



Computergraphik I

Die Graphik-Pipeline & Einführung in OpenGL 3+



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



HOW STANDARDS PROLIFERATE: (SEE: A/C CHARGERS, CHARACTER ENCODINGS, INSTANT MESSAGING, ETC.)



xkcd

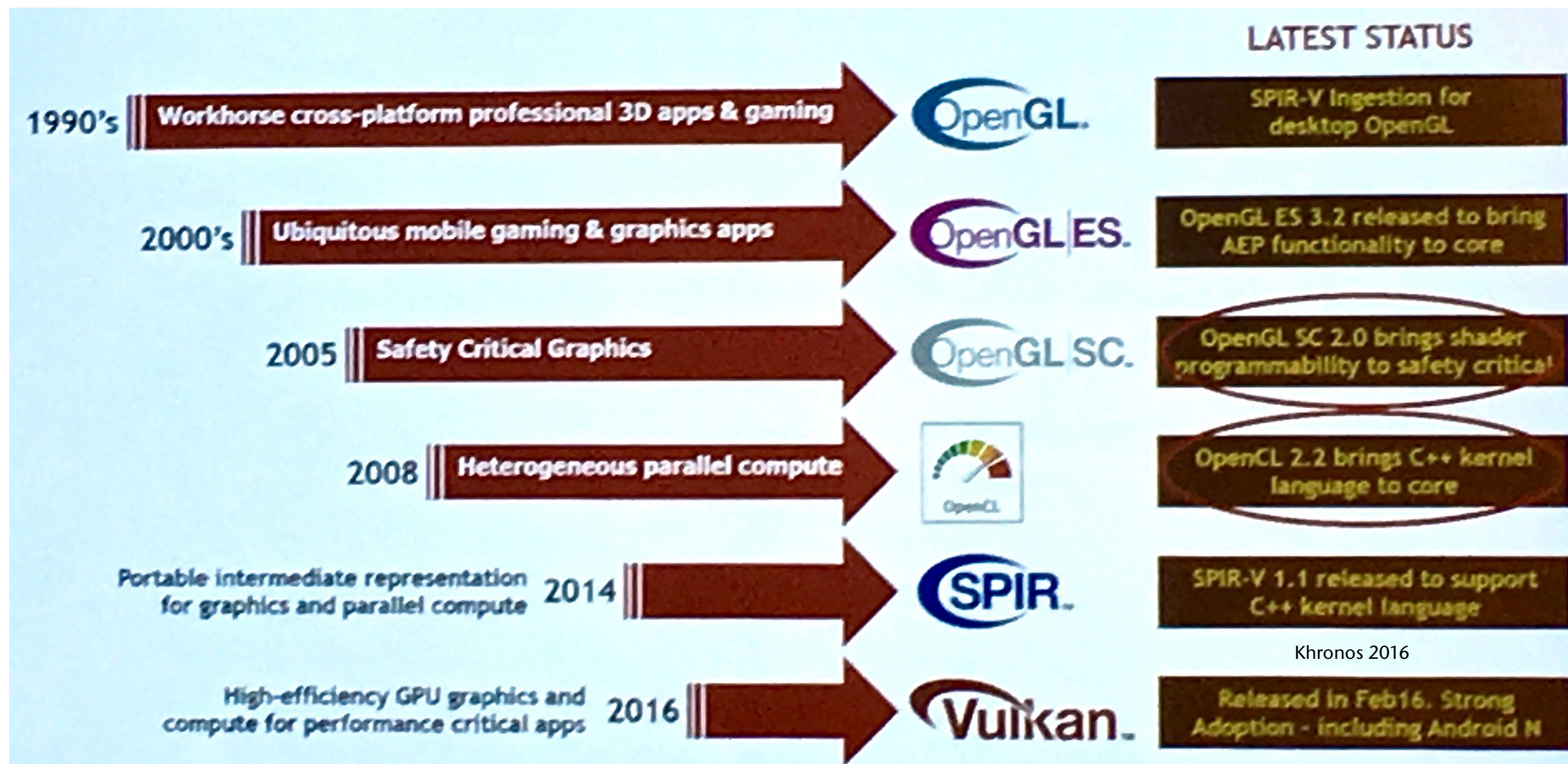
OpenGL

- OpenGL ist ein Software-Interface für Graphik-Hardware mit ca. 250 verschiedenen Kommandos
 - Hardware-unabhängig, Hersteller-unabhängig
- Warum „Open“?
 - Weiterentwicklung durch die Khronos-Gruppe
 - NVIDIA, ATI, IBM, Intel, SGI,
 - Von jedem Lizenznehmer erweiterbar (mittels Extensions)
- Nicht dabei (ein Feature): Handhabung von Fenstern/Windows, Benutzereingabe
- Der Standard im embedded Bereich (OpenGL ES)
 - Smartphones, car infotainment, aircraft cockpits, ...

Geschichte vor OpenGL

- Standardisierungsbemühungen vor OpenGL
 - GKS, PHIGS, ...
- „Proprietäre Systeme“
 - HP: Starbase
 - SGI: GL (Graphics Library)
- Gewinner: SGI mit GL in Verbindung mit sehr guter Hardware
- OpenGL (1992, Mark Segal & Kurt Akeley)
- Zukunft: Vulkan (?)
- Inzwischen (leider?) wieder mehr proprietäre APIs (Direct3D, Metal)

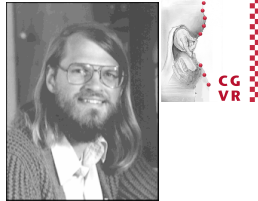
Khronos Open Standards for Graphics and Compute



Die Grundstruktur von OpenGL-Programmen

- 3 Arten von Funktionen
 - Zustand ändern
 - Daten (z.B. Vertex-Koordinaten) übergeben
 - Geometrie darstellen
- Klarer Namensraum
 - Befehle fangen mit gl... an
 - Konstanten mit GL_...
- Darauf aufbauend gibt es diverse Tools:
 - Glm: Mathematische Funktionen (Vektoren, Matrizen, ...)
 - glew/glfw/...: Libraries zur Benutzerinteraktion, Fenstermanagement
 - Qt: beinhaltet Kombination und noch viel mehr

"A Trip Down the Graphics Pipeline"



- Input:

- Geometric model: description of all objects, surfaces,
- Transformations
- Lighting model: Computational description of object and light properties, interaction (e.g., reflection)
- Synthetic Viewpoint (or Camera): Eye position and viewing frustum
- Raster Viewport (Frame Buffer): Pixel grid onto which image plane is mapped

- Output:

- Colors / Intensities suitable for framebuffer display (for example, 24 Bits RGB values at each pixel)



Model-to-World Transf.

Illumination (Shading)

Viewing Transformation

Clipping

Projection
(to Screen Space)

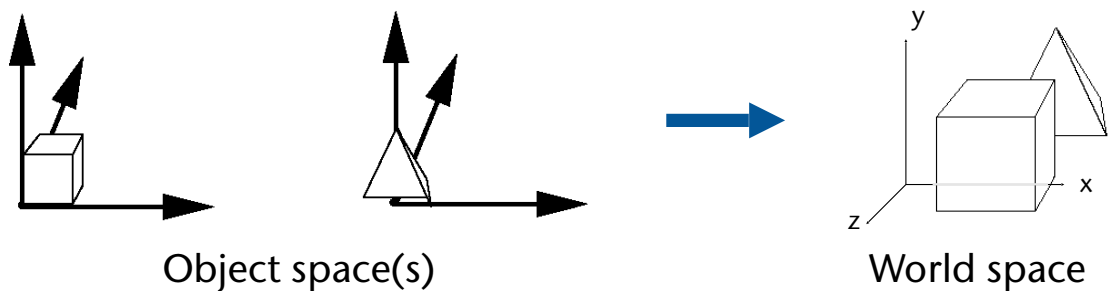
Scan Conversion
(Rasterization)



Visibility / Display

Model Transformation (Model-to-World)

- Jedes 3D Modell (Objekt) wird im eigenen Koordinatensystem definiert (**object space**)
- **Model Transformation** positioniert die Objekte in einem allg. Koordinatensystem (**world space**)



Model-to-World Transf.

