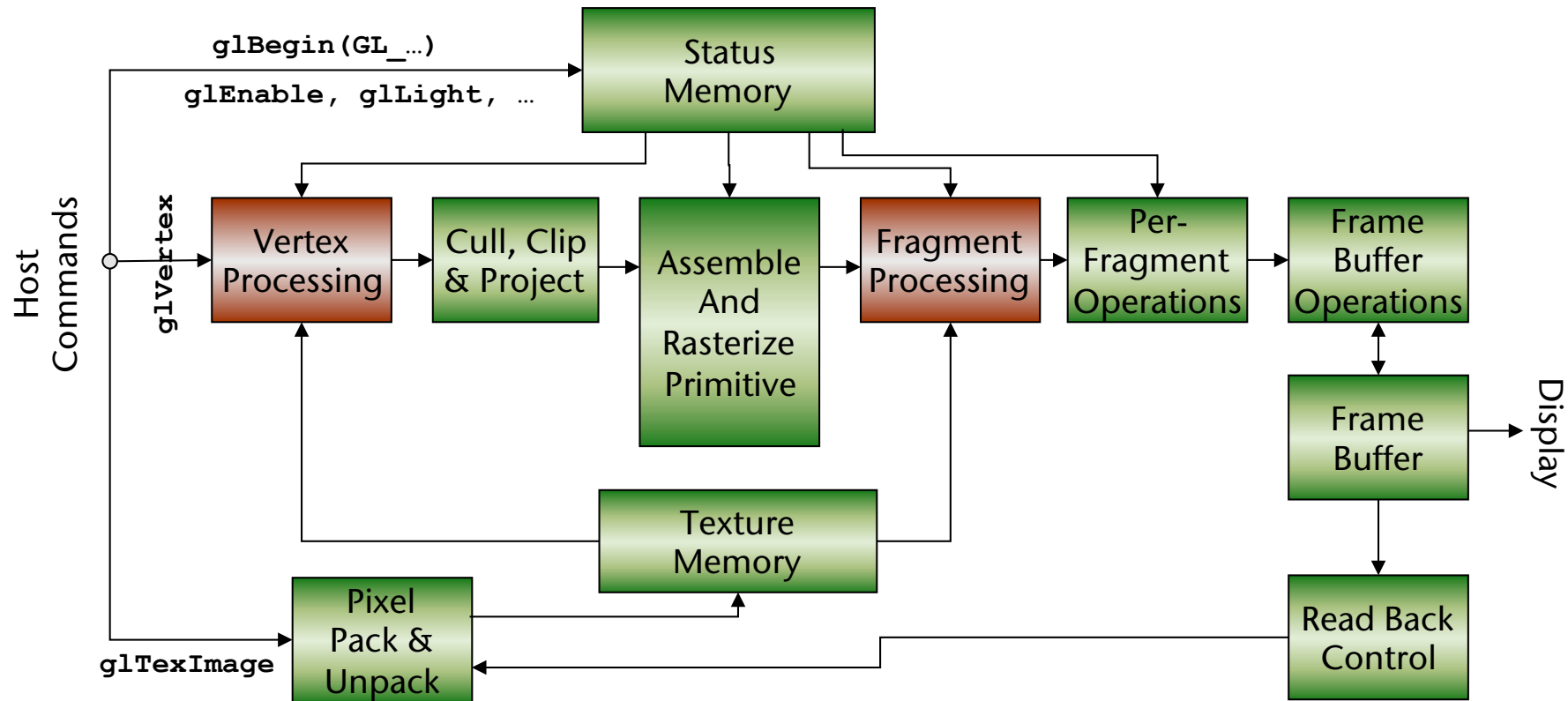


Stand 2010

- *Fixed-function graphics pipeline*
  - Sehr sorgfältig ausbalanciert
- Philosophie: Performance ist wichtiger als Flexibilität

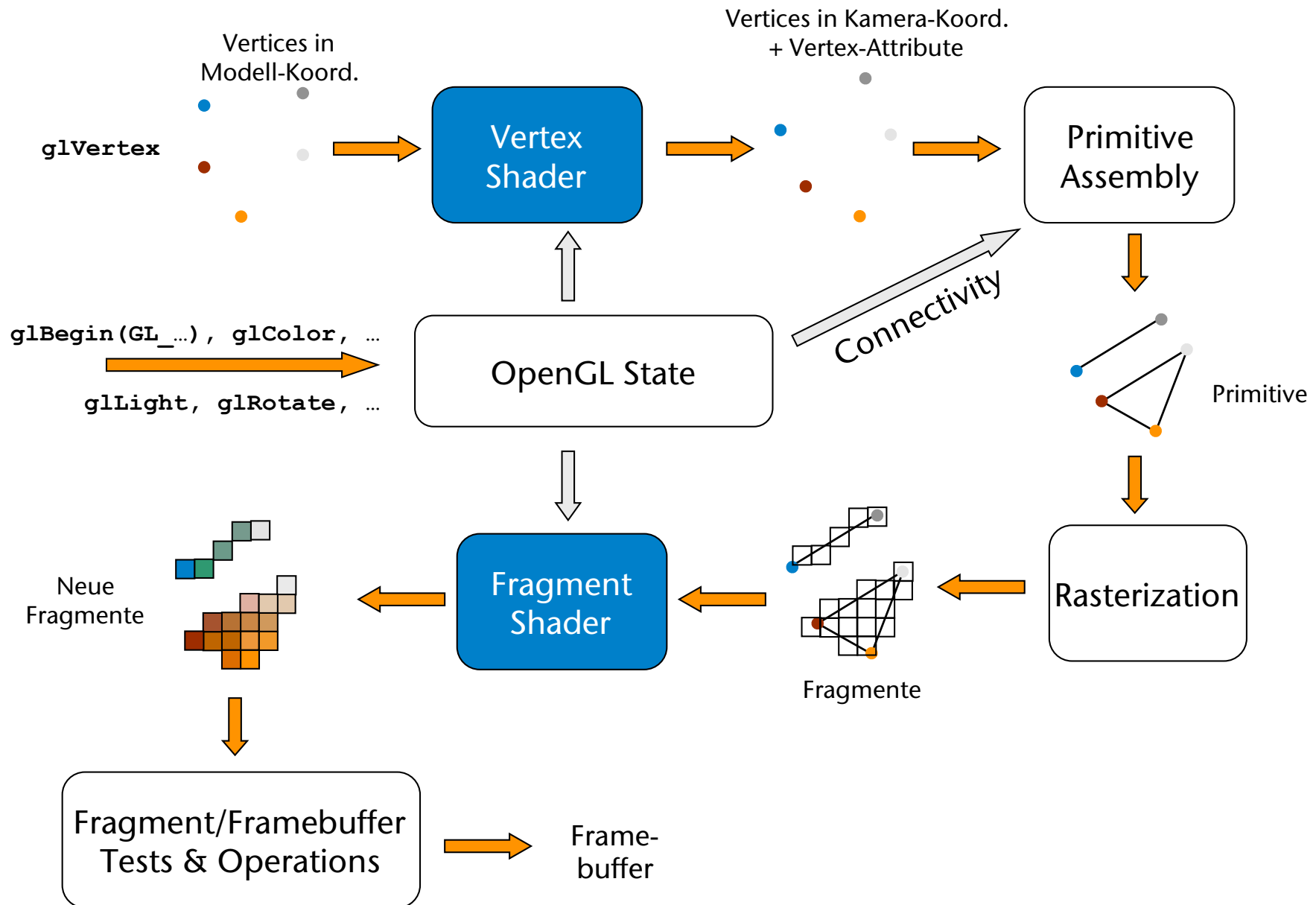


- Programmierbare *vertex und fragment processors*
  - Legen offen, was sowieso schon immer da war
- Texturspeicher = allgemeiner Speicher für beliebige Daten





# Abstraktere Übersicht der programmierbaren Pipeline



- Hilfsvorstellung:

```
...
foreach tri in triangles
{
    // run the vertex program on each vertex
    v1 = process_vertex( tri.vertex1 );
    v2 = process_vertex( tri.vertex2 );
    v3 = process_vertex( tri.vertex2 );

    // assemble the vertices into a triangle
    assembledtriangle = setup_tri(v1, v2, v3);

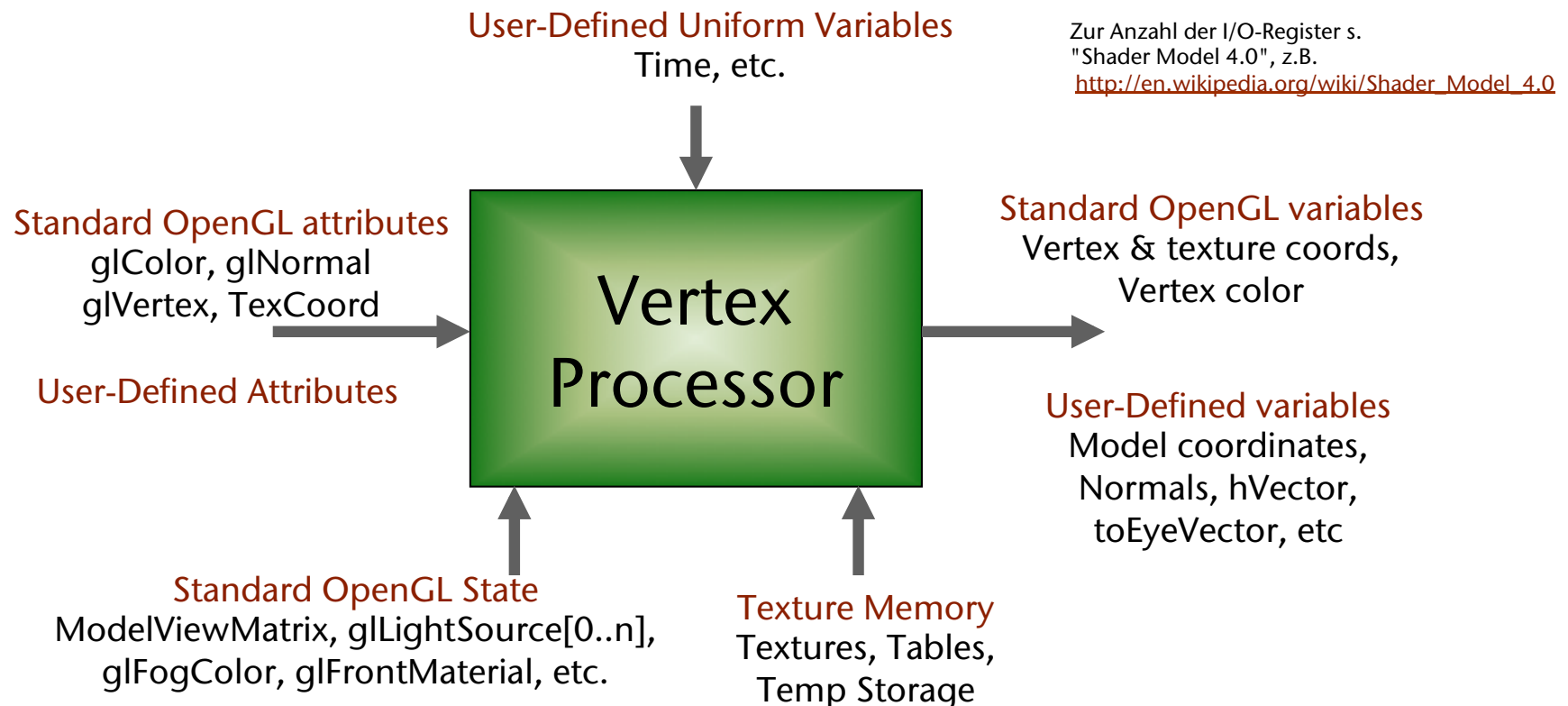
    // rasterize the assembled triangle into [0..many] fragments
    fragments = rasterize( assembledtriangle );

    // run the fragment program on each fragment
    foreach frag in fragments
    {
        framebuffer[frag.position] = process_fragment( frag );
    }
}
...
```

