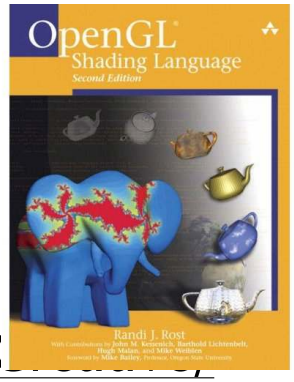
Computer-Graphik I
Shader-Programmierung

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

Literatur

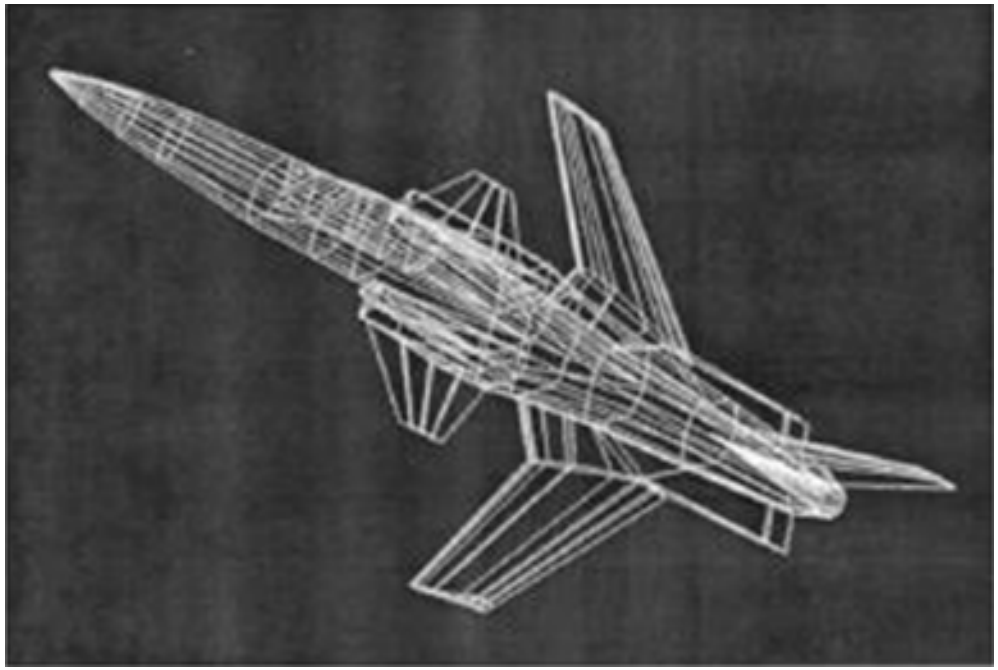
- Das "Orange Book" (veraltet)
- Das aktuelle "Red Book"
- Jacobo Rodríguez: *GLSL Essentials* (2013)
  - https://www.packtpub.com/mapt/book/Hardware%20&%20[illegible]/9781849698009



- OGLdev: http://ogldev.atspace.co.uk/index.html
- Siehe die zahlreichen Links und Dokumente auf der VL-Homepage!

The Quest for Realism

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



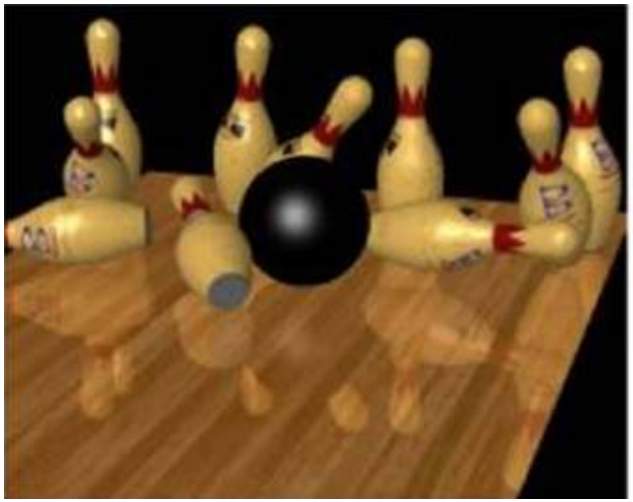
- Zweite Generation – Shaded Solids
  - Vertex-Oper.: Beleuchtungsrechung & Gouraud-Shading
  - Rasterization: Depth-Interpolation
  - Fragment-Oper.: Z-Test, Color Blending
  - Zeitraum: 1987 - 1992

(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



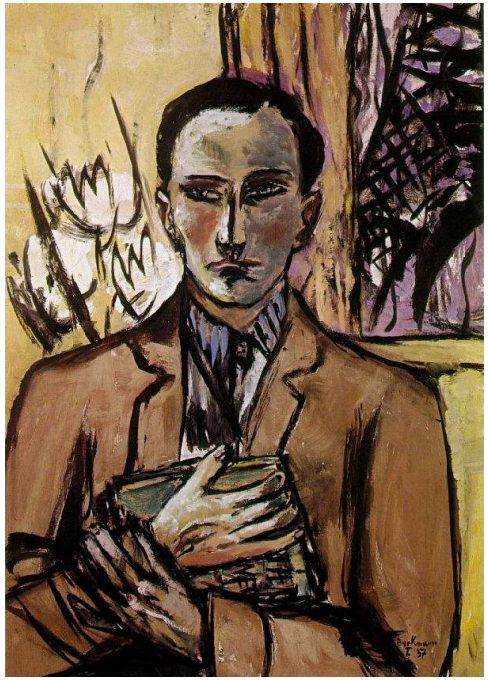
Final Fantasy

Beispiele für Effekte, die nur mit Shadern erreichbar sind

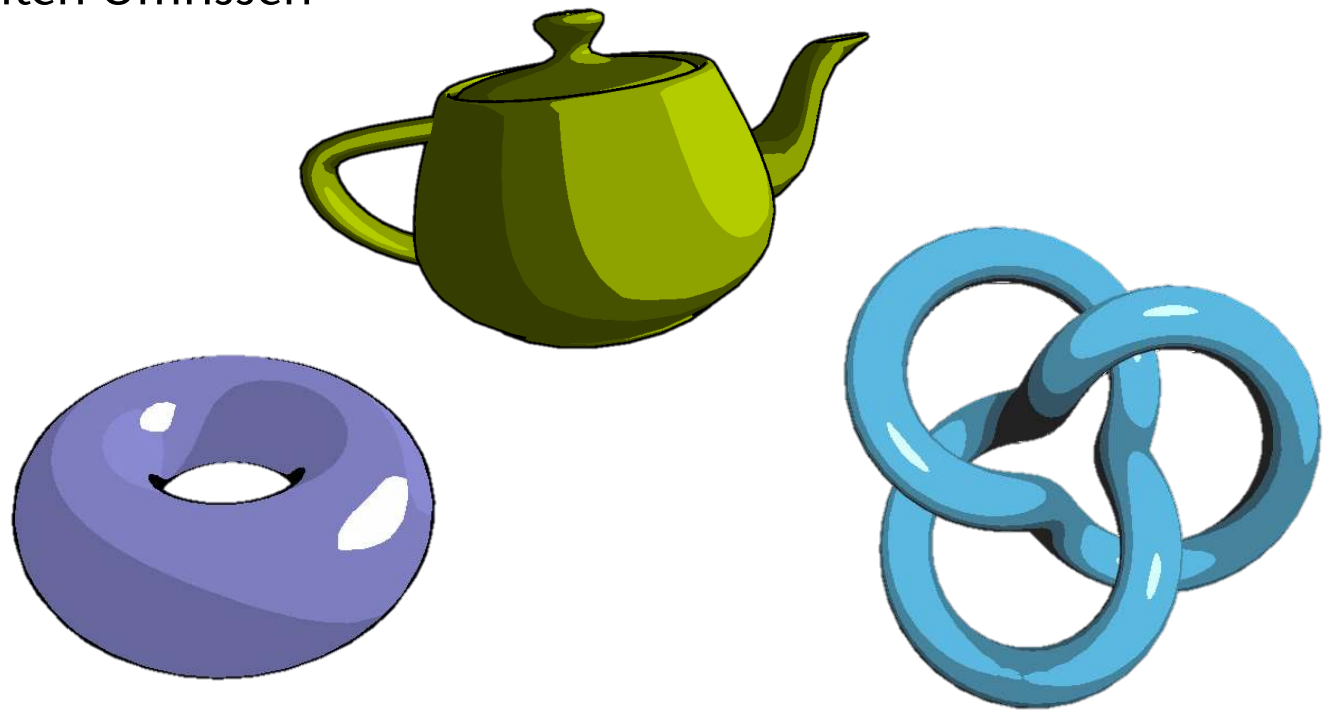
- Brushed Steel:
  - Prozedurale Textur
  - Anisotropes Lighting-Model