Illumination (Shading)

Viewing Transformation

Clipping

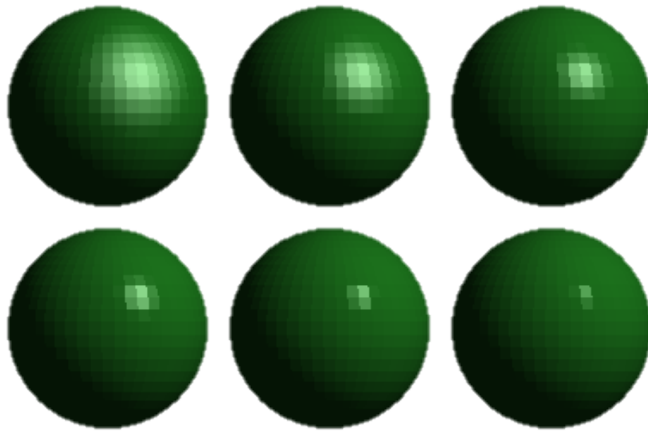
Projection
(to Screen Space)

Scan Conversion
(Rasterization)

Visibility / Display

Illumination (Beleuchtung, Schattierung)

- **Beleuchten** von Polygonen (für Schattierung und Highlights) gemäß der Material-Eigenschaften, Oberflächen-eigenschaften und Lichtquellen
- Lokale **Beleuchtungsmodelle** (kein Lichttransport von einem Obj zum anderen)



Model-to-World Transf.

Illumination (Shading)

Viewing Transformation

Clipping

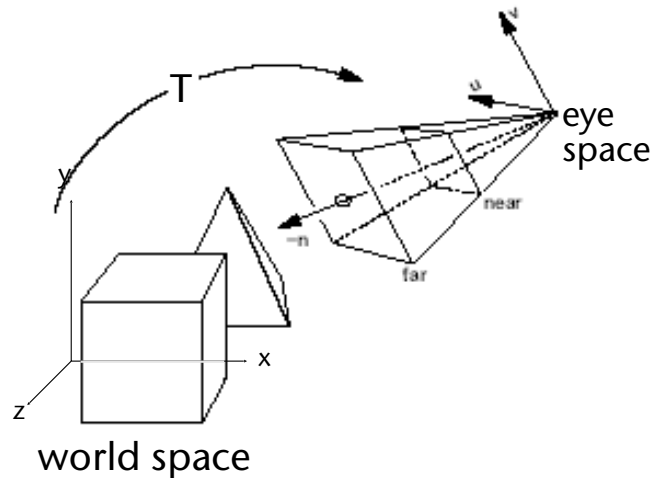
Projection
(to Screen Space)

Scan Conversion
(Rasterization)

Visibility / Display

Viewing Transformation

- Umwandeln von **Welt-Koord.** nach **Kamera-Koord.**
- Bestimme eine Transformation T für die komplette Szene so, daß die Betrachter-Position in den Ursprung verschoben wird und Blickrichtung entlang der $(-Z)$ -Achse ist



Model-to-World Transf.

Illumination (Shading)

Viewing Transformation

Clipping

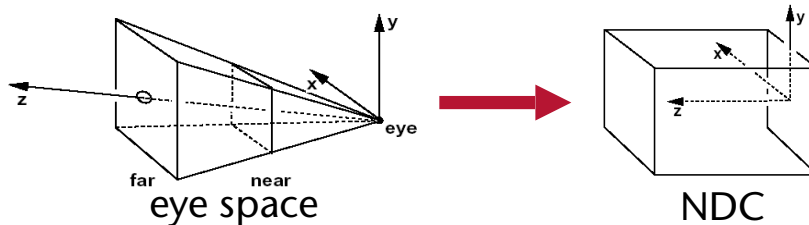
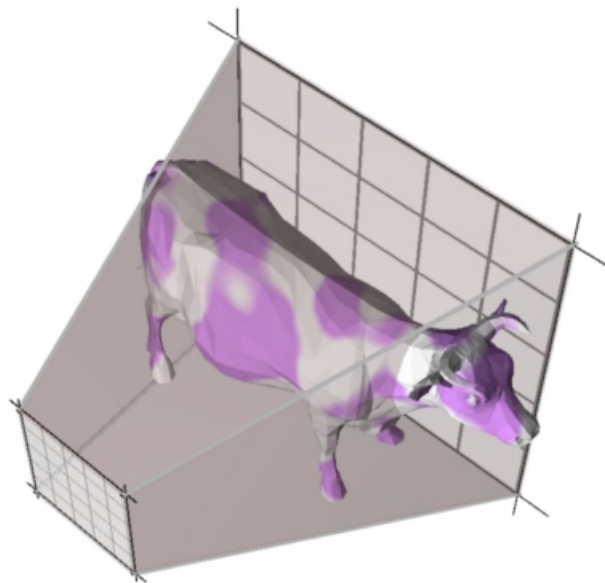
Projection
(to Screen Space)

Scan Conversion
(Rasterization)

Visibility / Display

Clipping

- Abschneiden der Polygone, die außerhalb des sichtbaren Bereiches liegen (**view frustum**)
- Trick: transformiere Szene in **normalisierte Koordinaten** (NDC)



Model-to-World Transf.

Illumination (Shading)

Viewing Transformation

Clipping

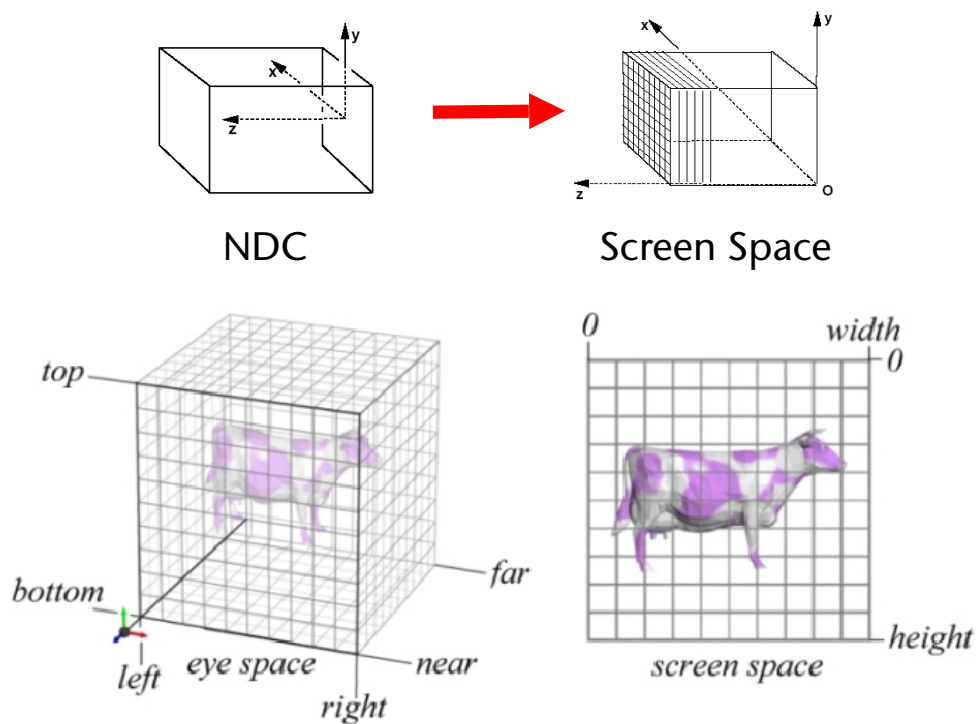
Projection
(to Screen Space)

Scan Conversion
(Rasterization)

Visibility / Display

Projektion

- Das Objekt wird nach 2D projiziert und räumlich diskretisiert (*screen space*)



Model-to-World Transf.

Illumination (Shading)

Viewing Transformation

Clipping

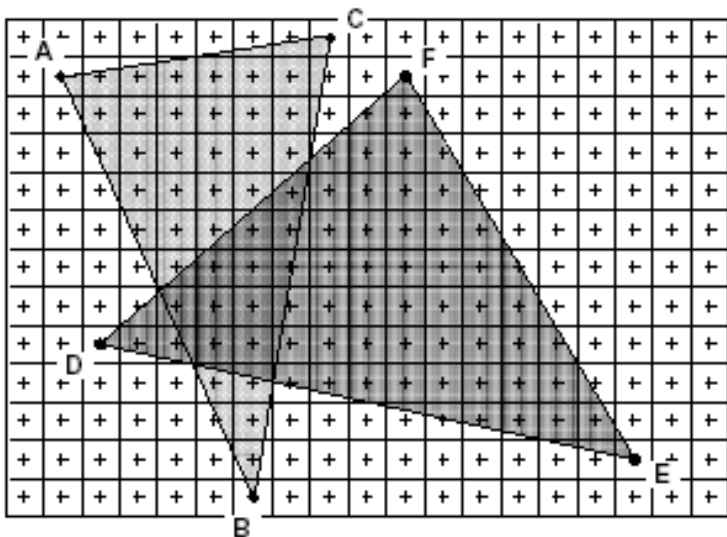
Projection
(to Screen Space)

Scan Conversion
(Rasterization)

Visibility / Display

Scan Conversion (Rasterisierung)

- **Rasterisierung** (= Diskretisierung) der Polygone in Pixel
- Gleichzeitig Ecken-Werte interpolieren (Farbe, Tiefenwert, ...)