- Achtung: unterscheide zwischen Pixel und Fragment!
- **Pixel** :=  
eine Anzahl Bytes im Framebuffer  
bzw. ein Punkt auf dem Bildschirm
- **Fragment** :=  
eine Menge von Daten (Farbe, Koordinaten, Alpha, ...), die zum Einfärben eines Pixels benötigt werden
- M.a.W.:
  - Ein Pixel befindet sich am Ende der Pipeline
  - Ein Fragment ist ein "Struct", das durch die Pipeline "wandert" und am Ende in ein Pixel gespeichert wird

# Input & Output eines Vertex-Processors

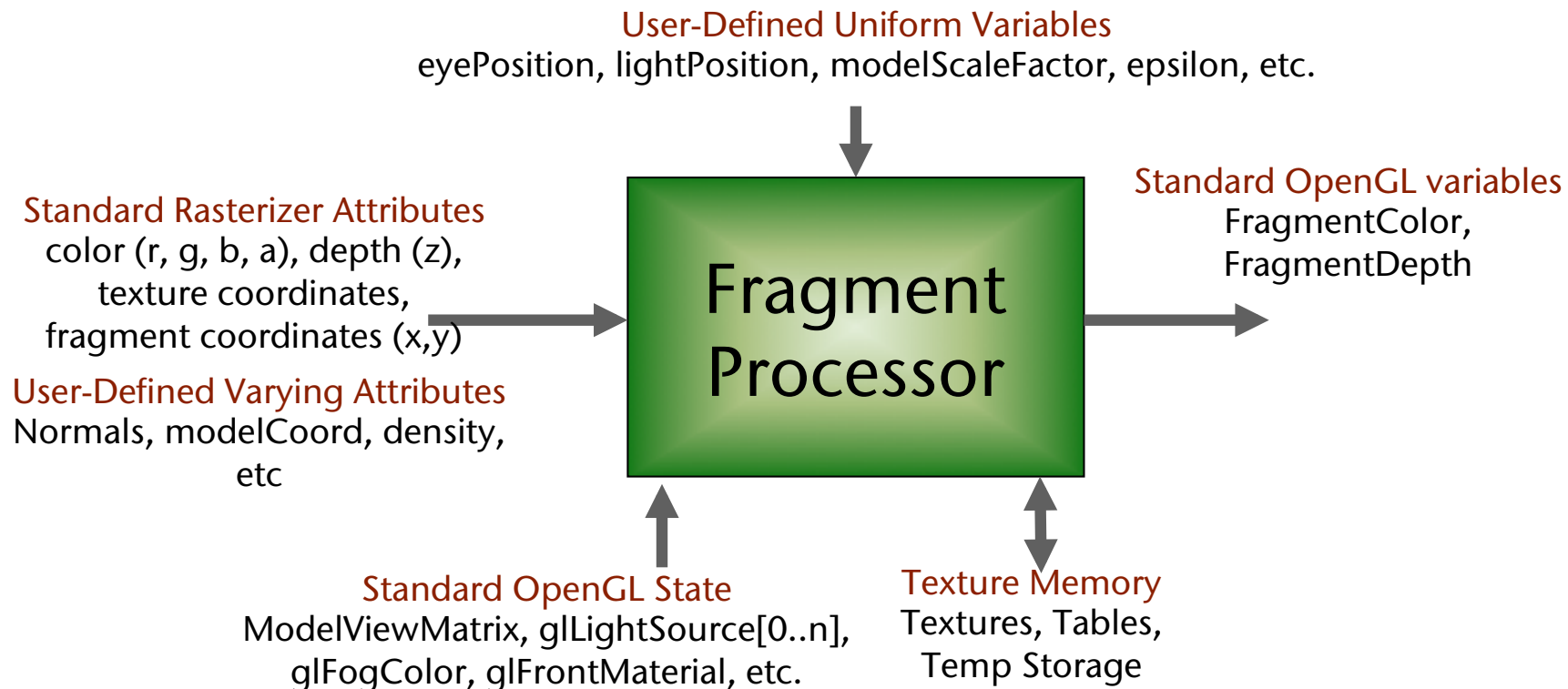
- *Vertex "Shader"* (= Programm) bekommt eine Reihe von Parametern:
  - Per-Vertex-Parameter, OpenGL-Zustand, selbst-definierte Attribute
- Resultat muß in vordefinierte Variablen (= Register) geschrieben werden, die der Rasterizer dann ausliest und interpoliert



- Beleuchtung und Vertex-Attribute pro Vertex berechnen
- Ein Vertex-Programm ersetzt folgende Funktionalität der fixed-function Pipeline:
  - Vertex- & Normalen-Transformation ins Kamera-Koord.-System
  - Transformation mit Projektionsmatrix (perspektivische Division durch  $z$ )
  - Normalisierung
  - Per-Vertex Beleuchtungsberechnungen
  - Generierung und/oder Transformation von Texturkoordinaten
- Ein Vertex-Programm ersetzt **NICHT**:
  - Projektion nach 2D und Viewport mapping
  - Clipping
  - Backface Culling
  - Primitive assembly (Triangle setup, edge equations, etc.)

# Input & Output eines Fragment-Prozessors

- *Fragment "shader"* bekommt eine Reihe von Parametern:
  - OpenGL-Zustand
  - Fragment-Parameter = alle Ausgaben des Vertex-Shaders, aber **interpoliert!**
- Resultat: neues Fragment (i.A. mit anderer Farbe als vorher)



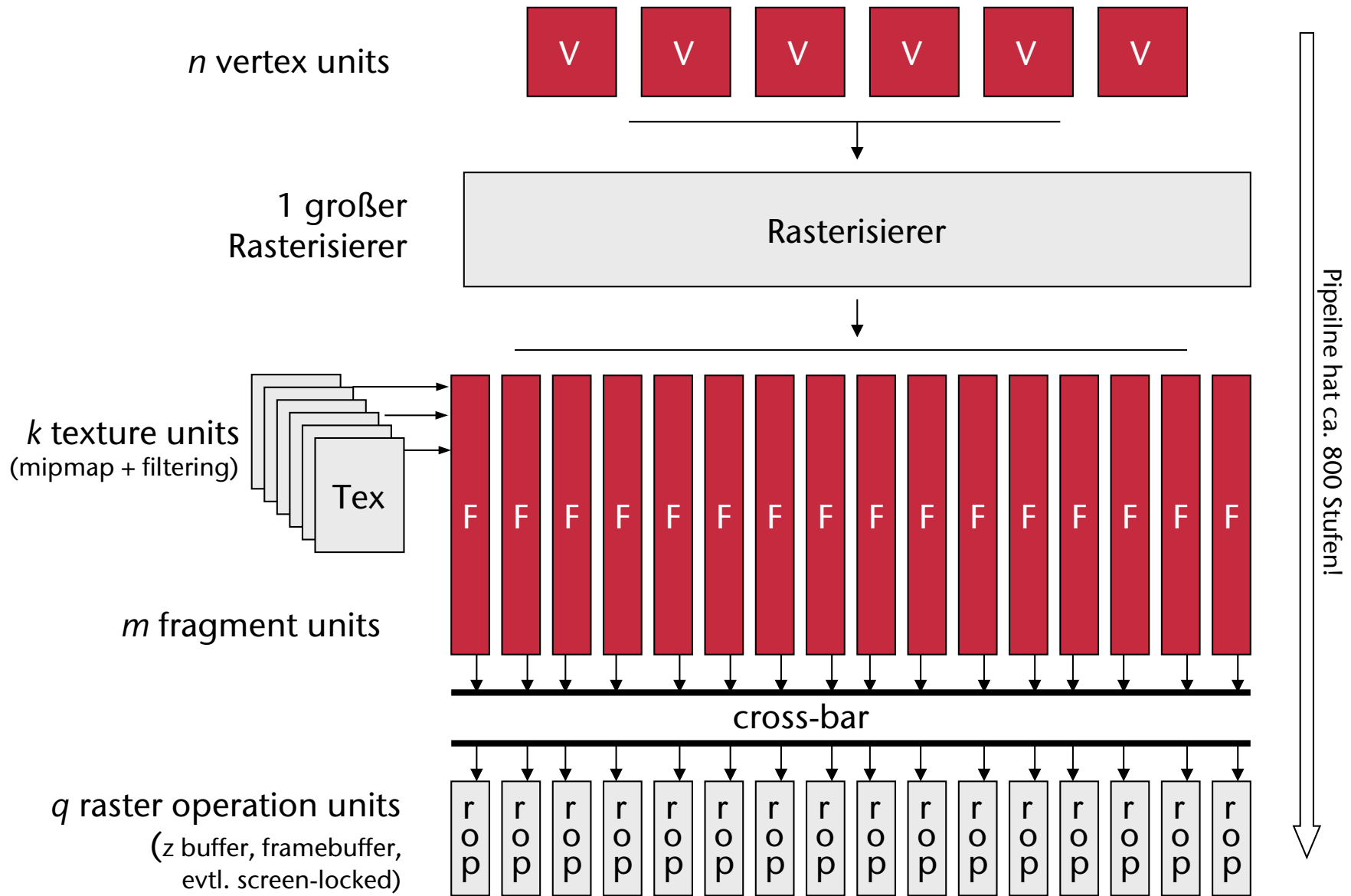
- Ein Fragment-Programm ersetzt folgende Funktionalität der *fixed-function Pipeline* :
  - Operationen auf interpolierten Werten
  - Textur-Zugriff und -Anwendung (z.B. modulate, decal)
  - Fog (color, depth)
  - u.v.m.
- Ein Fragment-Programm ersetzt NICHT :
  - Scan Conversion
  - Pixel packing und unpacking
  - Alle Tests, z.B. Z-Test, Alpha-Test, Stencil-Test, etc.
  - Schreiben in den Framebuffer inkl. Operationen zwischen Fragment und Framebuffer ( z.B. Alpha-Blending, logische Operationen, etc.)
  - Schreiben in den Z-Buffer
  - u.v.m.