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

- Sog. Toon Shading:
  - Eher eine Form des Non-Photorealistic Rendering (NPR)
  - Oft kombiniert mit betonten Umrissen



Max Beckmann



- Vegetation & *Thin Film*

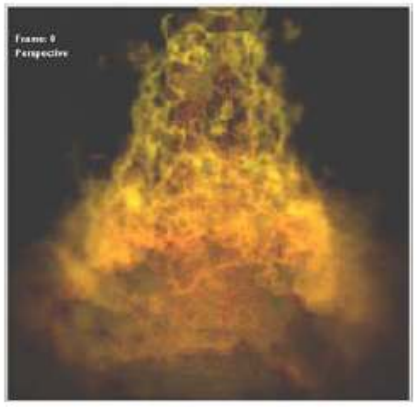
Translucent Backlighting

Simulation von Schillern durch Interferenz; kein einfaches Phong-Modell mehr

Other Advanced Shader Techniques

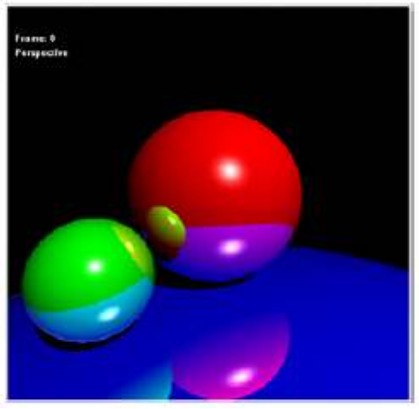
Subsurface Scattering

NPR Renders

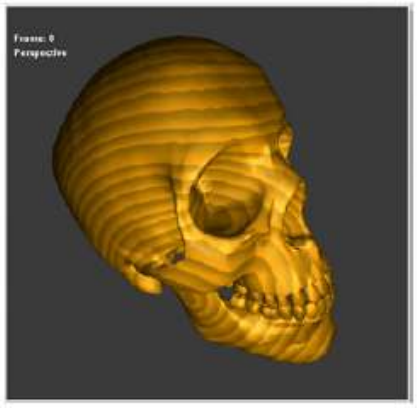


Fire Effects

Refraction



Ray Tracing

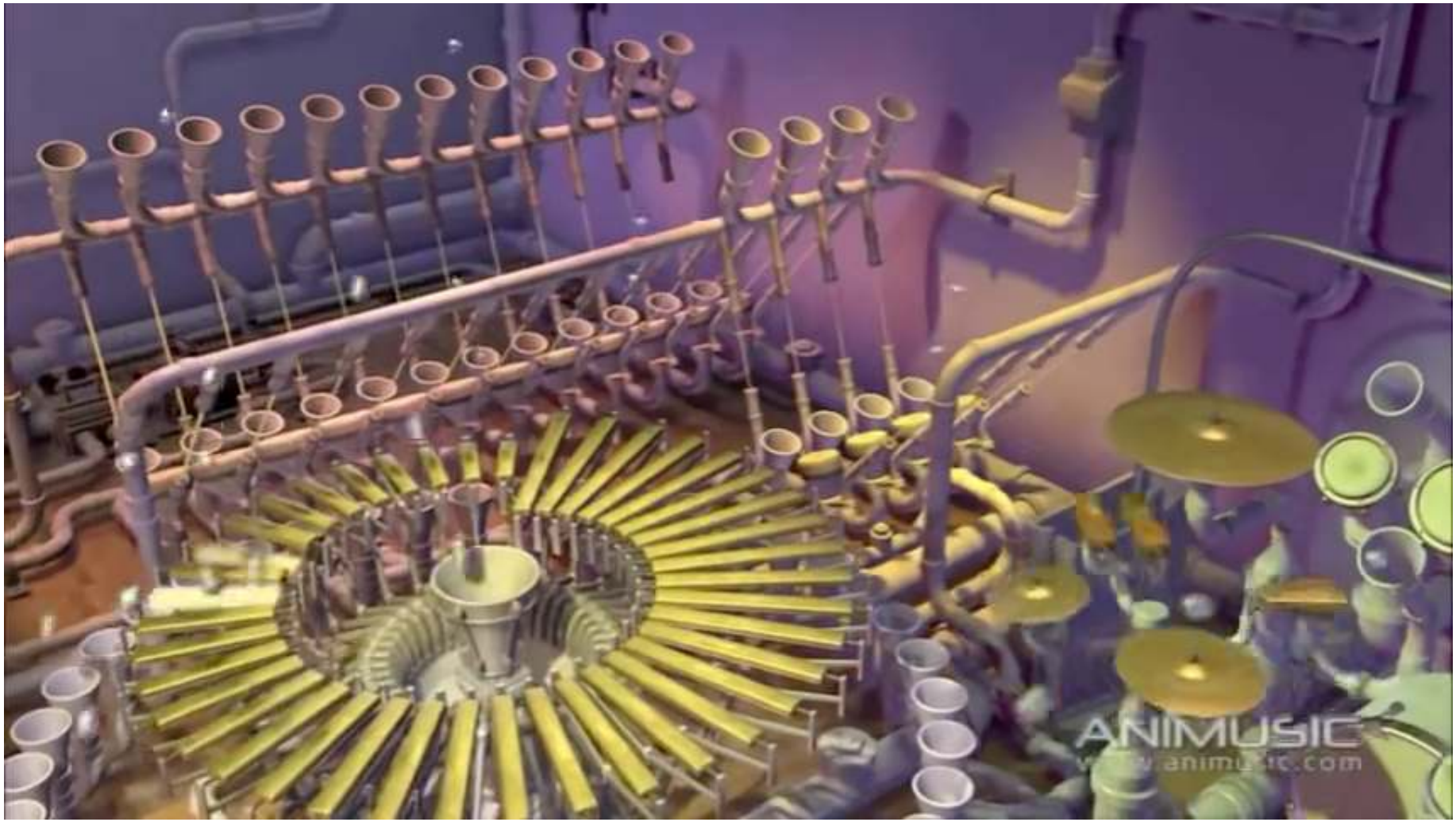


Solid Textures

Ambient Occlusion

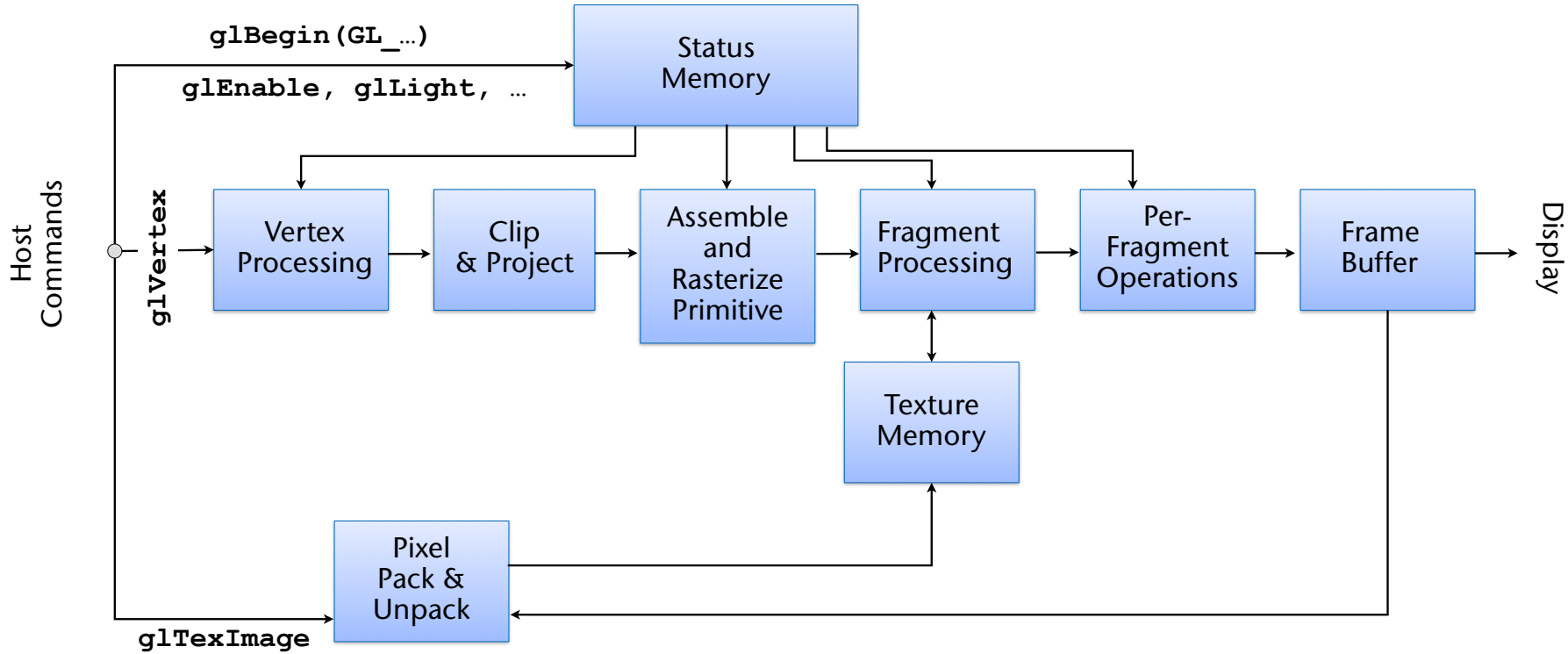
Cloth Simulation

Demo: Animusic's Pipe Dream

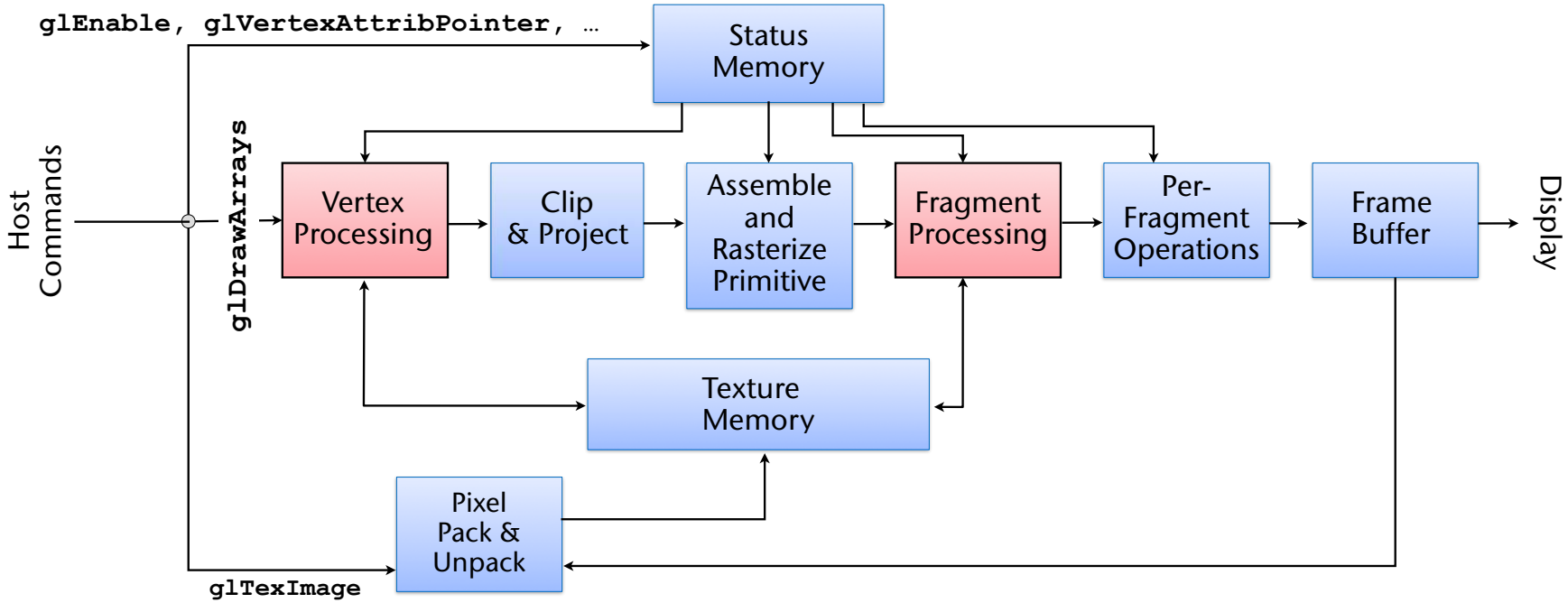


Erinnerung: die Graphik-Pipeline früher und heute

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