Model-to-World Transf.

Illumination (Shading)

Viewing Transformation

Clipping

Projection
(to Screen Space)

**Scan Conversion
(Rasterization)**

Visibility / Display

Visibility (Sichtbarkeit) u.a. Tests

- Verdeckungen bestimmen
- Evtl. weitere Pixel-Operationen:
 - Blending mit vorhandenem Frame-Buffer-Inhalt
 - Maskierung (z.B. wegen Verdeckung durch andere Fenster)
 - Farb-Transfer

Model-to-World Transf.

Illumination (Shading)

Viewing Transformation

Clipping

Projection
(to Screen Space)

Scan Conversion
(Rasterization)

Visibility / Display

Definition Vertex

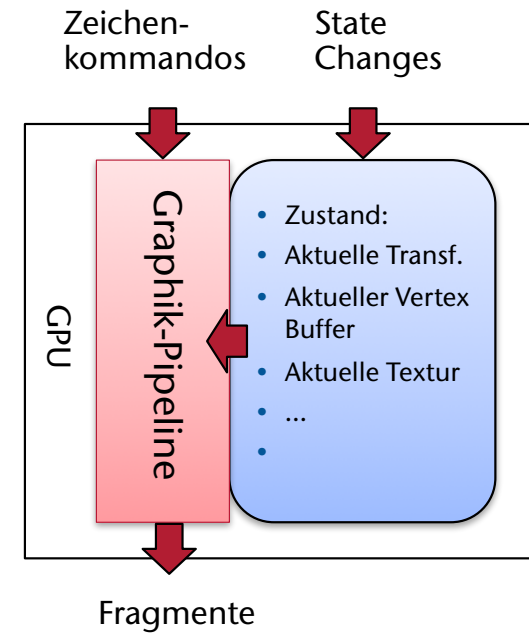
- **Vertex** = "Eckpunkt" = alle **Attribute** zur vollständigen Spezifikation eines Eckpunktes eines Primitives
 - 3D Koordinaten (zunächst in Modelling Coords!)
 - Farbe (evtl.)
 - Normale (meistens)
 - Textur-Koordinaten (u,v)
 - User-defined attributes (soviele man möchte)

Definition Fragment und Pixel

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

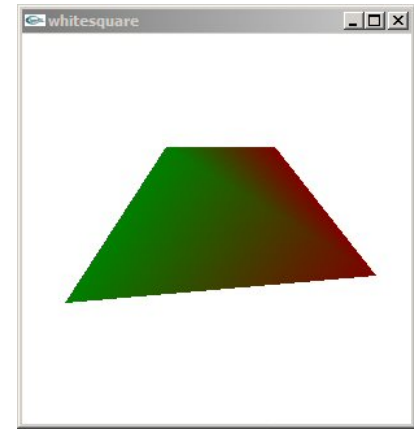
Die GPU als "State-Machine"

- Man versetzt die "Maschine" in einen Zustand, der so lange besteht, bis er wieder verändert wird
- Beispiel: kopiere Geometrie in eine Vertex-Liste (Vertex Buffer)
- Effizienter, als Daten jedes Mal neu zu übergeben



Beispiel zur Betrachtung des Datenflusses

```
glClearColor(1, 1, 1, 1);           // white background
glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);
glLoadIdentity();                   // ignore it for now
glOrtho(0, 100, 0, 100, -1, 1);     // set projection
glBegin(GL_POLYGON);                // start primitive
    glColor3f(0, 0.5, 0);           // set color of vertex
    glVertex2f(11.0, 31.0);          // send coords of vertex
    glVertex2f(37.0, 71.0);          // next vertex, same color
    glColor3f(0.5, 0, 0);           // dark red
    glVertex2f(65.0, 71.0);
    glVertex2f(91.0, 38.0);
glEnd();                             // end primitive
glFlush();                           // force completion
```



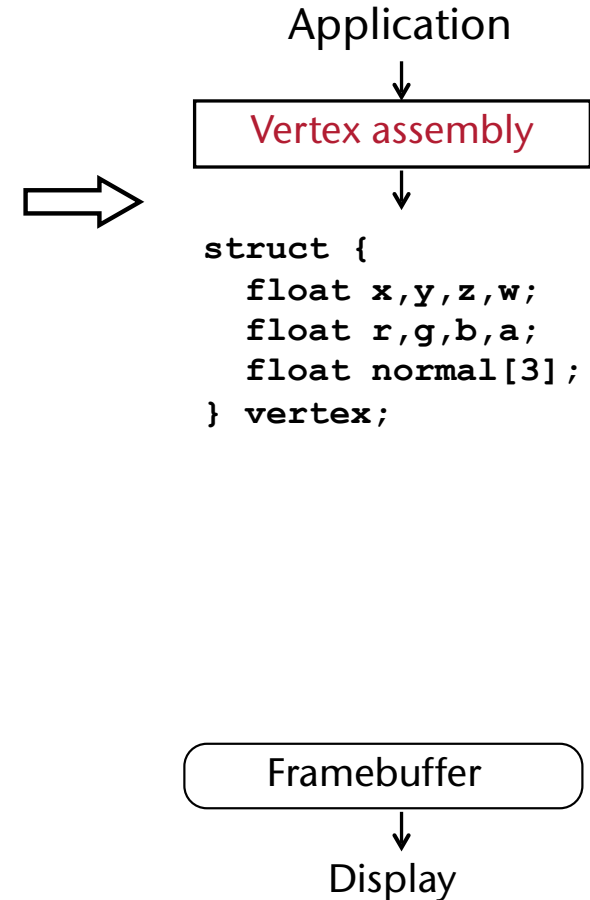
Der Einfachheit halber hier noch in der alten fixed-function, immediate mode Pipeline

The Pipeline with Regards to Data Flow

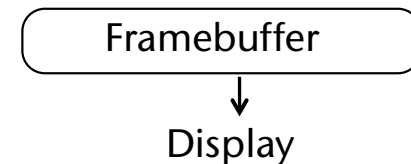
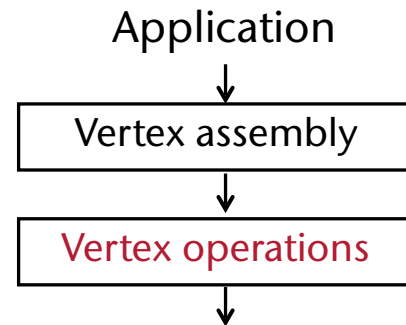
- Force input to canonical format
- Convert to internal representation
 - E.g., integer to float
- Initialize unspecified values
 - E.g., $z = 0$, $w = 1$
- Insert current modal state
 - E.g., color to $(0, 0.5, 0, 1)$
- In our example:

```
vertex v1 = {
    11, 31, 0, 1, // x,y,z,w
    0, 0.5, 0, 1 // r,g,b,a
};
```

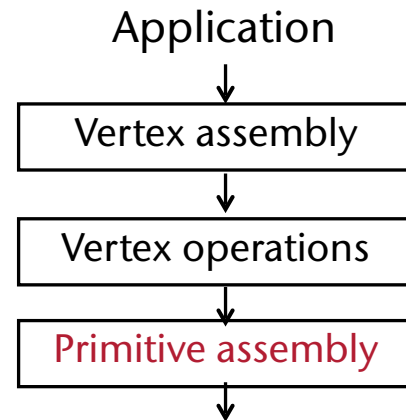
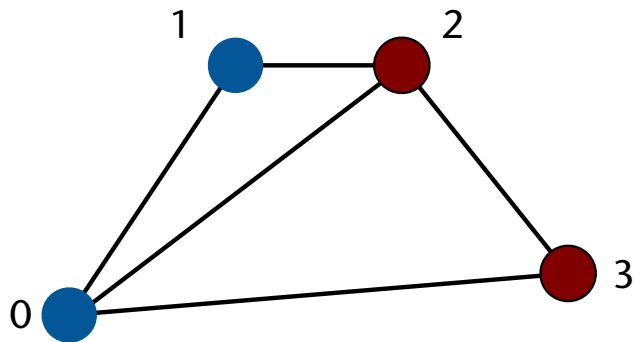
```
vertex v2 = {
    37, 71, 0, 1, // x,y,z,w
    0, 0.5, 0, 1 // r,g,b,a
};
```



- Transform coordinates
 - Mostly 4x4 matrix arithmetic
- Compute (per-vertex) lighting
- Compute texture coordinates, if procedurally defined

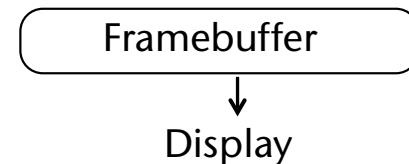


- Group vertices into primitives: points, lines, or triangles
- Old pipe: decompose polygons to triangle
 - New pipeline takes only triangles
- In our example:
 - Create two triangles out of the polygon