# Was ein Shader **nicht** kann

- Ein Vertex-Shader hat *keinen* Zugriff auf Connectivity-Info und Framebuffer
- Ein Fragment-Shader
  - hat *keinen* Zugriff auf danebenliegende Fragmente
  - hat *keinen* Zugriff auf den Framebuffer
  - kann *nicht* die Pixel-Koordinaten wechseln (aber kann auf sie zugreifen)



# Etwas detailliertere (leicht veraltete) Architektur

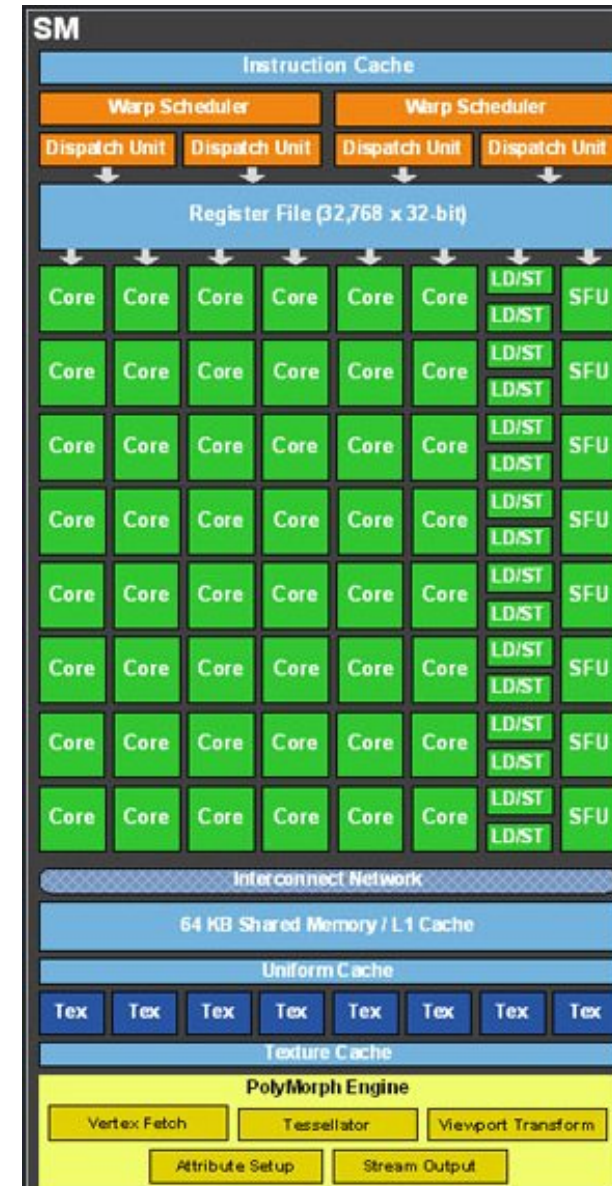




# Aktuelle Architektur (hier Fermi)



- Keine Unterscheidung mehr zwischen Vertex- und Fragment-Shader, sondern einheitliche programmierbare Shader, genannt *Cores*
- Jeder Core hat eine FP- und Int-Unit
  - Mehrere Cores teilen sich eine SFU = *special function unit* (trig. Fkt.en, log, etc.)
- Cores werden zu einem sogenannten *Streaming Multiprocessor (SM)* zusammengefasst
- Eine GPU hat mehrere SM's



## Assembly

```

RSQR R0.x, R0.x;
MULR R0.xyz, R0.xxxx, R4.xyzz;
MOVR R5.xyz, -R0.xyzz;
MOVR R3.xyz, -R3.xyzz;
DP3R R3.x, R0.xyzz, R3.xyzz;
SLTR R4.x, R3.x, {0.000000}.x;
ADDR R3.x, {1.000000}.x, -R4.x;
MULR R3.xyz, R3.xxxx, R5.xyzz;
MULR R0.xyz, R0.xyzz, R4.xxxx;
ADDR R0.xyz, R0.xyzz, R3.xyzz;
DP3R R1.x, R0.xyzz, R1.xyzz;
MAXR R1.x, {0.000000}.x, R1.x;
LG2R R1.x, R1.x;
MULR R1.x, {10.000000}.x, R1.x;
EX2R R1.x, R1.x;
MOVR R1.xyz, R1.xxxx;
MULR R1.xyz, {0.900000, 0.800000, 1.000000}.xyzz, R1.xyzz;
DP3R R0.x, R0.xyzz, R2.xyzz;
MAXR R0.x, {0.000000}.x, R0.x;
MOVR R0.xyz, R0.xxxx;
ADDR R0.xyz, {0.100000, 0.100000, 0.100000}.xyzz, R0.xyzz;
MULR R0.xyz, {1.000000, 0.800000, 0.800000}.xyzz, R0.xyzz;
ADDR R1.xyz, R0.xyzz, R1.xyzz;

```

## Hochsprache

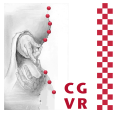
```

float spec = pow( max(0, dot(n,h)), phongExp);
color cResult = k_d * (cAmbi + cDiff) +
                k_s * spec * cSpec;

```

Einfacher Phong-Shader,  
ausgedrückt in  
Shader-Assembly und GLSL

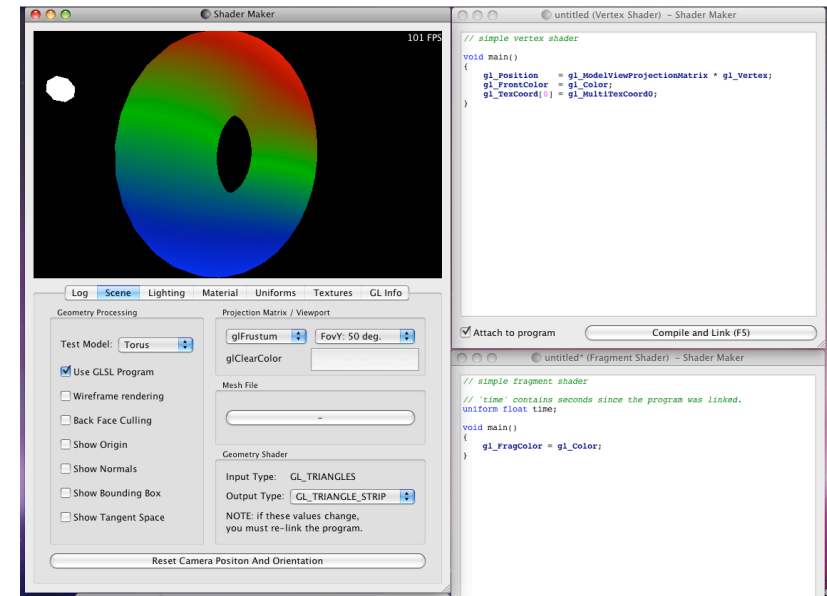
# Explosion von GPU-Hochsprachen



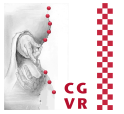
- Stanford Shading Language (Vorläufer von Cg)
  - C/Renderman-like
- Cg (Nvidia)
- **GLSL** ("*glslang*"; OpenGL Shading Language)
- HLSL (Microsoft)
- Alle sind relativ ähnlich zueinander
- Brook, Ashli, ...

# Shader-Editoren (Shader-IDE's)

- Nvidia: **FX Composer**
  - Kann kein GLSL (?)
- ATI: **RenderMonkey**
- Beide kostenlos, beide nur unter Windows, beide für unsere Zwecke eigtl. schon zu komplex
- Mac: OpenGL Shader Builder
  - Kostenlos unter <https://developer.apple.com/downloads/> → Graphics Tools
- Blender: eingebauter GLSL-Editor
- **Shader Maker** (Studienarbeit):
  - Cross-platform
  - [http://cgvr.cs.uni-bremen.de/teaching/shader\\_maker/index.shtml](http://cgvr.cs.uni-bremen.de/teaching/shader_maker/index.shtml)

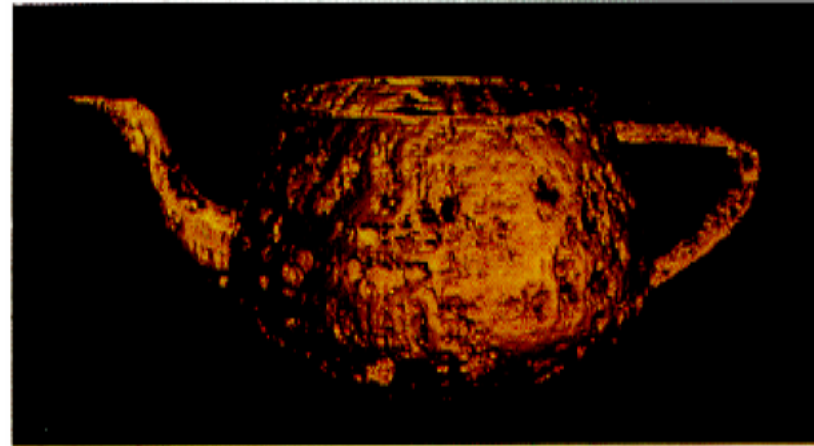


# Debugging ...



- Es gibt keinen Debugger!
- Es gibt noch nicht einmal "printf-Debugging"!!
- Meine Tips:
  - Von einem funktionierenden Shader ausgehen und diesen in winzigen Schritten (einzelne Zeilen) modifizieren
  - Bei Aufgaben, wo mehrere Durchläufe gemacht werden müssen: nach jedem Durchlauf Textur / Framebuffer anzeigen

- Geschaffen von Pixar in 1988
- Ist heute ein Industriestandard
- Eng an das Ray-Tracing-Paradigma angelehnt
- Mehrere Shader-Arten:
  - Lichtquelle, Oberfläche, Volumen, Displacement



```

surface
dent( float Ks=.4, Kd=.5, Ka=.1, roughness=.25, dent=.4 )
{
    float turbulence;
    point NF, V;
    float i, freq;

    /* Transform to solid texture coordinate system */
    V = transform("shader", P);

    /* Sum 6 "octaves" of noise to form turbulence */
    turbulence = 0; freq = 1.0;
    for( i=0; i<6; i+= 1 ) {
        turbulence += 1/freq * abs( 0.5 - noise( 4*freq*V ) );
        freq *= 2;
    }

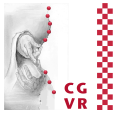
    /* Sharpen turbulence */
    turbulence *= turbulence * turbulence;
    turbulence *= dent;

    /* Displace surface and compute normal */
    P -= turbulence * normalize(N);
    NF = faceforward( normalize( calculateNormal(P) ), I );
    V = normalize(-I);

    /* Perform shading calculation */
    Oi = 1 - smoothstep( 0.03, 0.05, turbulence );
    Ci = Oi * Cs * (Ka*ambient() + Ks*specular(NF,V,roughness));
}

```

# Einführung in GLSL



- Fester Bestandteil in OpenGL 2.0 (Oktober 2004)
- Gleiche Syntax für Vertex-Program und Shader-Program
- Plattform-unabhängig
- Rein prozedural (nicht object-orientiert, nicht funktional, ...)
- Syntax basiert auf ANSI C, mit einigen wenigen C++-Features
- Einige kleine Unterschiede zu ANSI-C für saubereres Design



- `float, bool, int, vec{2,3,4}, bvec{2,3,4}, ivec{2,3,4}`
- Quadratische Matrizen `mat2, mat3, mat4`
- Arrays – wie in C, aber:
  - nur eindimensional
  - nur konstante Größen (d.h., nur z.B. `float a[4];`)
- Structs (wie in C)
- Datentypen zum Zugriff auf Texturen (später)
- Variablen-Deklarationen wie in C
- Es gibt keine Pointer!