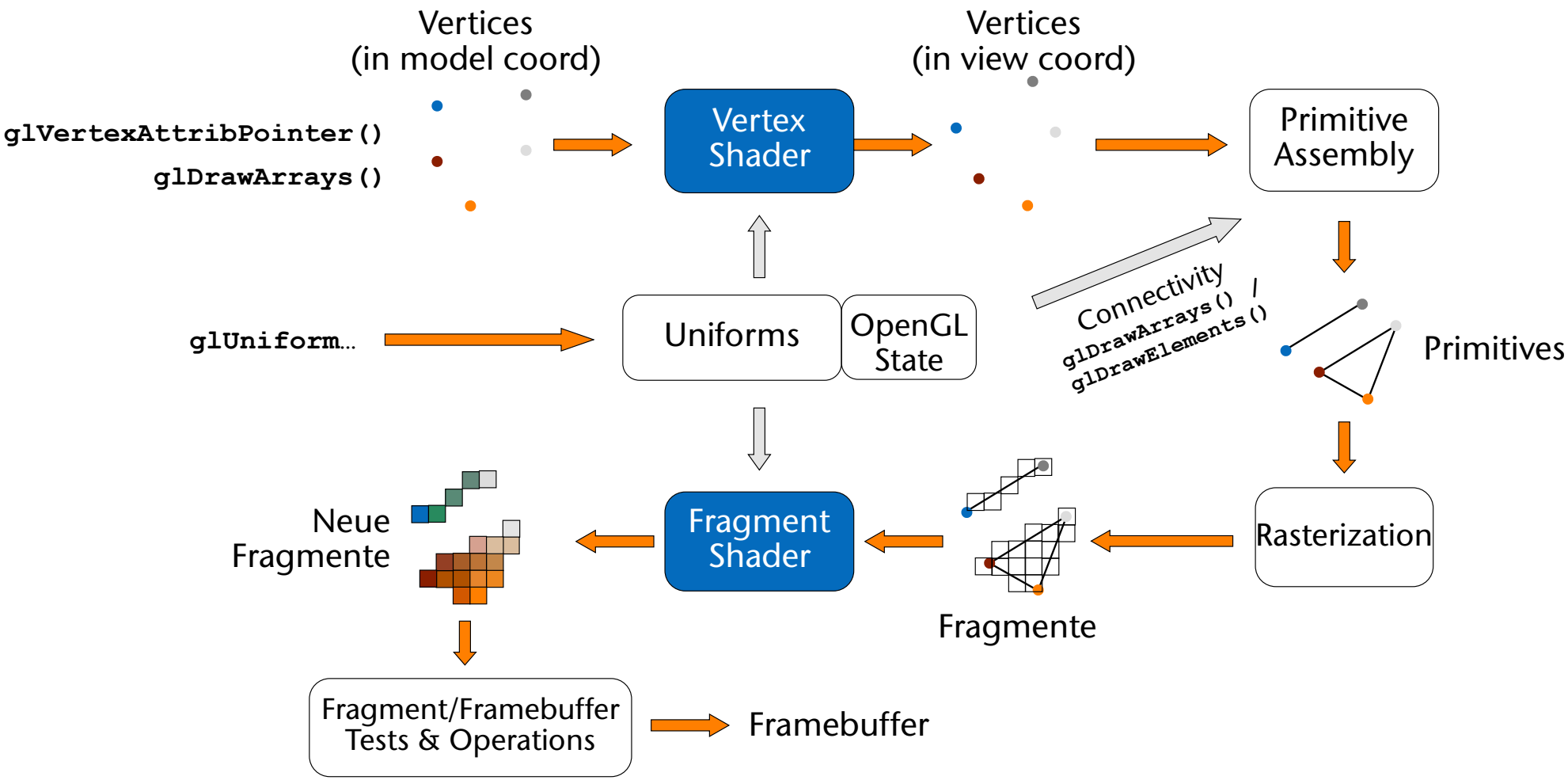
- Heute: programmierbare *vertex und fragment processors*
- Texturspeicher = allgemeiner Speicher für beliebige Daten
- Balancierung der Pipeline ist jetzt des Programmierer's Aufgabe



Kommunikation mit OpenGL bzw. der Applikation

- Es gibt *keine vordefinierten* Normalen, Farben, Koordinaten mehr — nur noch Vertex-Attribute
- Es gibt *keine* vordefinierten Lichtquellen-Attribute mehr
- Zur Erinnerung: man kann Variablen deklarieren, die von außen (= OpenGL-Programm) gesetzt werden können:
  - Sog. uniform–Variablen: können sowohl von Vertex- als auch Fragement-Shader gelesen werden (aber nicht geschrieben)
  - Sog. attribute–Variablen: werden entlang der Pipeline durchgereicht (App. → OpenGL → Vertex-Shader → Fragment-Shader → Framebuffer)
- Im Textur-Speicher können beliebige Daten an Shader übergeben werden
  - Interpretation bleibt Shader überlassen