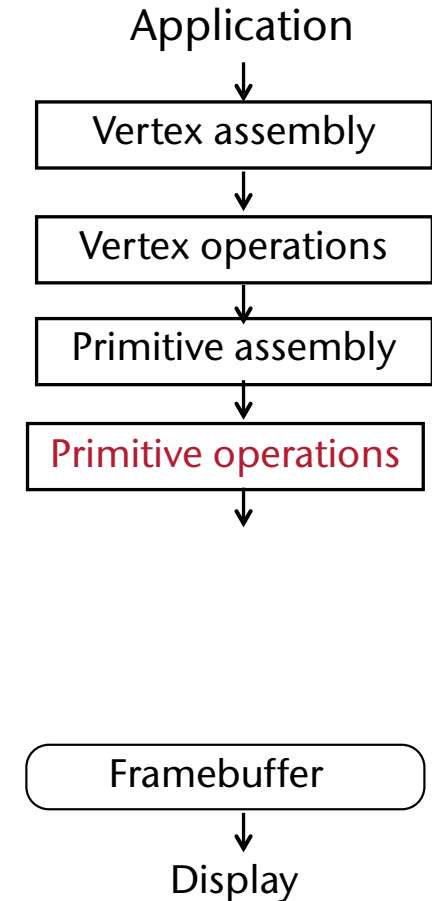


```
struct {
    vertex v0,v1;
} line;
```

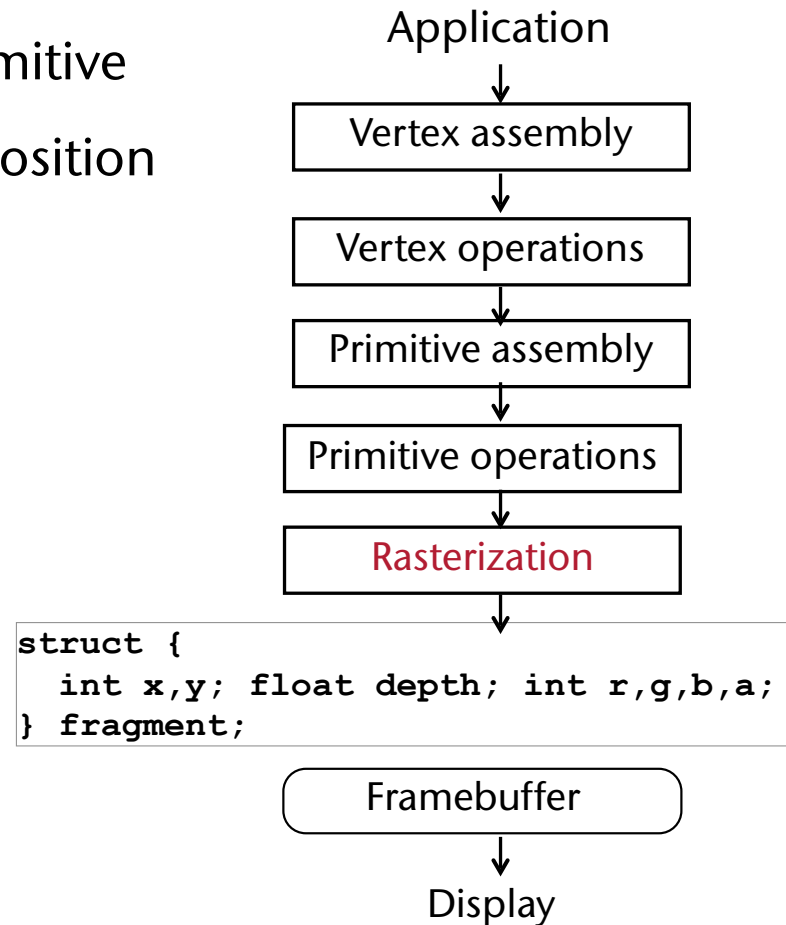
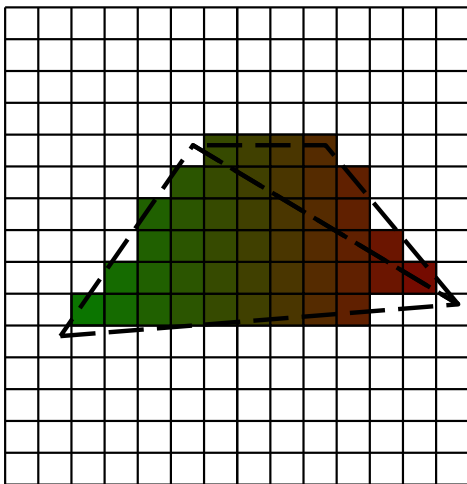
```
struct {
    vertex v0,v1,v2;
} triangle;
```



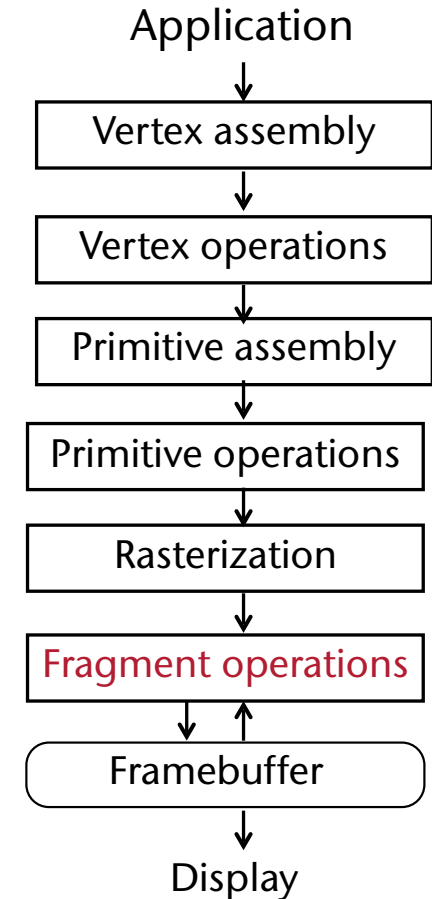
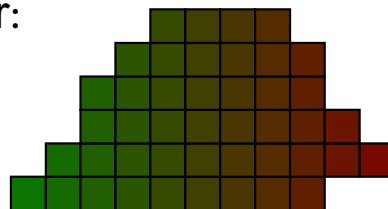
- Clip to the window boundaries
- Perform back-face / front-face operations
 - Backface culling ("Rückseiten" verwerfen)
 - Color assignment for 2-sided lighting
- In our example: nothing happens



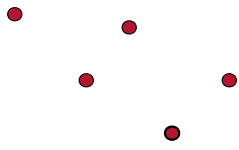
- Determine which pixels are included in the primitive
- Calculate attributes (e.g., color) at each pixel position
- Generate a fragment for each such pixel
- In our example:



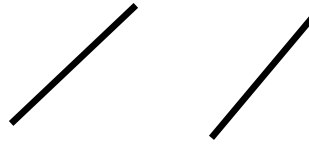
- Depth testing (aka z-buffering)
- Texture mapping
- Fog
- Scissor test
- Alpha test
- Color blending
- In our example: nothing to be done
 - Result in framebuffer:



Primitive in OpenGL



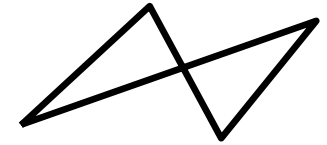
Points



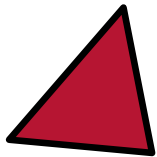
Lines



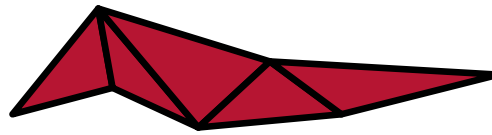
Line-Strip



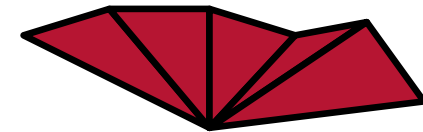
Line-Loop



Dreiecke

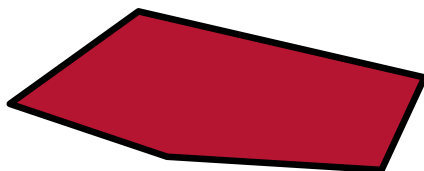


Band aus Dreiecken
(*Triangle Strip*)

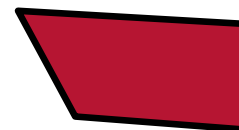


Fächer aus Dreiecken
(*Triangle Fan*)

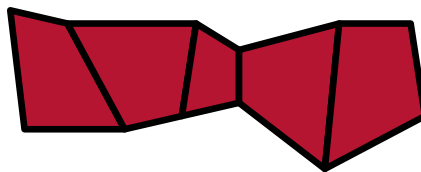
- Nicht mehr verfügbare Primitive (außer im compatibility profile):