## Qualifier (Variablen-Arten)

- **const**
- **uniform :**
  - globale Variable, im Vertex- und Fragment-Shader, gleicher Wert in beiden Shadern, konstant während eines gesamten Primitives
- **attribute :**
  - globale Variable, nur im Vertex-Shader, kann sich pro Vertex ändern, kann vom Anwendungsprogrammierer per `glVertexAttrib ()` gesetzt werden
- **varying :**
  - wird vom Vertex-Shader gesetzt (pro Vertex) als Ausgabe,
  - wird vom Rasterizer interpoliert,
  - und vom Fragment-Shader gelesen (pro Fragment)

# Operatoren

- grouping: `()`
- array subscript: `[]`
- function call and constructor: `()`
- field selector and swizzle: `.`
- postfix: `++` `--`
- prefix: `++` `--` `+` `-` `!`
- binary: `*` `/` `+` `-`
- relational: `<` `<=` `>` `>=`
- equality: `==` `!=`
- logical: `&&` `^^` [sic] `||`
- selection: `?:`
- assignment: `=` `*=` `/=` `+=` `--`

# Skalar/Vektor Constructors

- Es gibt kein Casting: verwende statt dessen Konstruktor-Schreibweise
- Achtung: es gibt keine automatische Konvertierung!
- Es gibt Initialisierung

```
vec2 v2 = vec2(1.0, 2.0);
vec3 v3 = vec3(0.0, 0.0, 1.0);
vec4 v4 = vec4(1.0, 0.5, 0.0, 1.0);
v4 = vec4(1.0); // all 1.0
v4 = vec4(v2, v2); // # components must match
v4 = vec4(v3, 1.0); // dito
v2 = v4; // keep only first components

float f = 1; // error
float f = 1.0; // that's better
int i = int(f); // "cast"
f = float(i);
```

```

vec4 v4;
mat4 m4;

m4 = mat4( 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0,
           9.0, 10., 11., 12., 13., 14., 15., 16.); // COLUMN MAJOR order!

mat4( v4, v4, v4, v4 ) // v4 wird spaltenweise eingetragen
mat4( 1.0 ) // = identity matrix
mat3( m4 ) // upper 3x3
vec4( m4 ) // 1st column
float( m4 ) // upper left

```

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 5 & 9 & 13 \\ 2 & 6 & 10 & 14 \\ 3 & 7 & 11 & 15 \\ 4 & 8 & 12 & 16 \end{pmatrix}$$

# Zugriff auf Komponenten von Vektoren und Matrizen

- Zugriffsoperatoren auf Komponenten von Vektoren:

`.xyzw .rgba .stpq [i]`

- Zugriffsoperatoren für Matrizen:

`[i] [i][j]`

- Achtung: `[i]` liefert die **i-te Spalte!**

- Vector components:

```
vec2 v2;
vec4 v4;

v2.x // is a float
v2.x == v2.r == v2.s == v2[0] // comp accessors do the same
v2.z // wrong: undefined for type
v4.rgba // is a vec4
v4.stp // is a vec3
v4.b // is a float
v4.xy // is a vec2
v4.xgp // wrong: mismatched component sets
```

- R-values:

```

vec2 v2;
vec4 v4;

v4.wzyx      // swizzles, is a vec4
v4.bgra      // swizzles, is a vec4
v4.xxxx      // smears x, is a vec4
v4.xxx       // smears x, is a vec3
v4.yyxx      // duplicates x and y, is a vec4
v2.yyyy      // wrong: too many components for type
    
```

- L-values:

```

vec4 v4 = vec4( 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 );

v4.wx = vec2( 7.0, 8.0 );      // = (8.0, 2.0, 3.0, 7.0)
v4.xx = vec2( 9.0, 3.0 );      // wrong: x used twice
v4.yz = 11.0;                  // wrong: type mismatch
v4.yz = vec2( 5.0 );           // = (8.0, 5.0, 5.0, 7.0)
    
```

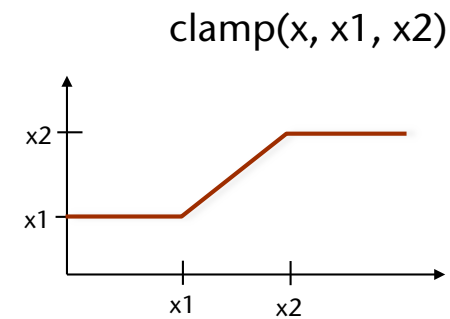
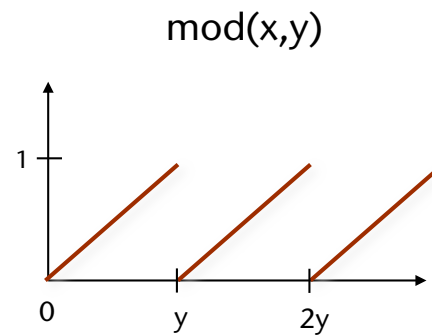
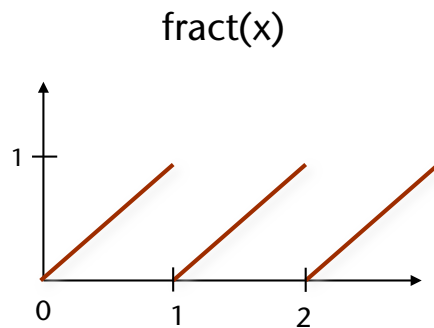
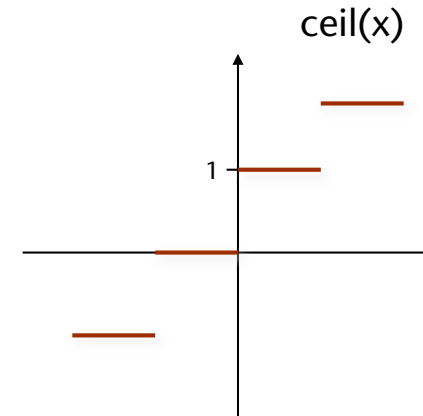
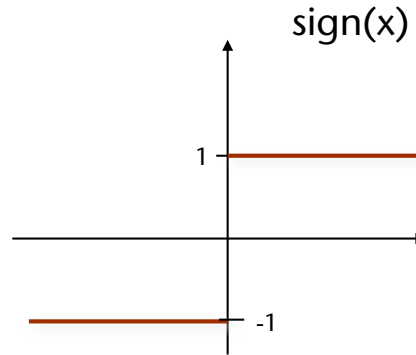
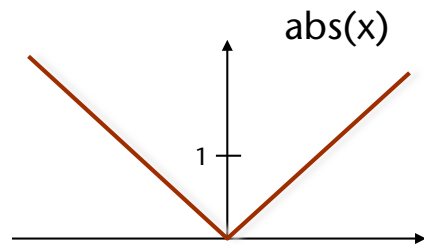
# Statements und Funktionen

- Flow Control wie in C:
  - `if ( bool expression ) { ... } else { ... }`
  - `for ( initialization; bool expression; loop expr ) { ... }`
  - `while ( bool expression ) { ... }`
  - `do { ... } while ( bool expression )`
  - `continue`, `break`
  - `discard`: nur im Fragment-Shader, wie `exit()` in C, Pixel wird **nicht** gesetzt
- Funktionen:
  - `void main()`: muß 1x im Vertex- und 1x im Fragment-Shader vorkommen
  - `in` = input parameter, `out` = output parameter, `inout` = beides
  - ```
vec4 func( in float intensity ) {  
    vec4 color;  
    if ( intensity > 0.5 ) color = vec4(1,1,1,1);  
    else                    color = vec4(0,0,0,0);  
    return( color ); }
```

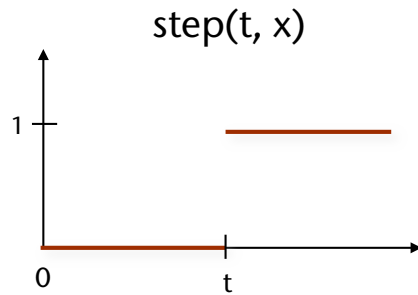


## Eingebaute Funktionen

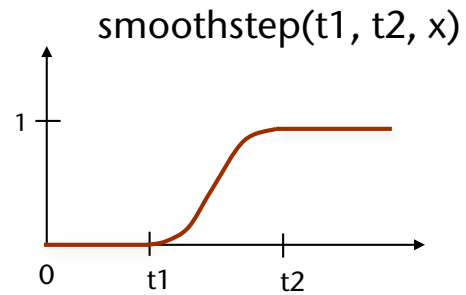
- Trigonometrie: `sin`, `asin`, `radians`, ...
- Exponentialfunktionen: `pow`, `exp`, `log`, `sqrt`, ...
- Sonstige: `abs`, `clamp`, `max`, `sign`, ...
- Alle o.g. Funktionen nehmen und liefern `float`, `vec2`, `vec3`, oder `vec4`, und arbeiten komponentenweise!
- Geometrische Funktionen: `cross(vec3,vec3)`, `mat*vec`, `mat*mat`, `distance()`, `dot()`, `normalize()`, `reflect()`, `refract()`, ...
  - Diese Funktionen nehmen, wenn nichts anderes steht, `float` ... `vec4`
- Vektor-Vergleiche:
  - Komponentenweise: `vec = lessThan(vec, vec)`, `equal()`, ...
  - "Quersumme": `bool = any( vec )`, `all()`



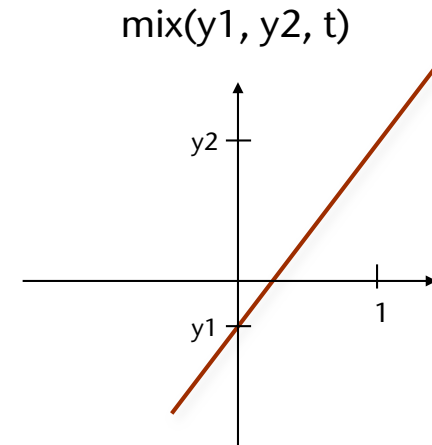
Zur Erinnerung: alle Funktionen arbeiten (komponentenweise) auf **float** ... **vec4** !



```
step(t, x) :=
x <= t ? 0.0 : 1.0
```



```
smoothstep(t1, t2, x) :=
t = (x-t1)/(t2-t1);
t = clamp( t, 0.0, 1.0);
return t*t*(3.0-2.0*t);
```



```
mix(y1, y2, t) :=
y1*(1.0-t) + y2*t
```

# Kommunikation mit OpenGL bzw. der Applikation

- Wie kann man Daten/Parameter an einen Shader übergeben?  
Wie kann der Vertex-Shader Daten an den Fragment-Shader übergeben?
- Geht, aber immer nur in eine Richtung: App. → OpenGL → Vertex-Shader → Fragment-Shader → Framebuffer
- Beide Shader haben Zugriff auf den Zustand von OpenGL, z.B. Parameter der Lichtquellen
- Man kann Variablen deklarieren, die von außen (= OpenGL-Programm) gesetzt werden können:
  - Sog. "**uniform**"-Variablen: können sowohl von Vertex- als auch Fragment-Shader gelesen werden
  - Sog. "**attribute**"-Variablen: kann nur der Vertex-Shader lesen
- Mittels Texturen können Daten an Shader übergeben werden
  - Interpretation bleibt Shader überlassen