Abstraktere Übersicht der programmierbaren Pipeline



Hilfsvorstellung zum Execution Model einer GPU

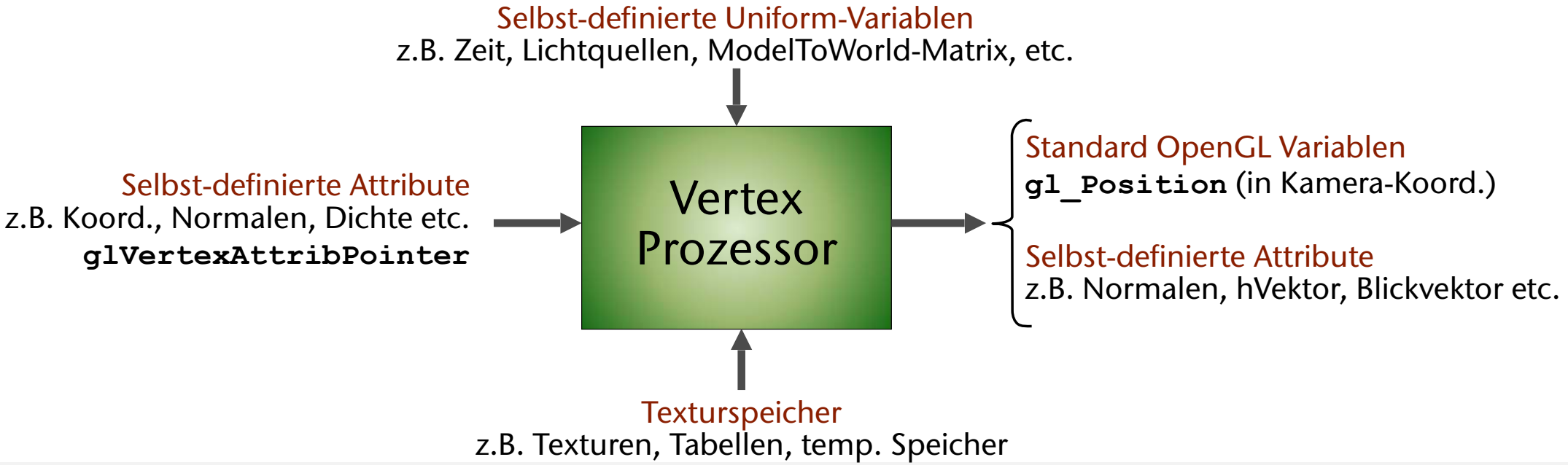
```
foreach tri in triangles:
   // run the vertex program on each vertex
   v1 = process_vertex( tri.vertex[0] )
   v2 = process_vertex( tri.vertex[1] )
   v3 = process_vertex( tri.vertex[2] )

   // assemble the vertices into a triangle
   assembledtriangle = setup_triangle( 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 )
```

Fragment vs. Pixel

- Erinnerung: 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 (im Framebuffer)
  - Ein Fragment ist ein "Struct", das durch die Pipeline "wandert" und am Ende in ein Pixel gespeichert wird

Input & Output eines Vertex-Shaders

- Vertex Shader (= Programm) bekommt eine Reihe von Parametern:
  - Selbst-definierte Attribute, einen Satz pro Vertex aus dem VAO
- Resultat muß in **`out`**-Variablen geschrieben werden, die der Rasterizer dann ausliest und interpoliert (nur eine vordefinierte)

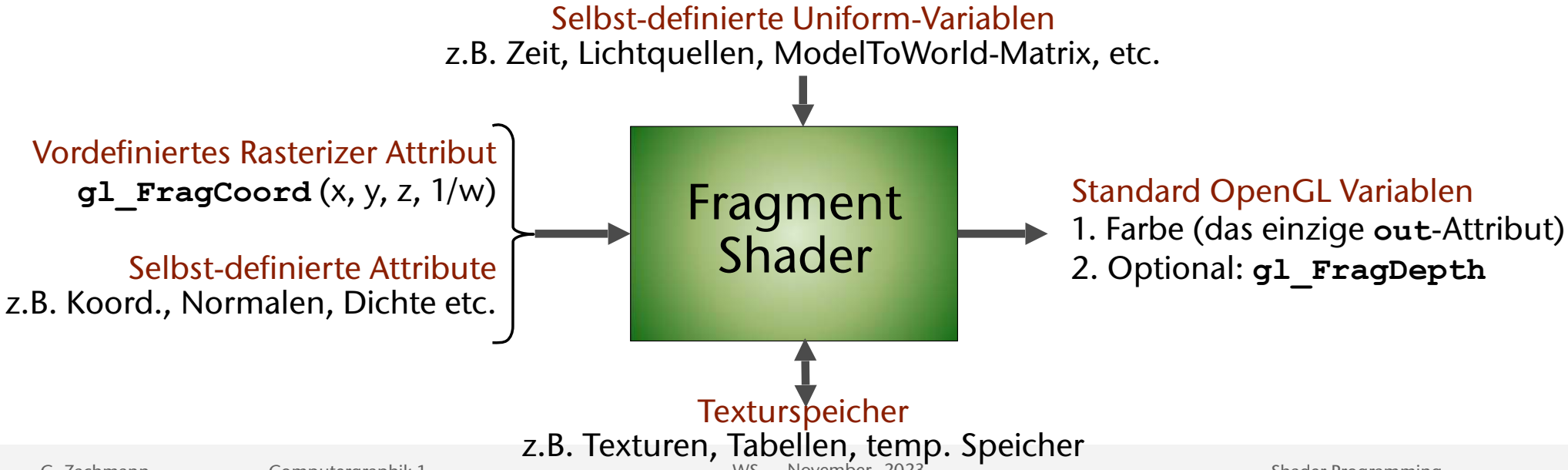


Aufgaben des Vertex-Shaders

- Beleuchtung und Vertex-Attribute pro Vertex berechnen
- Ein Vertex-Programm ersetzt folgende Funktionalität der alten 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-Shaders

- Fragment shader bekommt eine Reihe von Parametern:
  - Selbst-definierte Attribute, Uniforms
  - Fragment-Atteribute = alle Ausgaben des Vertex-Shaders, aber interpoliert!
    - Ausnahme: Qualifier **`flat`**, z.B. (**`flat out vec3 normal`**) ⟶ keine Interpolation
- Resultat: neues Fragment (i.A. mit anderer Farbe als vorher)