Polygone



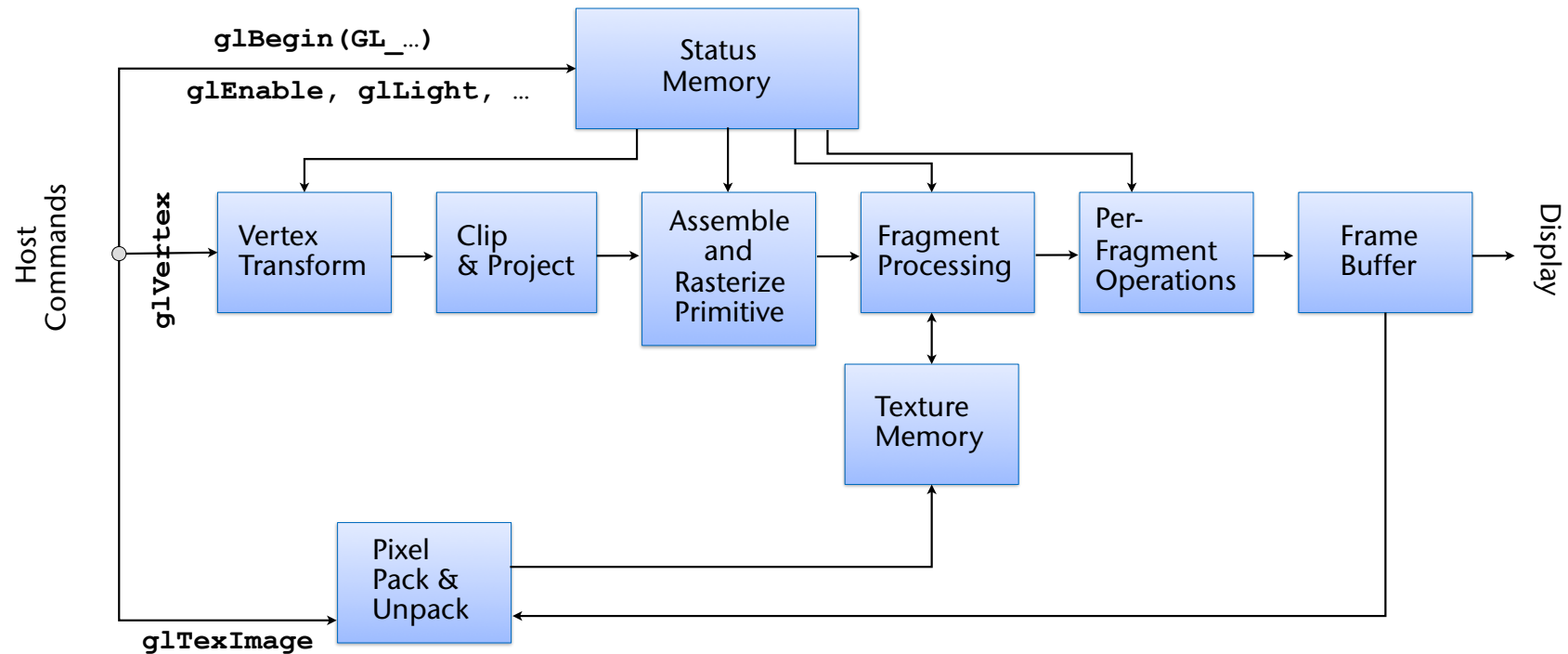
Vierecke
(*Quad* / *Quadrangle*)



Band aus Vierecken
(*Quad Strip*)

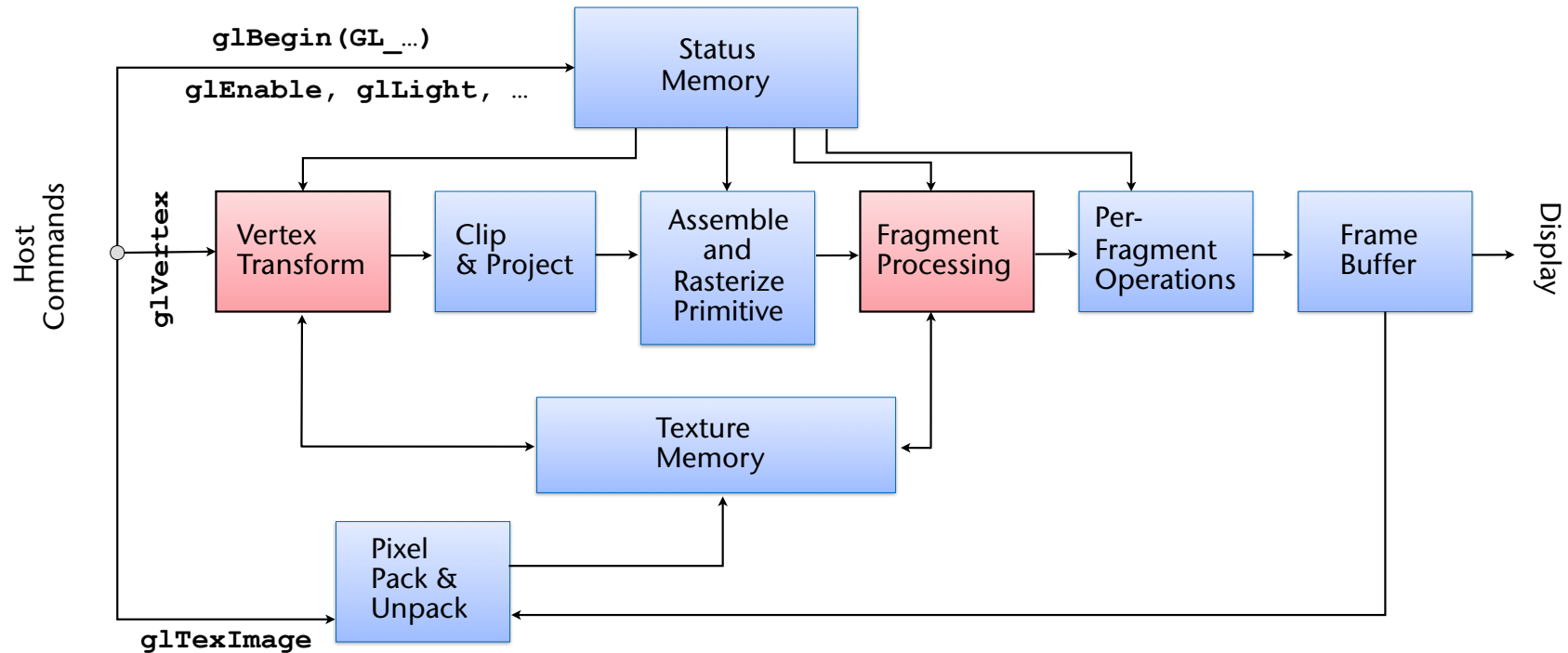
Früher: Fixed-Function Pipeline auf der GPU

- OpenGL 1: **Fixed Function Pipeline**
 - Sehr sorgfältig ausbalanciert (10 Jahre Erfahrung und Tuning)



Heute: Programmable Pipelines auf der GPU

- OpenGL 2+: programmierbare Pipeline (sog. Shaders)
 - **Vertex / Fragment Shader**: per-vertex / per-fragment Operationen
 - Texturspeicher = allgemeiner Speicher für beliebige Daten



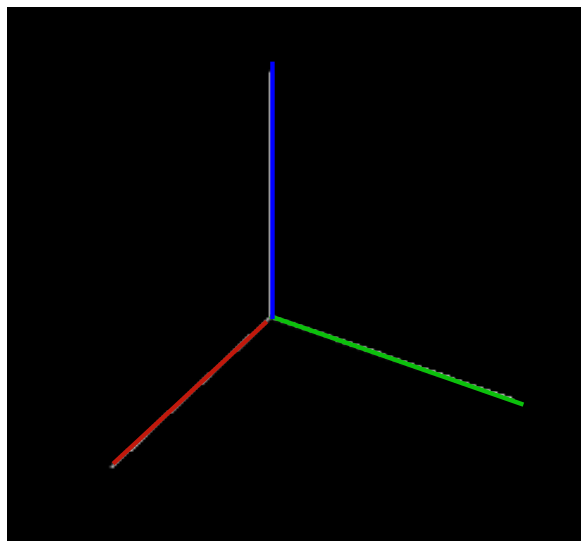
Der Immediate Mode

- **Immediate Mode** ("direkter Modus"):
 - Primitive werden sofort, wenn sie festgelegt sind, an das Display geschickt (Standard)
 - Die GPU kennt immer nur die Primitive, die aktuell durch die Pipeline laufen
- Weiteres Beispiel dafür:

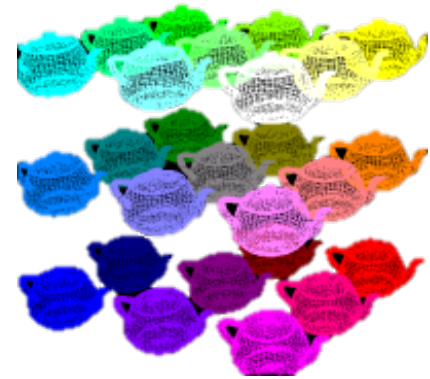
```
glBegin( GL_LINES );
    glColor3f ( 1.0, 0.0, 0.0 );
    glVertex3f( 0.0, 0.0, 0.0 );
    glVertex3f( 1.0, 0.0, 0.0 );

    glColor3f ( 0.0, 1.0, 0.0 );
    glVertex3f( 0.0, 0.0, 0.0 );
    glVertex3f( 0.0, 1.0, 0.0 );

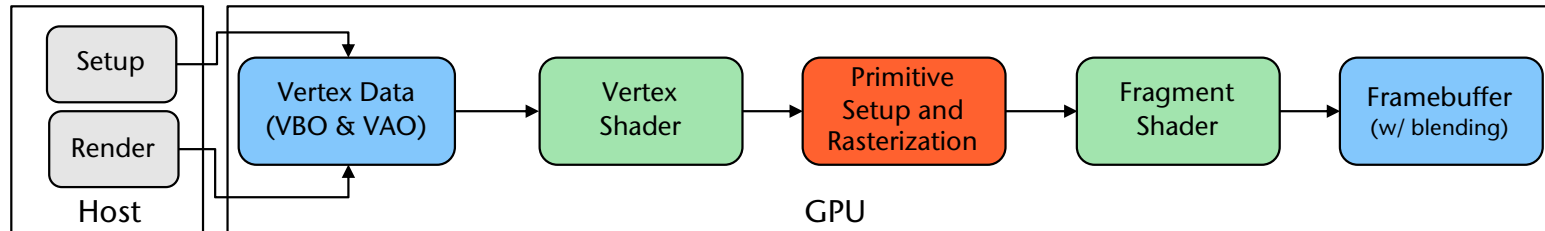
    glColor3f ( 0.0, 0.0, 1.0 );
    glVertex3f( 0.0, 0.0, 0.0 );
    glVertex3f( 0.0, 0.0, 1.0 );
glEnd();
```



Der Retained Mode



- **Retained Mode** ("zurückhaltender Modus"):
 - Primitive werden in sog. **Buffer Objects** gespeichert
 - Vertex Buffer Objects = VBO, Vertex Array Objects = VAO
 - VBO's können auf der GPU (Graphikkarte) gehalten werden → Performance
 - Füttern der Pipeline:



- Kann mehrmals mit unterschiedlichen Eigenschaften gerendert werden
- GPU erhält noch weitere Möglichkeiten zur Optimierung

- Weitere Features in OpenGL 3:
 - Kontext-Profile:
 - Core: keine Fixed-Function-Pipeline, nur Dreiecke, keine Quads / Polygone, ...
 - Compatibility: rückwärts-kompatibel bis OpenGL 1.0
 - Weitere Shader (Geometry Shader, erst in CG2)
- In OpenGL 4:
 - Noch mehr Shader (Tessellation Shader, Compute Shader)

Der Vertex Shader

- Berechnung der Position im World Space für jeden(!) Vertex (ggf. weitere Berechnungen)
- **out**-Variablen stellen die Verbindung zum Fragment Shader her
 - **gl_Position** ist eine vordefinierte out-Variable, *muss* gesetzt werden

- Beispiel:

```
#version 330          // OpenGL 3.3 oder höher

uniform mat4 matrix; // Transformationsmatrix

in vec3 vPosition;   // Position des Vertex
in vec3 vColor;      // Farbe des Vertex

out vec3 fColor;     // ausgehende Farbe des V.

void main()
{
    fColor = vColor;
    gl_Position = matrix * vec4(vPosition, 1.0);
}
```

Schnittstelle zur Host-Seite

Uniforms:

matrix

Attributes:

vPosition

vColor

Der Fragment Shader

- Berechnet letzten Endes die Farbe für jedes ausgegebene Fragment
- Beispiel:

```
#version 330                                // OpenGL 3.3 or higher

uniform float alpha;

// vom Vertex Shader / Rasterizer
in vec3 fColor;

// einzige Ausgabe: die Farbe des Fragments
out vec4 color;

void main()
{
    color = vec4( fColor, alpha );
}
```

**Schnittstelle
zur Host-Seite**

Uniforms:

alpha

Das Shader-Programm

- Shader-Programm = Vertex-Shader + Fragment-Shader (compiled & linked)

Vertex Shader
Uniforms
matrix
Attributes
vPosition
vColor



Fragment Shader
Uniforms
alpha



Shader Programm	
ID: Uniform	ID: Attribute
0: matrix	0: vPosition
1: alpha	1: vColor

- Zugriff auf die Shader-Variablen:

```
// ID's / Handles zu den jeweiligen Variablen/Attributen
GLint matrixUni = glGetUniformLocation(shprog, "matrix");      // 0
GLint alphaUni  = glGetUniformLocation(shprog, "alpha");      // 1
GLint vPositionAttr = glGetAttribLocation(shprog, "vPosition"); // 0
GLint vColorAttr  = glGetAttribLocation(shprog, "vColor");     // 1
GLint error = glGetAttribLocation(shprog, "unknown");          // -1
```

- Achtung:
 - Vertex-Attribute können vom Host nur dem Vertex Shader übergeben werden

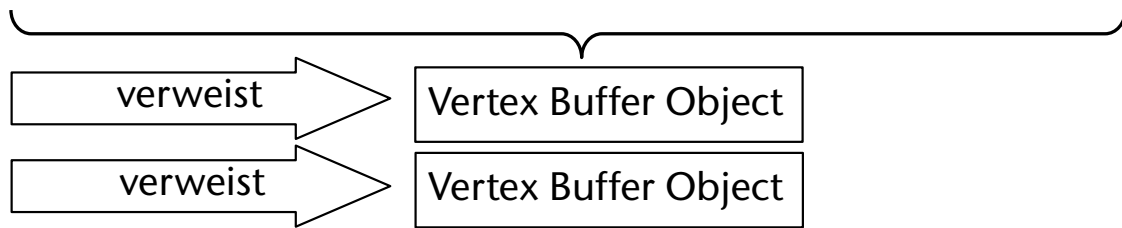
Prinzipielle Vorgehensweise des Renderns (CPU)

1. Shader kompilieren und zu Shader-Programm linken
2. IDs der Attribute und Uniforms aus dem Shaderprogramm auslesen
3. Buffer erzeugen
 - Vertex Buffer Object (VBO): für Vertex-Attribute (Position, Farbe, Normale, Textur, ...)
 - Layout der Buffer bekannt geben: welches Attribut steht an welcher Stelle im Array → "Verbindung" zwischen Attributen und Shader-Variablen (IDs)
 - Vertex Array Object (VAO) erzeugen: verweist auf die VBO's
4. Buffer mit Daten füllen
5. Konkrete Werte an die Uniforms zuweisen
6. Buffer Object rendern (mit aktivem Shader-Programm & VAO)
 - Während eines Frames können Shader, VAOs, VBOs, Uniforms geändert werden

Generieren der Buffers

Vertex Array Object
Attributes
0:
1:
...

```
// generate vertex buffer object on the GPU
glGenBuffers( 1, &m_vertices_buffer );
// set it as the active VBO (think "state")
glBindBuffer( GL_ARRAY_BUFFER, m_vertices_buffer );
// copy actual vertex coords into the VBO
glBufferData( GL_ARRAY_BUFFER, sizeof(vertices),
              (void*)vertices, GL_STATIC_DRAW );
```

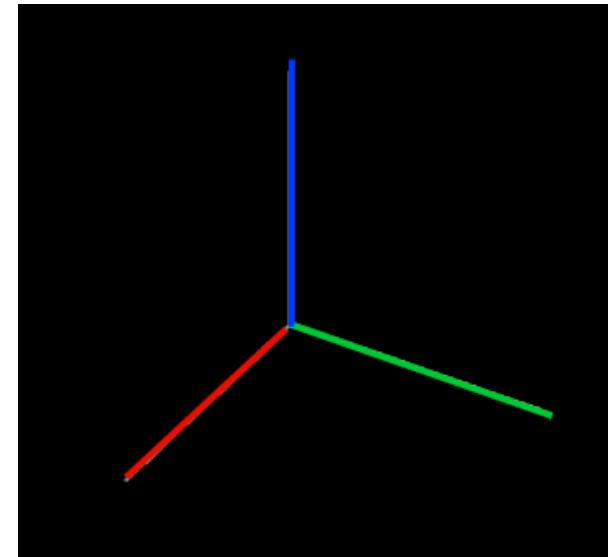


```
GLuint my_obj; // Handle auf neues VAO
glGenVertexArrays( 1, & my_obj ); // erstelle 1 Vertex Array Object
glBindVertexArray( my_obj ); // setze my_obj als aktives VAO
```

Achtung: für alle Code-Beispiele im Folgenden nehmen wir an,
dass `glBindVertexArray(my_obj)` noch aktiv ist!