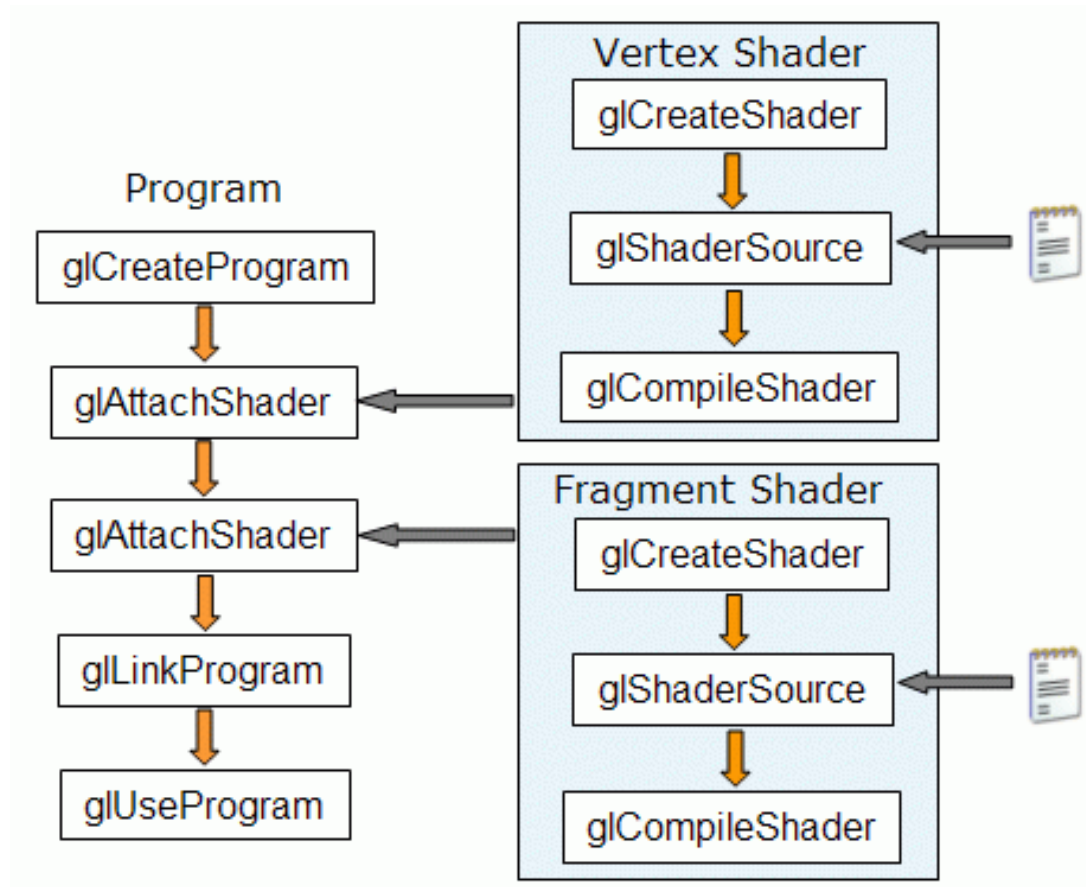
## Spezielle vordefinierte Variablen im Vertex-Shader

- Output: `gl_Position = vec4 ...`
  - Diese Variable **muss** vom Shader geschrieben werden!
- Input (*attributes*): `gl_Vertex`, `gl_Normal`, `gl_Color`, `gl_MultiTexCoord0`, ...
  - Alle sind `vec4`
  - Werden gesetzt durch den entsprechenden `gl`-Befehl (`glNormal`, `glColor`, `glTexCoord`; vor `glVertex()`!)
  - Sind read-only
- Weitere Output-Variablen:
  - deren Werte werden dann vom Rasterizer interpoliert (über ein Primitiv)
  - `vec4 gl_FrontColor;`  
`vec4 gl_TexCoord[]; ...`

## Spezielle vordefinierte Variablen im Fragment-Shader

- Input: `gl_Color` (vec4), `gl_TexCoord[]`
  - Diese werden vom Rasterizer gesetzt (durch Interpolation)
  - Read-only
- Spezieller Input: `gl_FragCoord` (vec4)
  - enthält die Pixel-Koordinaten (x,y,z)
- Output: `gl_FragColor` (vec4), `gl_FragDepth` (float)
  - `gl_FragColor` **muss** vom Shader geschrieben werden!
- Eingebaute Konstanten (für beide Shader):
  - `gl_MaxLights`, ...

- Shader-Programme werden – wie in C – separat kompiliert und dann zu einem Programm zusammengelinkt



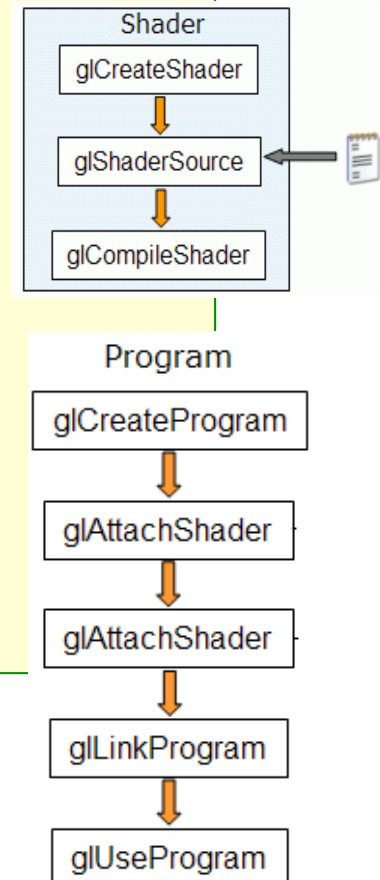
```

uint vert_sh_handle = glCreateShader( GL_VERTEX_SHADER );
const char * vert_sh_src = textFileRead("toon.vert");
glShaderSource( vert_sh_handle, 1, vert_sh_src, NULL );
free( vert_sh_src );
glCompileShader( vert_sh_handle );

// analog für das Fragment_Shader_Programm
...

uint progr_handle = glCreateProgram();
glAttachShader( progr_handle, vert_sh_handle );
glAttachShader( progr_handle, frag_sh_handle );

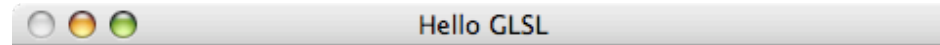
glLinkProgram( progr_handle );
glUseProgram( progr_handle );
    
```





- Beliebige Anzahl von Shadern und Programmen kann erzeugt werden
- Man kann innerhalb eines Frames zwischen *fixed functionality* und eigenem Programm umschalten (aber natürlich nicht innerhalb eines Primitives, also nicht zwischen **glBegin/glEnd**)
  - Mit **glUseProgram(0)** schaltet man auf *fixed functionality*
- Man kann einen Shader zu mehreren verschiedenen Programmen attachen

# Beispiel: Hello\_GLSL



`lighthouse_tutorial/hello_gsl*`

## Die spezielle Funktion **ftransform**

- Tut genau das, was die fixed-function Pipeline in der Vertex-Transformations-Stufe tut: einen Vertex von Model-Koordinaten in View-Koordinaten transformieren
- Idiom:

```
gl_Position = ftransform();
```

- Identisch dazu ist:

```
gl_Position = gl_ModelViewProjectionMatrix * gl_Vertex;
```

- Über das Programm:
  - `glGetProgramiv()` : liefert verschiedene Infos über das aktuell aktive Shader-Programm, z.B. eine Liste aktiver "attribute"- oder "uniform"-Variablen
- Attribut-Variablen:
  - `glGetActiveAttrib()` : liefert Info über ein bestimmtes Attribut
  - `glGetAttribLocation()` : liefert einen Handle ein Attribut
- Uniform-Variablen:
  - `glGetActiveUniform()` : liefert Info zu einem Parameter
- Benötigt man vor allem zur Implementierung von sog. Shader-Editoren

- Erst `glUseProgram()`
- Dann Handle auf Variable besorgen:

```
uint var_handle = glGetUniformLocation( progr_handle,  
                                       "uniform_name" )
```

- Setzen einer uniform-Variable:
  - Für Float:

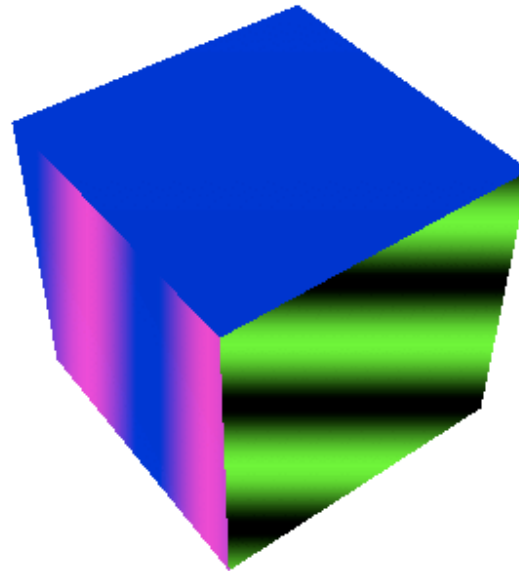
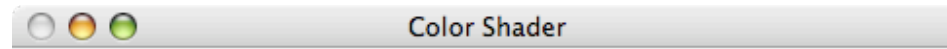
```
glUniform1f( var_handle, f )
```

- Für Matrizen

```
glUniform4fv( var_handle, count, transpose, float * v)
```

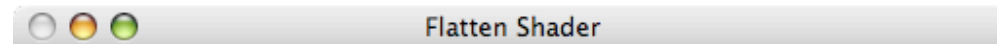
analog gibt es `glUniform{2,3}fv`

# Beispiel für *uniform*-Variable



## Beispiel für die Modifikation der Geometrie

- Wie man mit den Koordinaten (und sonstigen Attributen) eines Vertex im Vertex-Shader verfährt, ist völlig frei – Beispiel:



`lighthouse_tutorial/flatten.*`

- Zeigen den aktuellen Zustand von OpenGL an
- Sind als "uniform"-Variablen implementiert
- Die am häufigsten benötigten Zustandsvariablen: die aktuellen Matrizen

```
uniform mat4 gl_ModelViewMatrix;  
uniform mat4 gl_ProjectionMatrix;  
uniform mat4 gl_ModelViewProjectionMatrix;  
uniform mat3 gl_NormalMatrix;  
uniform mat4 gl_TextureMatrix[n];  
uniform mat4 gl_*MatrixInverse;
```



- Das aktuelle Material:

```
struct gl_MaterialParameters
{
    vec4 emission;
    vec4 ambient;
    vec4 diffuse;
    vec4 specular;
    float shininess;
};
uniform gl_MaterialParameters gl_FrontMaterial;
```

- Aktuelle Lichtquellen(-parameter):