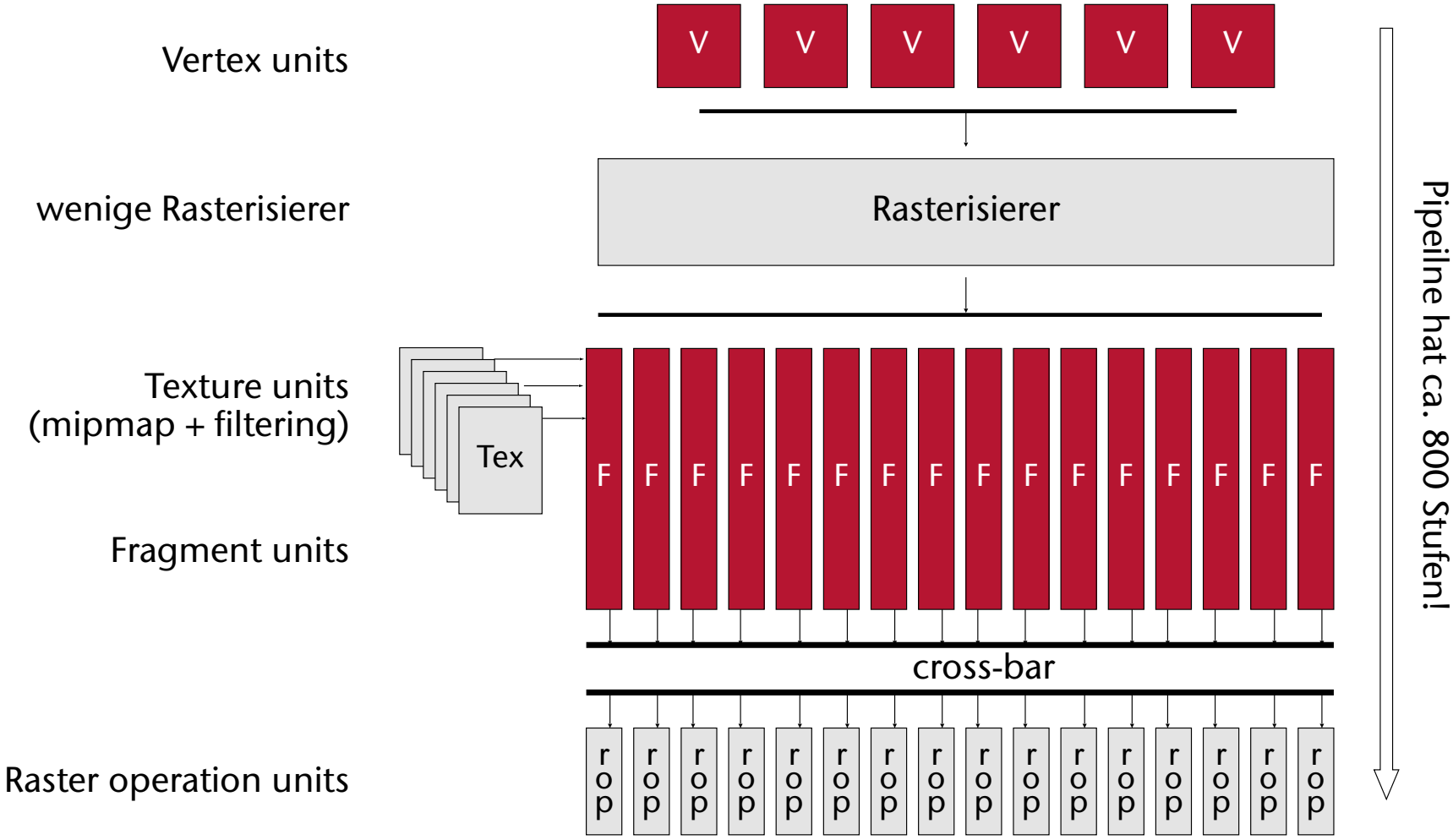
Aufgaben des Fragment-Shaders

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

Was ein Shader nicht kann

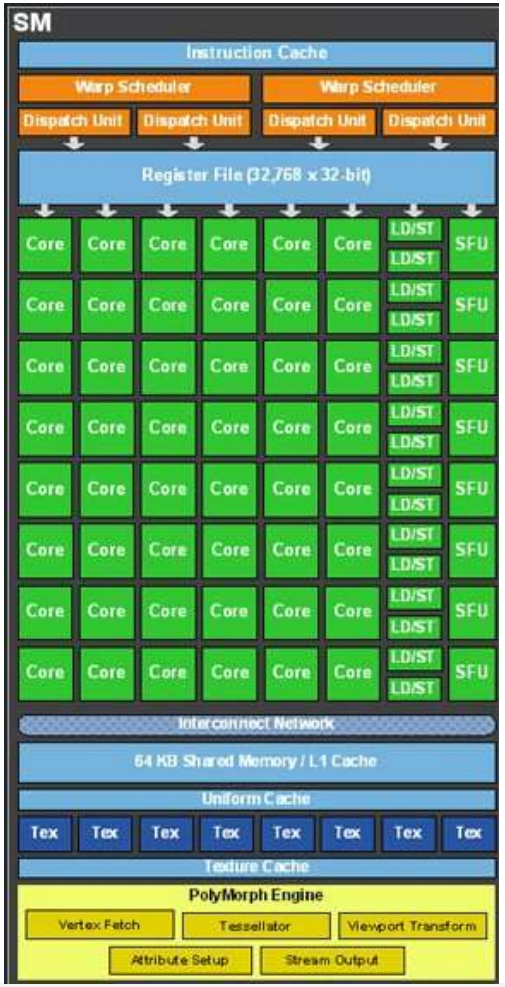
- Ein Vertex-Shader hat ***keinen*** Zugriff auf Connectivity-Info und Framebuffer
- Ein Fragment-Shader
  - hat *keinen* Zugriff auf danebenliegende Fragmente
  - hat *keinen* Lese-Zugriff auf den Framebuffer
  - kann *nicht* die Pixel-Koordinaten wechseln (aber kann auf sie zugreifen)

Etwas detailliertere Architektur



Streaming Multiprocessors

- Keine Unterscheidung mehr zwischen Vertex- und Fragment-Prozessoren, 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
  - Dekodiert Instruktionen
  - Enthält Caches
- Eine GPU hat mehrere SM's



Shader-Assembler-Code versus Shader-Highlevel-Code

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

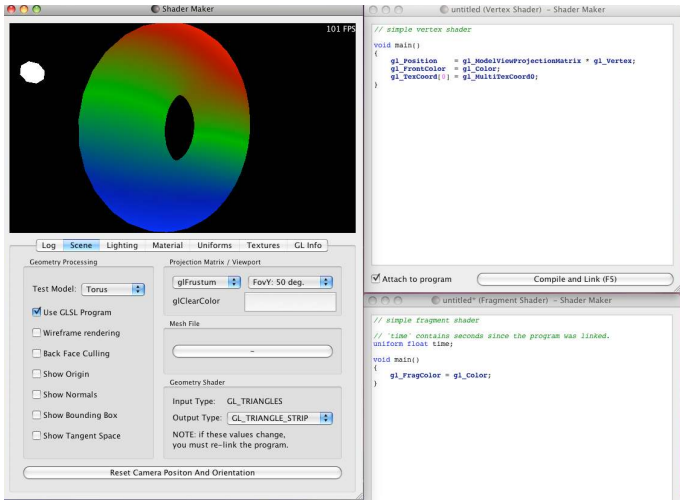
```
float spec = pow( max(0, dot(n,h)), phongExp);
color cResult = k_d * (cAmbi + cDiff) +
                k_s * spec * cSpec;
```

GPU-Hochsprachen

- GLSL (*"glslang"*; OpenGL Shading Language)
- HLSL (Microsoft)
- RenderMan (Pixar)
- MetaSL (mental ray)
- ...
-

Shader-Editoren (Shader-IDE's)

- Shader Maker (Neuauflage):
  - Cross-platform
  - OpenGL 4+
  - cgvr.informatik.uni-bremen.de/research/shader_maker/
- SHADERed: mit Debugger
  - shadered.org bzw. github.com/dfranx/SHADERed
  - Needs mouse with 3 buttons, unusual GUI
- ShaderFrog: runs in the Browser
  - Old GLSL syntax ("varying") only
- ShaderLabFramework (by Imperial College, London):
  - Offers 2-pass rendering
  - Binaries at http://wp.doc.ic.ac.uk/bkainz/teaching/co317-computer-graphics/
  - Source on Github: https://github.com/bkainz/ShaderLabFramework
- Die meisten Modeller (3dsMax, Blender, etc.)
  - Manche nur HLSL, manche nur eine Meta-Sprache
- KodeLife (Mac, Linux, Windows): live editing; keine Doku
- Im Browser (meist nur Fragment-Shader):
  - BKcore's Shdr: http://shdr.bkcore.com (no interactive uniforms)
  - WebGL playground: http://webglplayground.net (inkl. Javascript host side progr.)

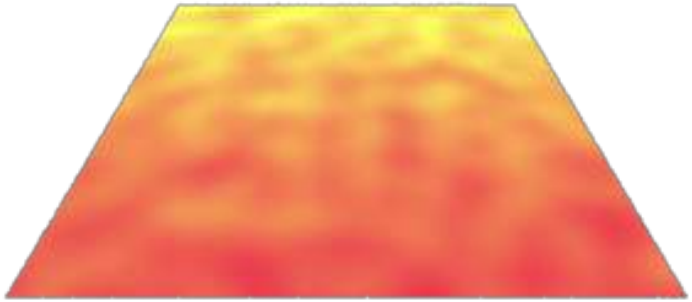


Debugging ...

- Nsight: Plugin für Visual Studio; und als eigene Eclipse-Version unter Linux (in CUDA enthalten)
- "Printf-Debugging" geht nicht
- Meine Tips:
  - Von einem funktionierenden Shader ausgehen und diesen in winzigen Schritten (einzelne Zeilen) modifizieren bzw. weiterentwickeln
  - Bei Aufgaben, wo mehrere Render-Passes gemacht werden müssen: nach jedem Pass die Textur / den Framebuffer anzeigen

Historischer Exkurs: RenderMan

- Entwickelt von Pixar in 1988
- Ist heute ein Industriestandard
- Eng an das Ray-Tracing-Paradigma angelehnt
- Mehrere Shader-Arten, je eine für Lichtquellen, Oberflächen, Volumen, Displacements, ...



```
surface
noise_test1(float    Kfb = 1,
                     amp = 0,    /* amplitude of the noise */
                     freq = 4;   /* frequency of the noise */
            color    top = 1,
                     lower = 0)
{
// Noise values range from 0 to 1.
float    ns =noise(s * freq, t * freq);

// Offset the true value of 't'. The 'amp' parameter will allow
// the artist to strengthen or weaken the visual effect.
float    tt = t + ns * amp;

color    surfcolor = mix(top, lower, tt);
Oi = Os;
Ci = Oi * Cs * surfcolor * Kfb;
}
```