Beispiel (mit einem VBO pro Attribut)

```
// Vertex positions (XYZ)
float * position = {
    0.0, 0.0, 0.0, // Ursprung
    1.0, 0.0, 0.0, // x-Achse
    0.0, 0.0, 0.0, // Ursprung
    0.0, 1.0, 0.0, // y-Achse
    0.0, 0.0, 0.0, // Ursprung
    0.0, 0.0, 1.0}; // z-Achse
// Vertex colors (RGB)
float * color = {
    1.0, 0.0, 0.0, // rot
    1.0, 0.0, 0.0,
    0.0, 1.0, 0.0, // grün
    0.0, 1.0, 0.0,
    0.0, 0.0, 1.0, // blau
    0.0, 0.0, 1.0};
```



```
glGenBuffer( 1, &position_buffer ); // create(empty) VBO
glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, position_buffer); // use it
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, sizeof(position), position, GL_STATIC_DRAW);
.....
glGenBuffer( 1, &color_buffer ); // again for colors
glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, color_buffer);
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, sizeof(color), color, GL_STATIC_DRAW);
.....
```

Verbindung zwischen VBO und Shader-Variablen herstellen

Shader Programm

ID: Sh.-Var.

0: vPosition

1: vColor

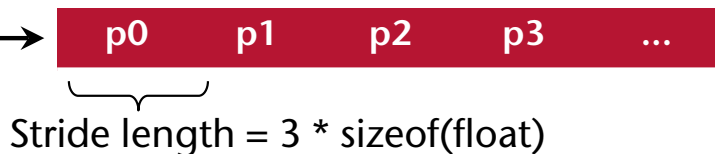
Vertex Array Obj

Attrib. ID : VBO

0: position_buffer

1:

```
glBindBuffer( GL_ARRAY_BUFFER, position_buffer );
glBufferData( ... );
glEnableVertexAttribArray( vPositionAttr ); // s.S. 34
glVertexAttribPointer(
    vPositionAttr,    // ID of variable in shader prog
    3,                // # floats per attrib.
    GL_FLOAT,         // Type
    GL_FALSE,         // Normalized?
    3*sizeof(float),  // Stride length
    0                  // Offset in VBO (in bytes)
);
...
```

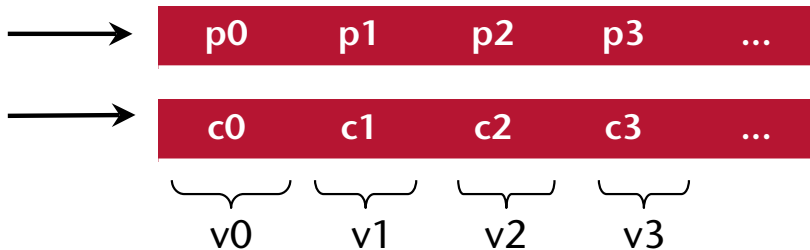


Verbindung zwischen VBO und Shader-Variablen herstellen

Shader Programm	
ID: Sh.-Var.	
0:	vPosition
1:	vColor

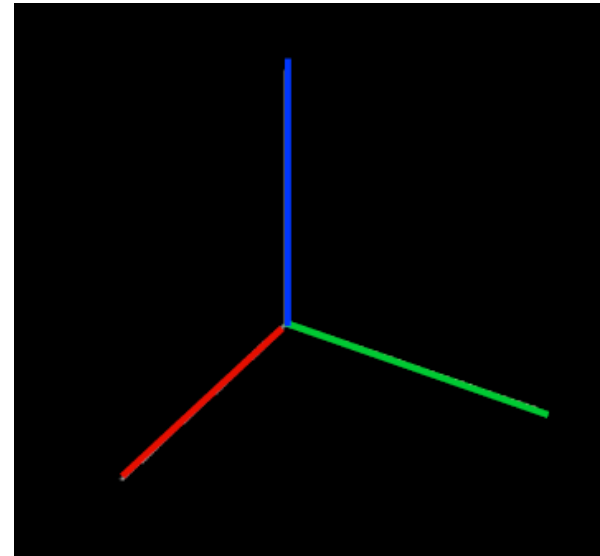
Vertex Array Obj	
Attrib. ID : VBO	
0:	position_buffer
1:	color_buffer

```
glBindBuffer( GL_ARRAY_BUFFER, color_buffer );
glBufferData( ... );
glEnableVertexAttribArray( vColorAttr ); // s.S. 34
glVertexAttribPointer(
    vColorAttr,           // ID of variable in shader prog
    3,                    // # floats per attrib.
    GL_FLOAT,             // Type
    GL_FALSE,             // Normalized?
    sizeof(float[3]),     // Stride length
    0                      // Offset in VBO (in bytes)
);
...
```



Rendering (at Runtime)

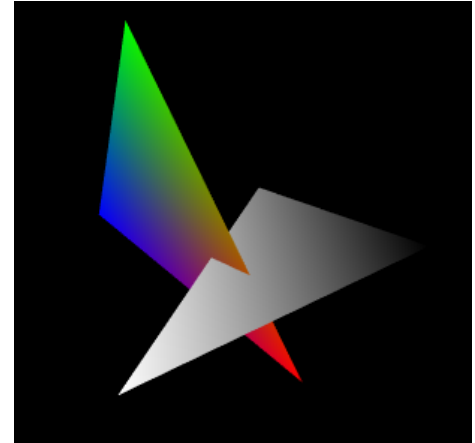
```
glDrawArrays(  
    GL_LINES, // render mode  
    0,        // offset in bytes  
    3 * 2     // # vertices  
);
```



Beispiel mit interleaved Vertex Layout (nur *ein* VBO)

```
struct VertexData
{
    float position[3];
    float color[3];
};

// Vertex Positionen (XYZ, RGB)
VertexData * vertices =
{
    {{0.4, -0.2, 0.2}, {1.0, 0.0, 0.0}}, // v0, rot
    {{-0.1, 0.8, 0.3}, {0.0, 1.0, 0.0}}, // v1, grün
    {{-0.2, 0.3, 0.1}, {0.0, 0.0, 1.0}}, // v2, blau
    {{-0.1, -0.2, 0.5}, {1.0, 1.0, 1.0}}, // v3, weiß
    {{0.8, 0.2, 0.1}, {0.0, 0.0, 0.0}}, // v4, schwarz
    {{0.3, 0.4, 0.0}, {0.5, 0.5, 0.5}} // v5, grau
};
```

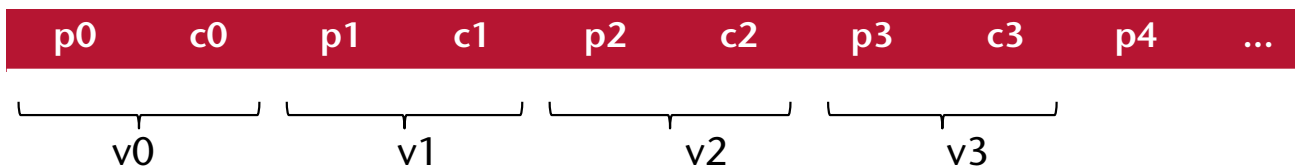


VBO erzeugen und füllen

```
VertexData * vertices =
{
    {{0.4, -0.2, 0.2}, {1.0, 0.0, 0.0}},
    {{-0.1, 0.8, 0.3}, {0.0, 1.0, 0.0}},
    [...]
};
```

```
struct VertexData
{
    float position[3];
    float color[3];
};
```

(Erinnerung)



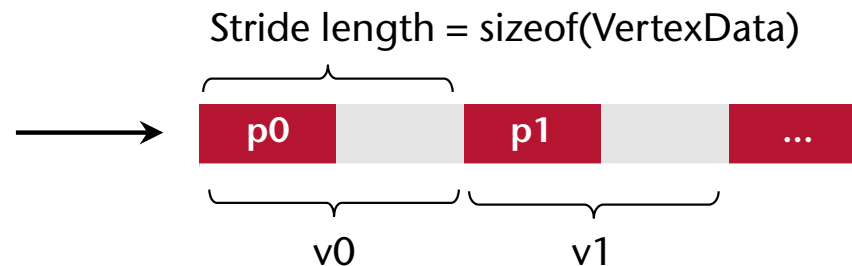
```
glGenBuffer( 1, &vertices_buffer );
glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, vertices_buffer );
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, sizeof(vertices), vertices, GL_STATIC_DRAW);
```