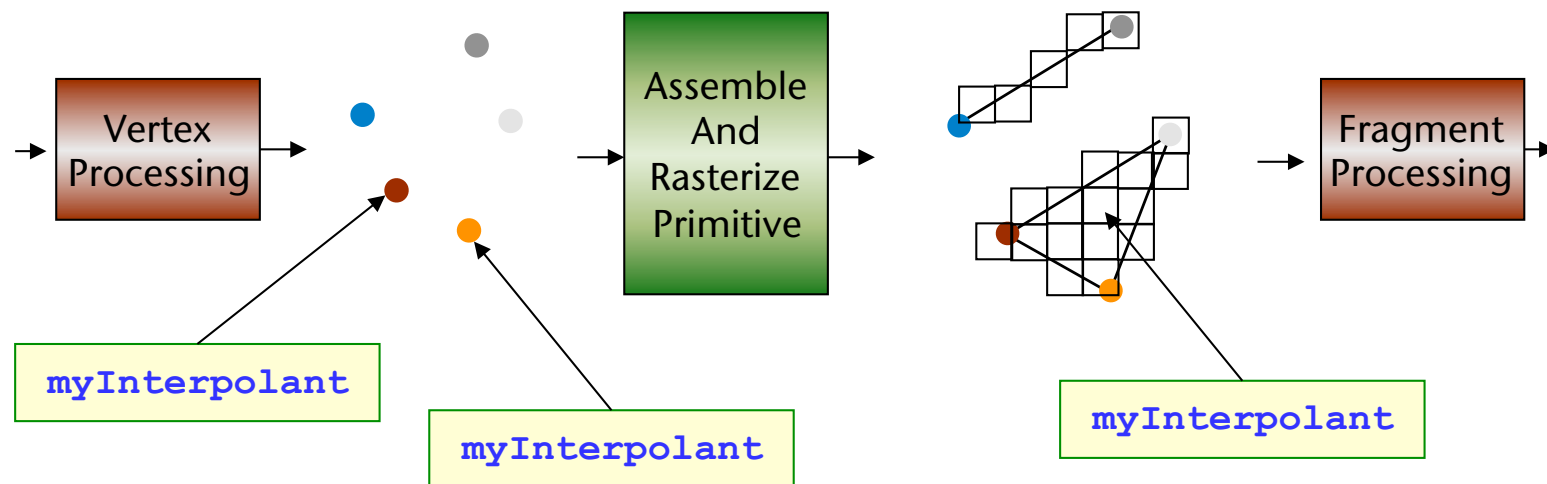
```
struct gl_LightSourceParameters
{
    vec4 ambient;
    vec4 diffuse;
    vec4 specular;
    vec4 position;
    vec4 halfVector;
    vec3 spotDirection;
    float spotExponent;
    float spotCutoff;
    float spotCosCutoff;
    float constantAttenuation;
    float linearAttenuation;
    float quadraticAttenuation;
};
uniform gl_LightSourceParameters gl_LightSource[gl_MaxLights];
```

- Und viele weitere (z.B. zu Texturen, Clipping Planes,...)

- Mittels sog. "**varying**"-Variablen:

```
varying vec3 myInterpolant;
```

- Achtung: dazwischen sitzt der Rasterizer und interpoliert!
  - Der Rasterizer interpoliert auch die "**varying**"-Variablen!  
(zusätzlich zu Position, Farbe, etc.; hence the name)



# Beispiel für Verwendung von varying- und Zustands-Variablen

- Der "Toon-Shader"
  - Berechnet einen stark diskretisierten diffusen Farbanteil (typ. 3 Stufen)

Toon Shading

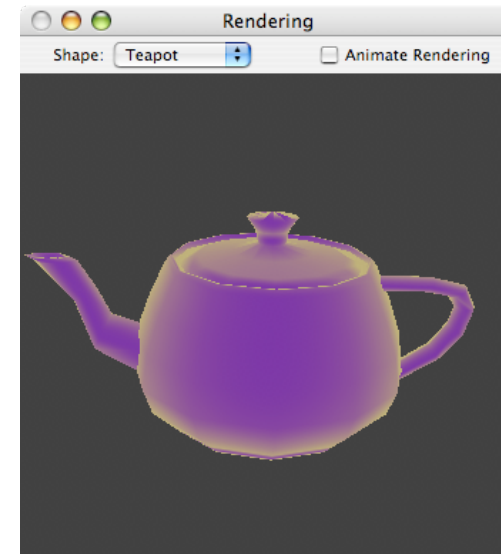


- Der "Gooch-Shader"
  - Interpoliert zwischen 2 Farben, abhängig vom Winkel zwischen Normale und Lichtvektor:

$$t = \max(0, \mathbf{n} \cdot \mathbf{l})$$

$$C = tC_{\text{warm}} + (1 - t)C_{\text{cool}}$$

$$t_{\text{alt}} = \frac{1 + \mathbf{n} \cdot \mathbf{l}}{2}$$



- Sind schon einfache Beispiele für "*non-photorealistic rendering*" (NPR)

- Vordefiniert:

```
attribute vec4  gl_Vertex;  
attribute vec3  gl_Normal;  
attribute vec4  gl_Color;  
attribute vec4  gl_MultiTexCoord[n];  
attribute vec4  gl_SecondaryColor;  
attribute float gl_FogCoord;
```

- Man kann selbst eigene Attribute definieren:

- Im Vertex-Shader:

```
attribute vec3 myAttrib;
```

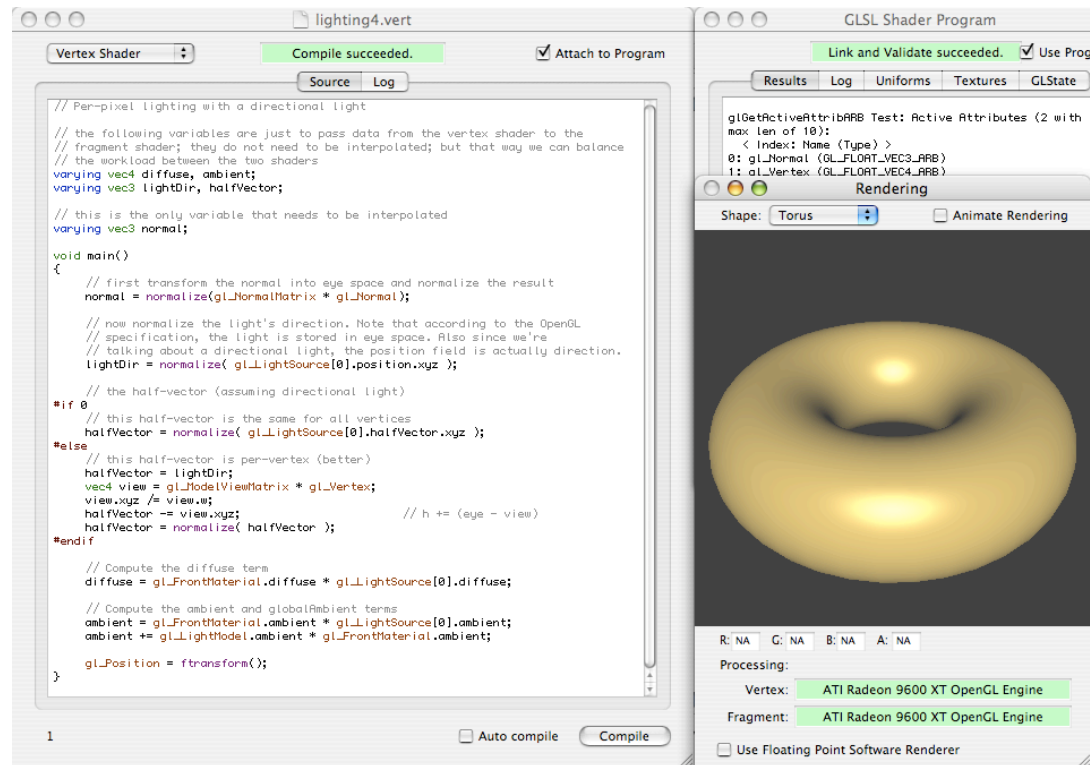
- Im C-Programm :

```
handle = glGetAttribLocation( prog_handle, "myAttrib" );  
. . .  
glVertexAttrib3f( handle, v1, v2, v3 );
```

# Beispiel: Per-Pixel Lighting

1. Diffuse lighting per-vertex
2. Mit ambientem Licht
3. Mit spekularem Lichtanteil
4. Per-Pixel Lighting

`lighting[1-4].*`



- Homogener Punkt  $\mathbf{v} = \text{vec4}(\mathbf{v}.\mathbf{xyz}, \mathbf{v}.\mathbf{w})$

- 3D-Äquivalent  $= \mathbf{v}.\mathbf{xyz}/\mathbf{v}.\mathbf{w}$

- Subtraktion zweier Punkte/Vektoren  $\mathbf{v}$  und  $\mathbf{e}$  :

- Homogen:  $\mathbf{v} - \mathbf{e}$

- Als 3D-Äquivalent:

$$\frac{\mathbf{v}.\mathbf{xyz}}{\mathbf{v}.\mathbf{w}} - \frac{\mathbf{e}.\mathbf{xyz}}{\mathbf{e}.\mathbf{w}} = \frac{\mathbf{v}.\mathbf{xyz} \cdot \mathbf{e}.\mathbf{w} - \mathbf{e}.\mathbf{xyz} \cdot \mathbf{v}.\mathbf{w}}{\mathbf{v}.\mathbf{w} \cdot \mathbf{e}.\mathbf{w}}$$

- Bei anschließender Normierung gilt:  $\left(\frac{\mathbf{v}}{a}\right)^0 = \mathbf{v}^0$

- Zusammen in GLSL :

**`normalize(v-e) ≡ normalize(v.xyz*e.w - e.xyz*v.w)`**

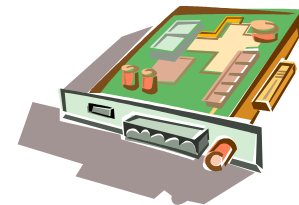
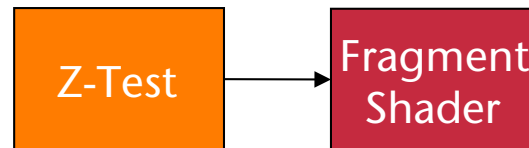
- Vorteil: klappt auch falls  $\mathbf{v}.\mathbf{w}$  oder  $\mathbf{e}.\mathbf{w} = 0$  !

# Der Z-Test in der Pipeline

- Wann findet der Z-Test statt?



- Early-Z:



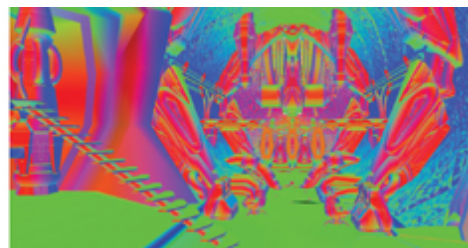
- Spart teure Fragment-Shader-Programmausführungen
- Reduziert Bandbreite von der GPU zum Framebuffer, und vom Texturspeicher zur GPU
- Wird automatisch *deaktiviert*, falls das Shader-Programm den Z-Wert (`gl_FragDepth`) manipuliert!