Einführung in GLSL

- Fester Bestandteil seit 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

Datentypen: die üblichen Verdächtigen, plus domänenspezifische

- `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
- **`in / out / inout`**
  - Zur Deklaration von Vertex-Attributen
  - Können von Host-Seite nur für Vertex-Shader per **`glVertexAttribPointer()`** zugewiesen werden.
  - Werden 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:

```
vec3 red = vec3(1.0, 0.0, 0.0);
vec3 green = vec3(0.0, 1.0, 0.0);
vec3 yellow = red + green;
vec3 white = vec3(1.0);          // all components = 1.0
vec4 v4 = vec4(red, 1.0);        // # components must match
vec2 v2 = vec2( v4 );            // throws away 2 components

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

Matrix Constructors

```
vec4 v4;
mat4 m4;
m4 = mat4( 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, // COLUM MAJOR
           5.0, 6.0, 7.0, 8.0, // memory layout!
           9.0, 10., 11., 12.,
           13., 14., 15., 16.);
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.);

mat4( c1, c2, c3, c4 )  // wird spaltenweise eingetragen

mat4( 1.0 )             // = identity matrix
mat3( m4 )               // upper 3x3
vec4( m4 )               // 1st column
float( m4 )             // upper left
```

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

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
```

Flow-Control: 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
  - Beispiel:

```
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 ); }
```

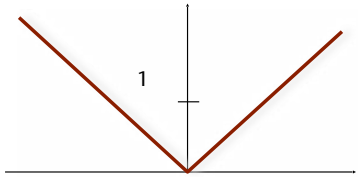
Echten Code so bitte nicht formatieren! Dies ist hier nur dem (fehlenden) Platz geschuldet!

Eingebaute Funktionen

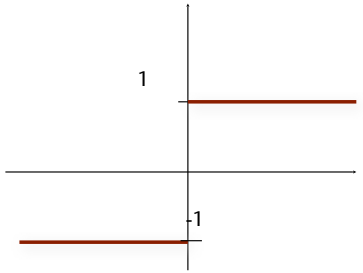
- Trigonometrie: **`sin, asin, radians,`** …
- Exponentialfunktionen : **`pow, exp, log, sqrt,`** …
- Sonstige: **`abs, clamp, max, sign,`** …
- Alle o.g. Funktionen nehmen und liefern **`float, vec2, vec3`**, oder **`vec4`**, und arbeiten komponentenweise!
- Geometrische Funktionen: **`cross(vec3,vec3), 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()`**

Einige häufige Funktionen

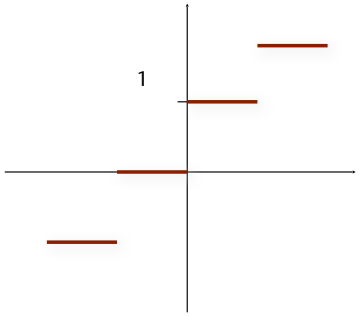
abs(x)



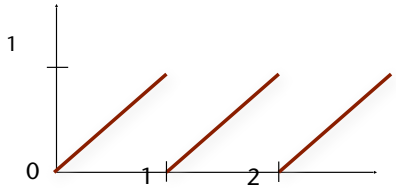
sign(x)



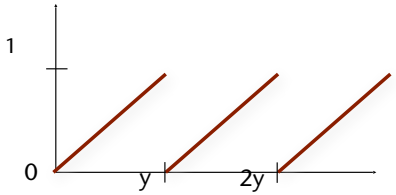
ceil(x)



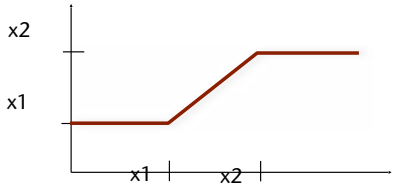
fract(x)



mod(x,y)

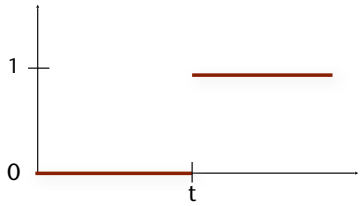


clamp(x, x1, x2)



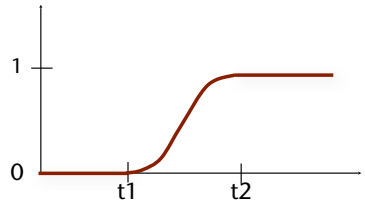
Zur Erinnerung: alle Funktionen arbeiten (komponentenweise) auf **`float`** ... **`vec4`** !

step(t, x)



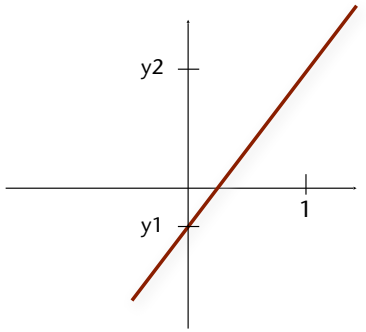

```
step(t,x) :=
x <= t ? 0.0 : 1.0
```

smoothstep(t1, t2, x)




```
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)

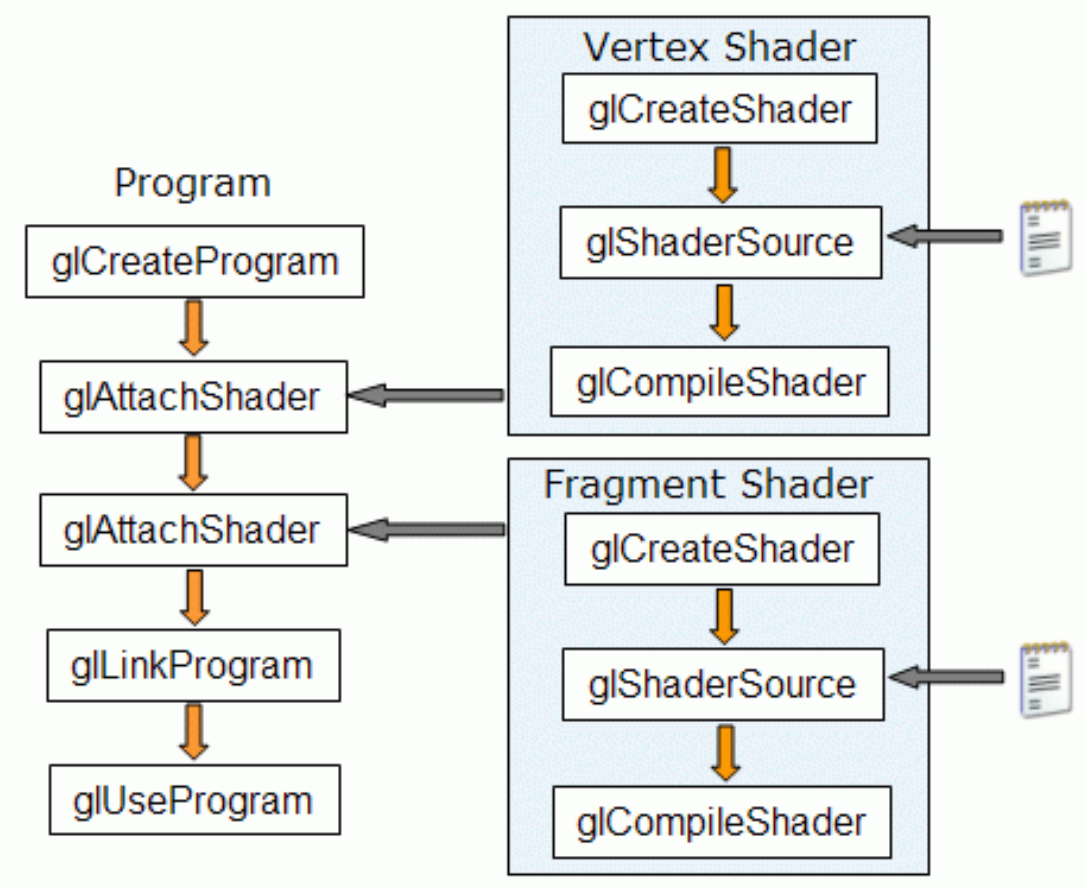



```
mix(y1,y2,t) :=
y1*(1.0-t) + y2*t
```

Laden eines Shaders

FYI (nicht Klausur-Relevant)

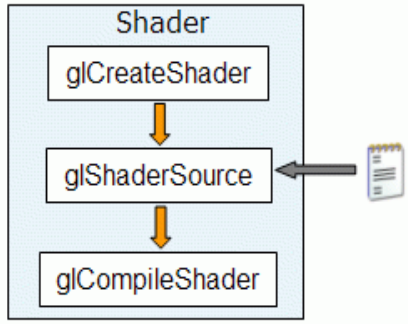
- Shader-Programme werden – wie in C — separat kompiliert und dann zu einem Programm zusammengelinkt

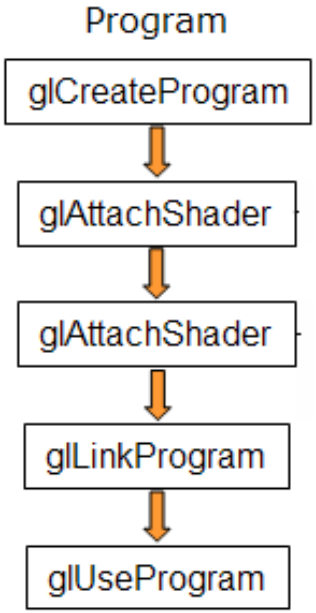


Im Detail

FYI (nicht Klausur-Relevant)