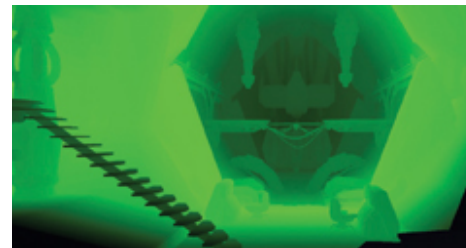
- 2-Pass-Rendering (oder mehr Passes):
  1. Geometry-only: rendere Geometrie, ohne Lighting/Shading, speichere statt dessen alle für das Lighting notwendigen Attribute in einem "G-Buffer" (= Satz von user-defined Buffers für die notwendigen Daten)



Fragment Colors



Normals



Depth



Edge Weight

2. Lighting-only:
  - Setze Lichtquellen
  - Rendere 1 großes Quad (um pro Pixel den Fragment-Shader 1x zu aktivieren)
  - Lese im Fragment-Shader den G-Buffer
  - Werte im Fragment-Shader das Lighting-Modell aus & schreibe in Color-Buffer

- Fertige Szene:

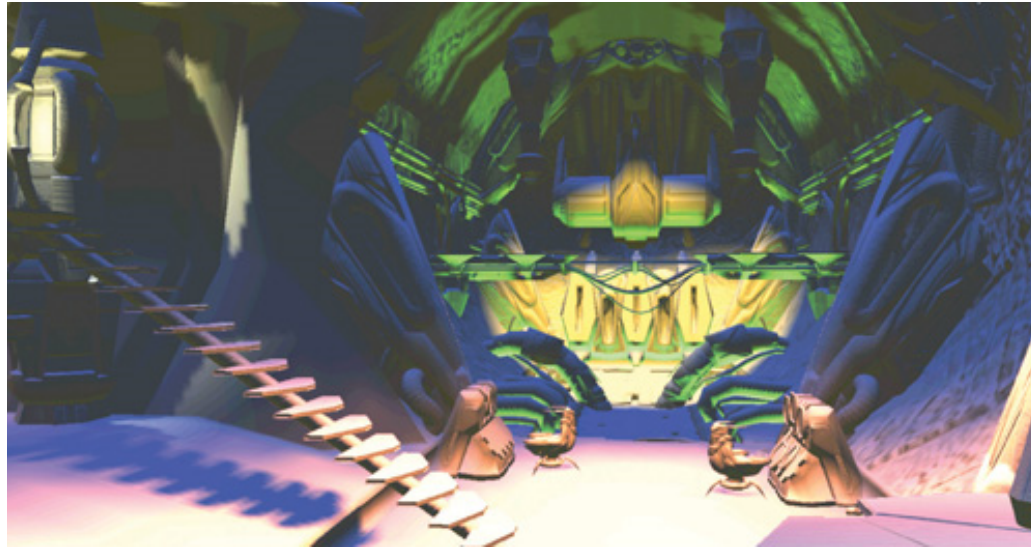


Image from Tabula Rasa

- Vorteile: vermeidet aufwendiges Shading von Fragmenten, die den Z-Test sowieso nicht überleben
- Nachteil: benötigt mehr Framebuffer-Speicher
- Frage: Was ist mit der Bandbreite?
- Literatur: GPU Gems 3, Kapitel 19 ( <http://developer.nvidia.com/object/gpu-gems-3.html> )

## Weiteres Beispiel, wo diese Technik angewendet wurde

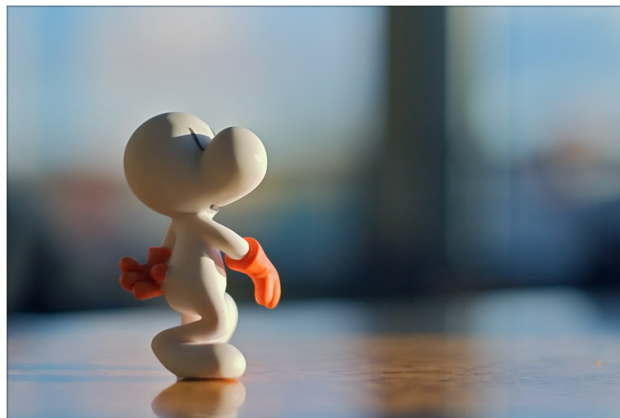
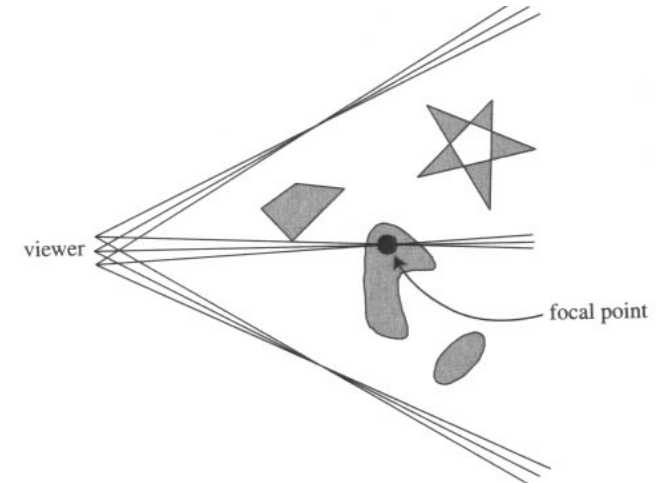


*S.T.A.L.K.E.R.: Clear Skies*

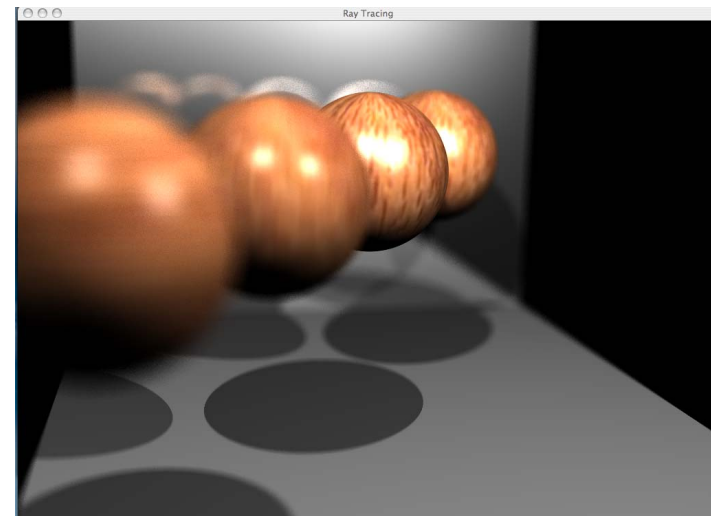
- Weitere Vorteile:
  - Einige Rendering-Techniken benötigen sowieso einen ersten Z-Only-Pass (z.B. Shadow Volumes), also kann man gleich etwas mehr bei diesem Pass im Buffer speichern
  - Die Kosten für Lighting sind unabhängig von der Objekt-Komplexität (= Anzahl Vertices)
  - Anzahl Lichtquellen ist (potentiell) unendlich (speichere Lichtquellen in Textur)

# Depth-of-Field (Tiefen(un)schärfe)

- Die alte (teure) Methode:
  - Rendere die Szene  $n$  Mal von leicht verschiedenen Viewpoints, je nach Größe der (virtuellen) Blende (*aperture*)
  - Akkumuliere alle Bilder (*Accumulation-Buffer*)
  - Teile am Ende die Werte im Accumulation-Buffer durch  $n \rightarrow$  Mittelwert

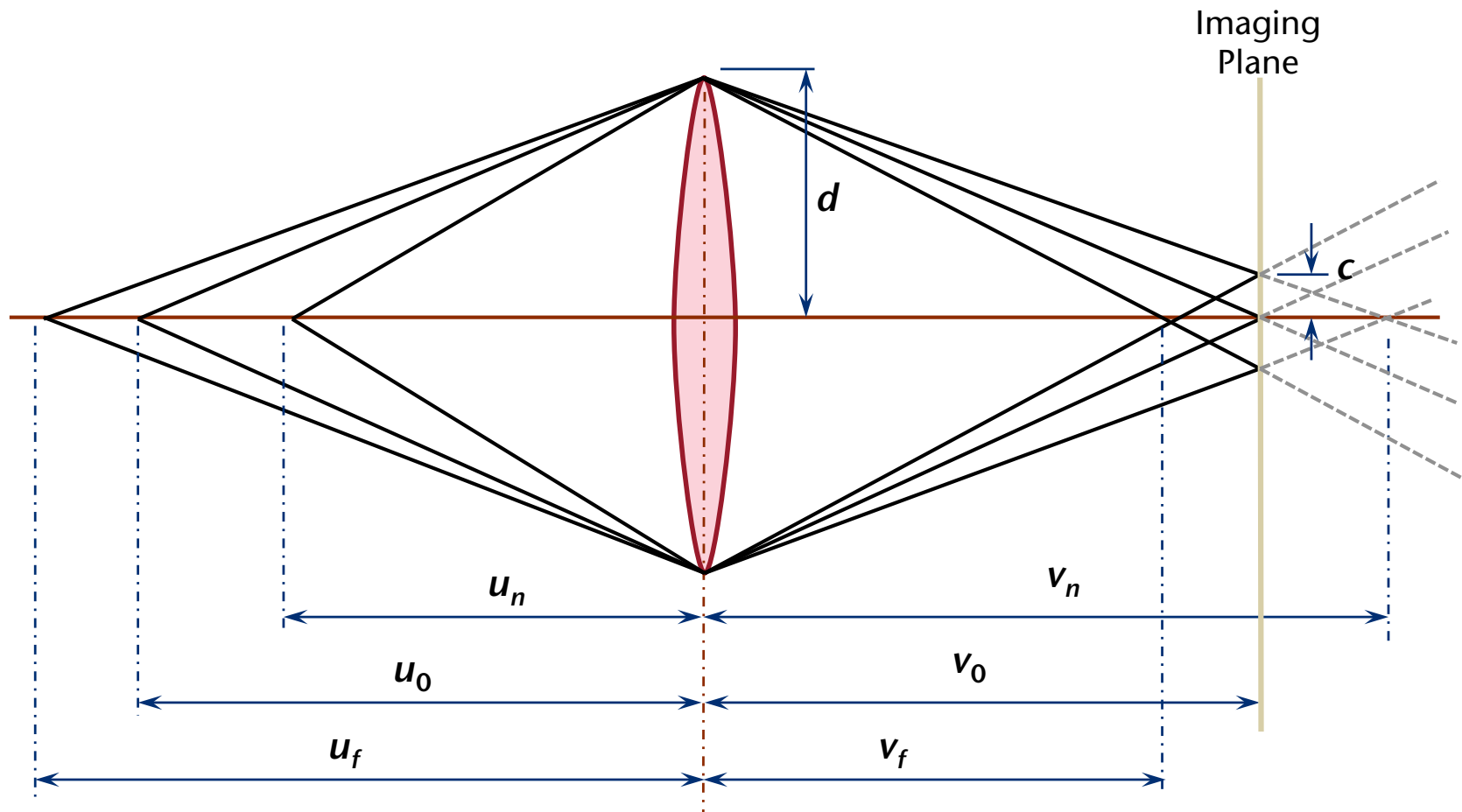


© 2005 Christoph Marquardt



# Der *Circle of Confusion* (CoC)

- Was passiert mit Bildpunkten, die außerhalb der Fokus-Ebene sind:



- Linsengleichung stellt Zusammenhang zwischen  $u$  und  $v$  dar:

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

- Aus Strahlensatz ("*using similar triangles*") folgt:

$$\frac{v_n - v_0}{v_n} = \frac{c}{d}$$

- Analog für  $v_f$
- Ergibt zusammen für einen beliebigen Punkt P:

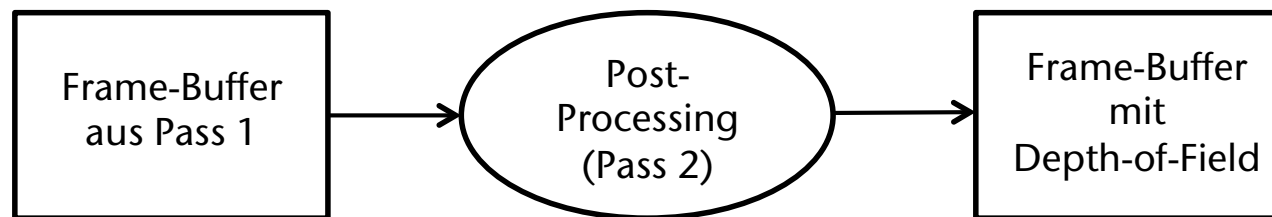
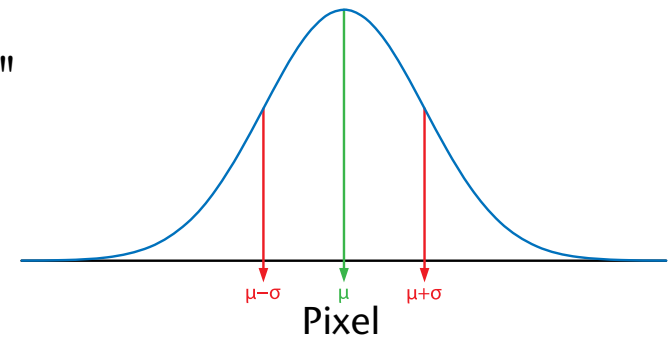
$$c = d \cdot \left| \frac{v_p - v_0}{v_p} \right|$$

- Linsengleichung einsetzen ergibt:

$$c = d \cdot \left| 1 - \frac{u_0}{u_p} \cdot \frac{u_p - f}{u_0 - f} \right|$$

■ Der Algorithmus:

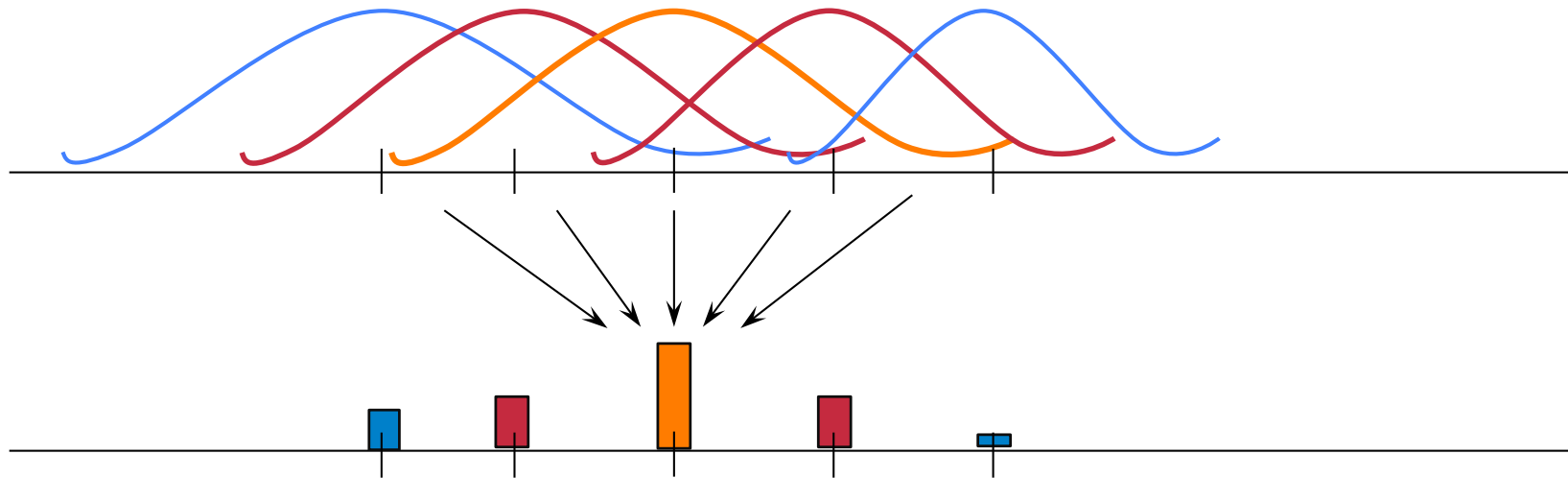
1. Rendere die Szene normal (z. B. klassisch oder mit Deferred Lighting); speichere zu jedem Pixel dessen z-Wert
2. Post-Processing: für jedes Pixel, "verschmiere" dessen Farbwert auf die Nachbarpixel gemäß einer Dichtefunktion, z. B. Gauß-Verteilung, abhängig vom Radius des CoC



- Problem: die Operation in Pass 2 ist eine sog. *Scatter-Operation* → sehr teuer bzw. unmöglich

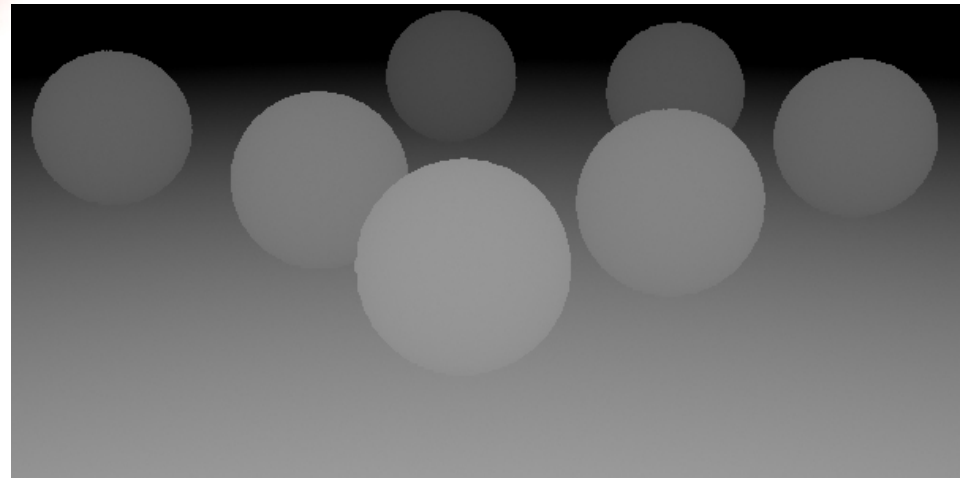
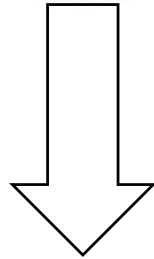


- Lösung: mache sog. **Gather-Operation** in jedem Pixel aus den Nachbarpixeln mit Gewichtung aus *deren* Dichtefunktion

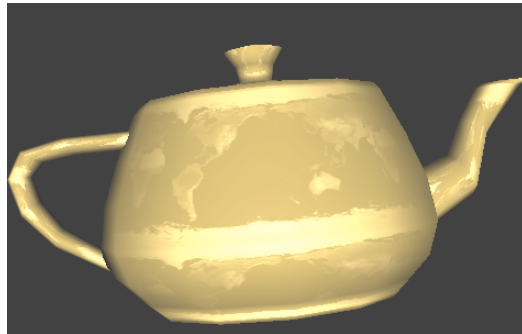


- Wichtig: Nachbarpixel, die weiter als *ihr* Circle-of-Confusion entfernt sind, müssen ausgeschlossen werden

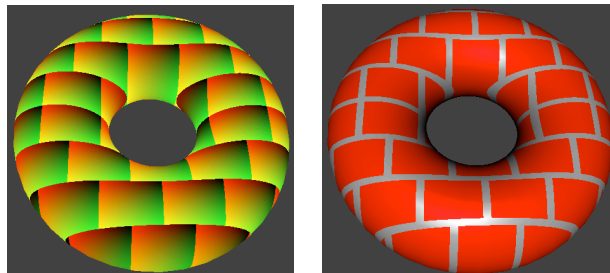
# Beispiel



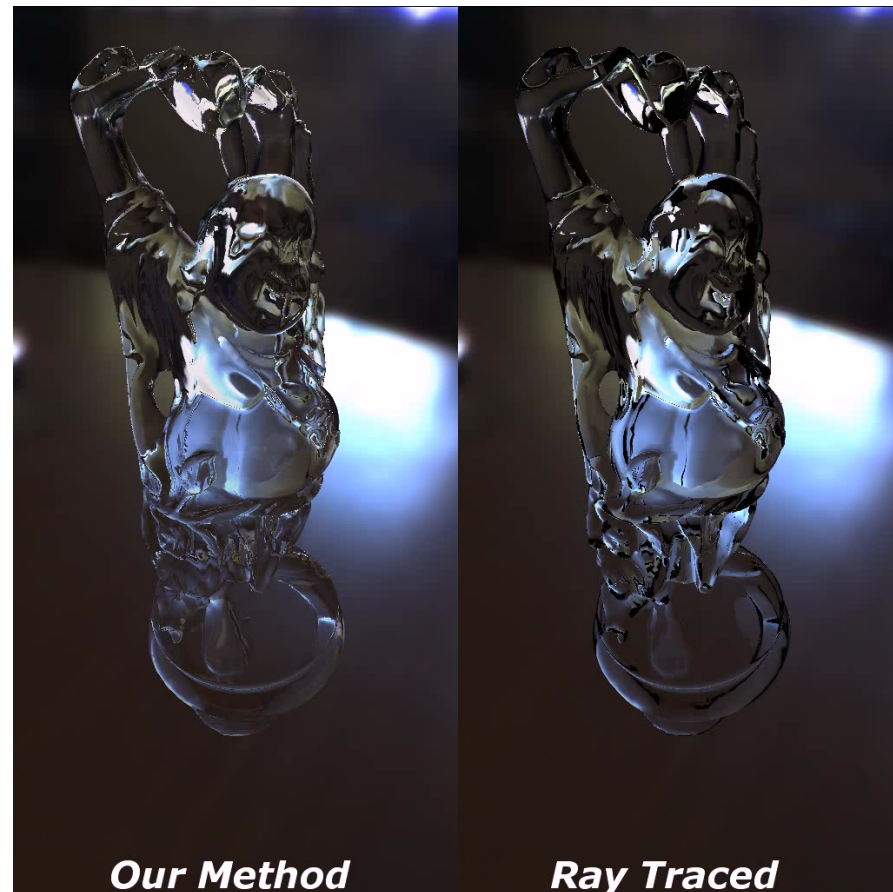
# Ausblick (in Advanced Computer Graphics)



"Gloss-Textur"



Prozedurale Texturen



Lichtbrechung (1 bounce)