```
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 = glCreateProgramm();
glAttachShader( progr_handle, vert_sh_handle );
glAttachShader( progr_handle, frag_sh_handle );

glLinkProgramm( progr_handle );
glUse Programm( progr_handle );
```



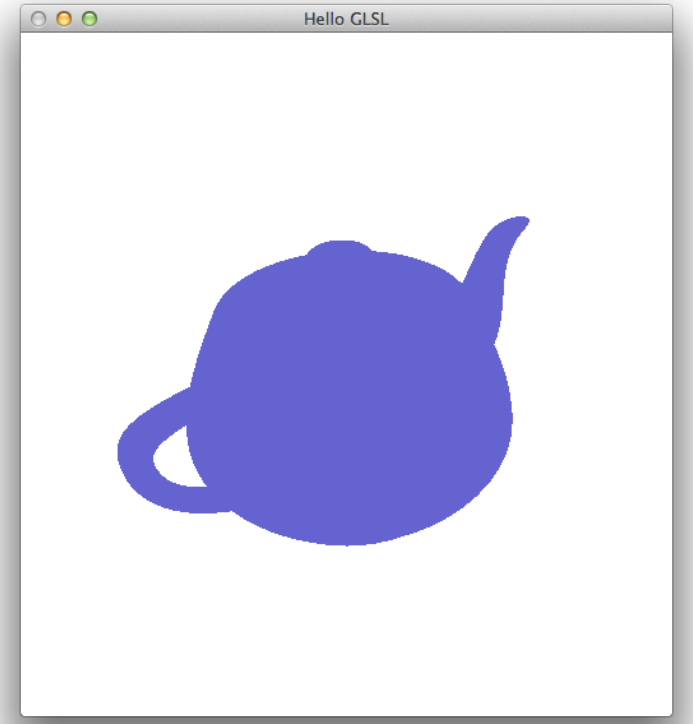


Bemerkungen

FYI (nicht Klausur-Relevant)

- 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 nur *nach* **`glDrawArrays`**)
  - Mit **`glUseProgram(0)`** schaltet man auf *fixed functionality*
  - *Nur im Compatibility Mode*
- Man kann einen Shader zu mehreren verschiedenen Programmen attachen

Beispiel: Hello_GLSL



hello_glsl*

Inspektion eines GLSL-Programms

FYI (nicht Klausur-Relevant)

- 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 für ein Attribut
- Uniform-Variablen:
  - **`glGetActiveUniform()`** : liefert Info zu einem Parameter
- Benötigt man vor allem zur Implementierung von sog. Shader-Editoren

Setzen von *uniform*-Variablen (auf Host-Seite)

FYI (nicht Klausur-Relevant)

- Handle auf Variable besorgen:

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

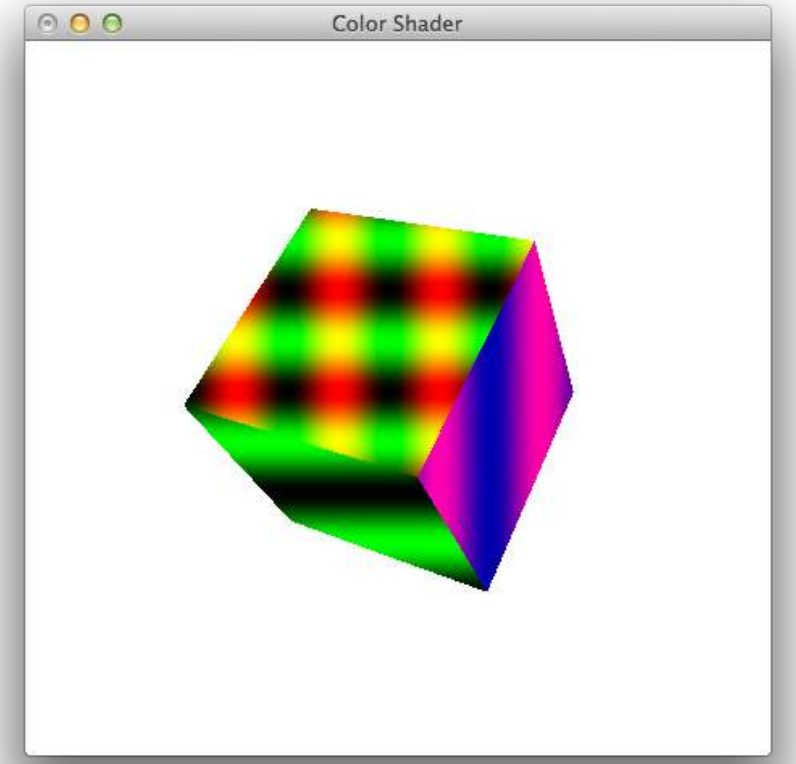
- Setzen einer uniform-Variable:
  - Für Float:

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

  - Für Matrizen:

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

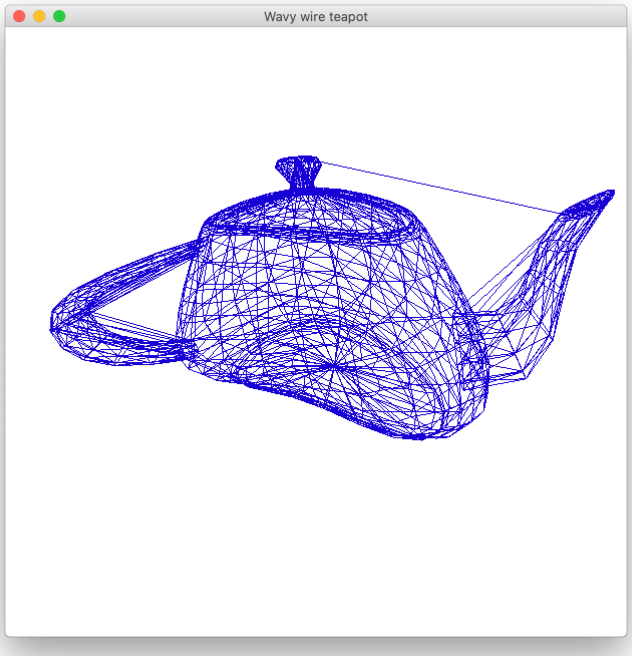
Wavy Colors: Beispiel für *uniform*-Variable



`color.{vert,frag}`

Beispiel für die Modifikation von Geometrie im Shader

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



Wavy wire teapot

Attribute als Input zum Vertex-Shader

- Man muss eigene Attribute definieren (mindestens eines):
  - Im Vertex-Shader: z.B. `in vec3 vertexPos;`
  - Im C-Programm :

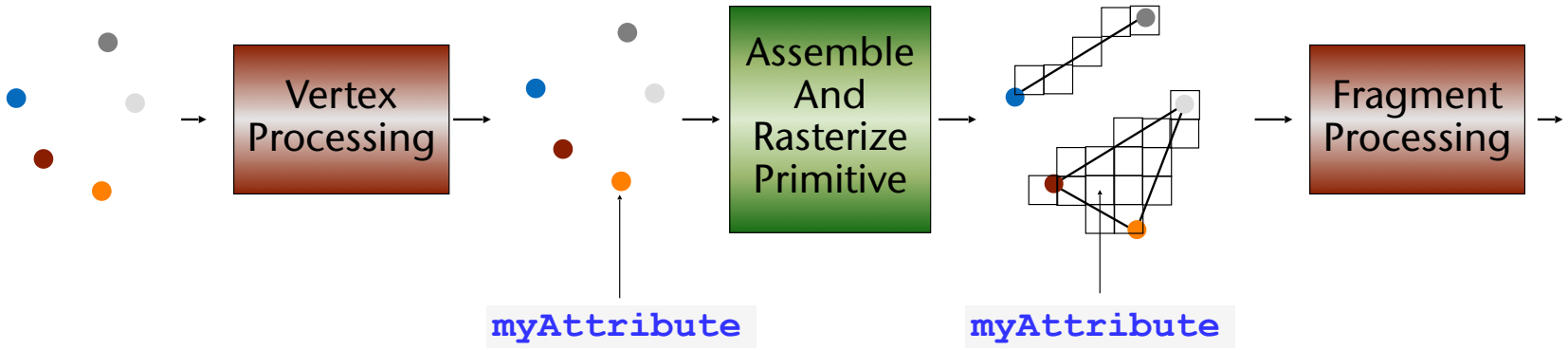
```
glBindVertexArray( m_vao );                          // activate VAO
glBindBuffer( GL_ARRAY_BUFFER, m_data );
glBufferData( GL_ARRAY_BUFFER, sizeof(vertices), vertices, GL_STATIC_DRAW );
handle = glGetAttribLocation( prog_handle, "vertexPos");
glEnableVertexAttribArray( handle );
glVertexAttribPointer( handle,                      // handle ID in shader
                       3,                           // size (here: 3 floats)
                       GL_FLOAT,                    // type: float
                       GL_FALSE,                    // normalized?
                       0,                           // stride
                       (void*)0   );                // offset in array
```

Attribut-Übergabe von Vertex- zu Fragment-Shader

- Mittels korrespondierenden in/out Variablen im Shader:

```
 out vec3 myAttribute;  // in vertex shader
...
 in  vec3 myAttribute;  // in fragment shader
```

- Achtung, dazwischen sitzt der Rasterizer und interpoliert!
  - I.A. sinnvoll, z.B. für Position, Farbe, Normale, etc.
  - Interpolation is vermeidbar mittels Qualifier **`flat`** (z.B. für Testzwecke)



Beispiele für die Verwendung von Attribut-Variablen

- Der "Toon-Shader"
  - Setze die Helligkeit nur abhängig von

$$a = \boldsymbol{l} \cdot \mathbf{n}$$

mit $\boldsymbol{l}$ = Lichtvektor, $\mathbf{n}$ = Normale

  - Diskretisiere die Helligkeit in (z.B.) 3 Stufen:

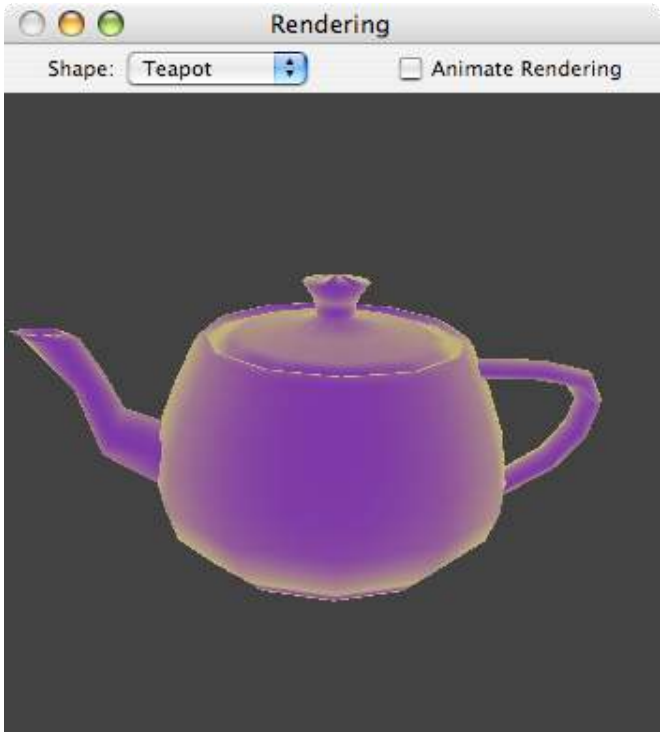
$$C_{\text{out}} = C_{\text{in}} \cdot \begin{cases} a_1 \,, & a \geq a_1 \\ a_2 \,, & a \geq a_2 \\ a_3 \,, & a \geq a_3 \\ a_4 \,, & \text{else} \end{cases}$$

wobei $a_i \in [0,1]$ die Levels sind, C_{in} die Farbe der Oberfläche ist

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

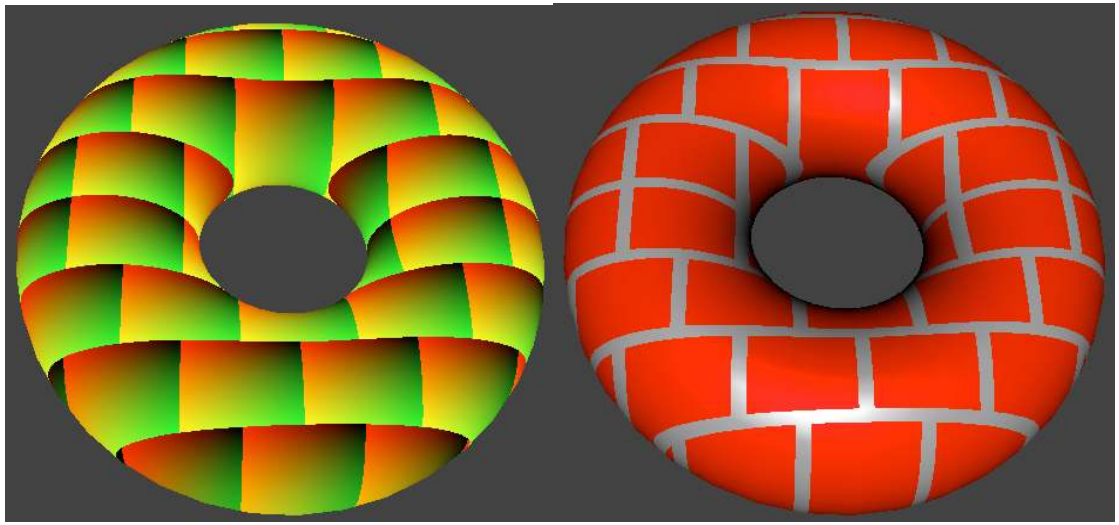
$$t = \max(0, \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{l}) \qquad t_{\text{alt}} = \frac{1 + \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{l}}{2}$$

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

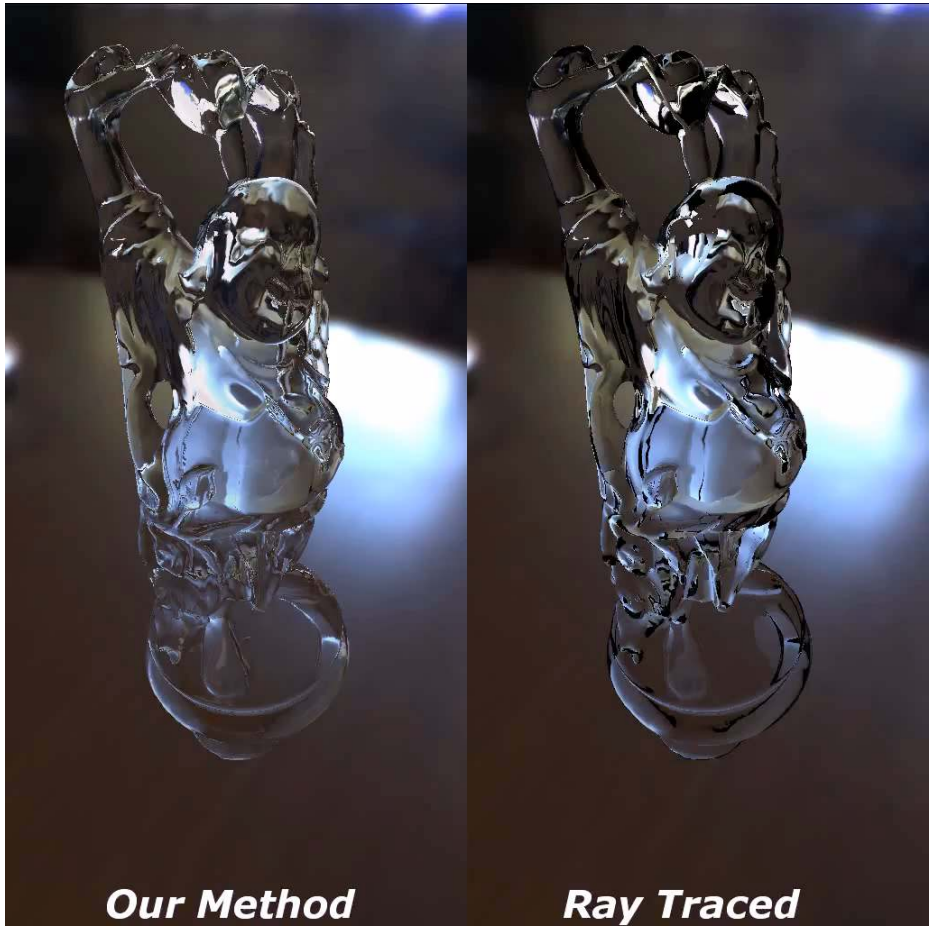


- Dies sind schon einfache Beispiele für sogenanntes *"non-photorealistic rendering"* (NPR)

Ausblick (in Advanced Computer Graphics)



Prozedurale Texturen



Lichtbrechung (1 bounce)