Verbindungen herstellen

Shader Program	
ID: Sh.-Var.	
0:	vPosition
1:	vColor

Vertex Array Obj	
Attrib. ID : VBO	
0:	vertices_buffer
1:	

```
glEnableVertexAttribArray( vPositionAttr );
glVertexAttribPointer(
    vPositionAttr,
    3,                // # floats per attrib.
    GL_FLOAT,         // Type
    GL_FALSE,         // Normalized?
    sizeof(VertexData), // Stride length
    0                 // Offset in the VBO
);
```

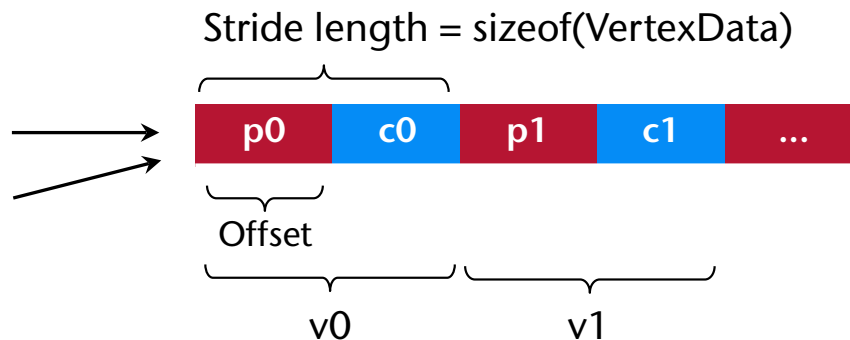


Verbindungen herstellen

Shader Program
ID: Sh.-Var.
0: vPosition
1: vColor

Vertex Array Obj
Attrib. ID : VBO
0: vertices_buffer
1: vertices_buffer

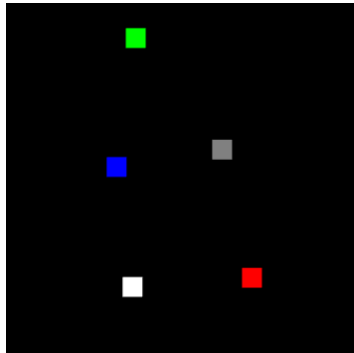
```
glEnableVertexAttribArray( vColorAttr );
glVertexAttribPointer(
    vColorAttr,
    3,                // # floats per attrib.
    GL_FLOAT,         // Type
    GL_FALSE,         // Normalized?
    sizeof(VertexData), // Stride length
    3*sizeof(float)    // Offset in the VBO
);
```



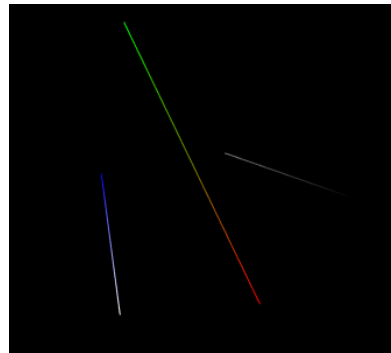
Rendering

```
glDrawArrays( prim_type, 0, 3*2 );
```

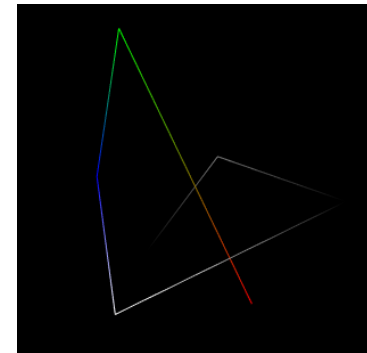
(Type des Primitivs kann zur Laufzeit festgelegt werden)



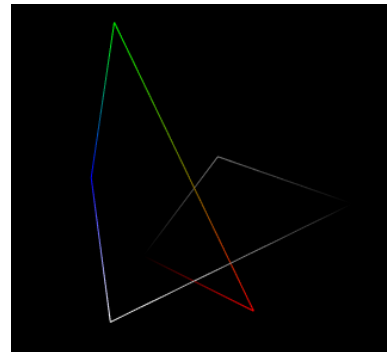
GL_POINTS



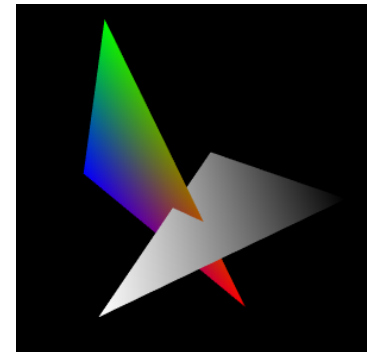
GL_LINES



GL_LINE_STRIP



GL_LINE_LOOP



GL_TRIANGLES

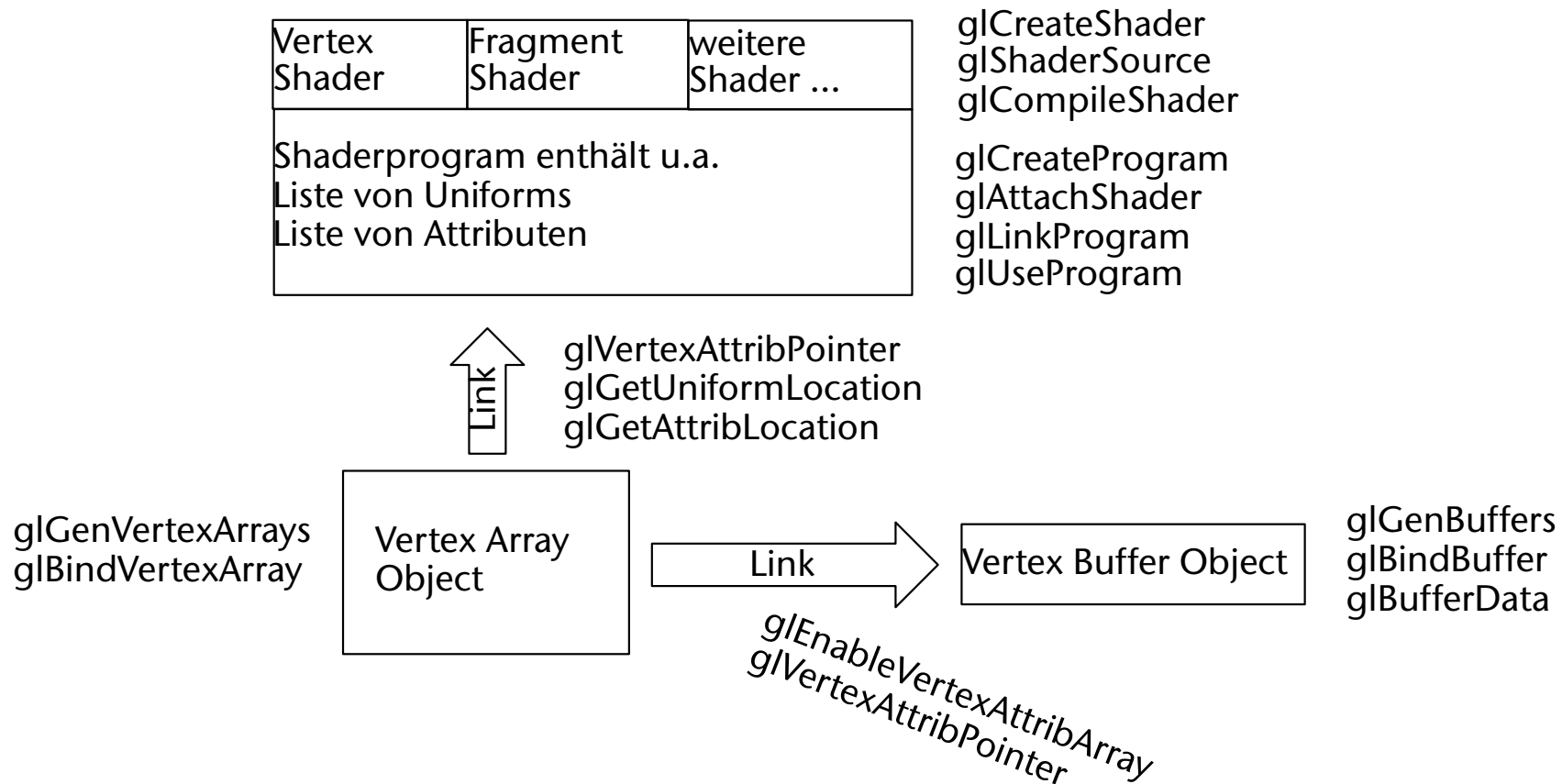
Bemerkung

- Manchmal könnte es praktisch sein, eine eigene "VAO-Klasse" zu schreiben, die ein Interface ähnlich zum *immediate mode* hat:

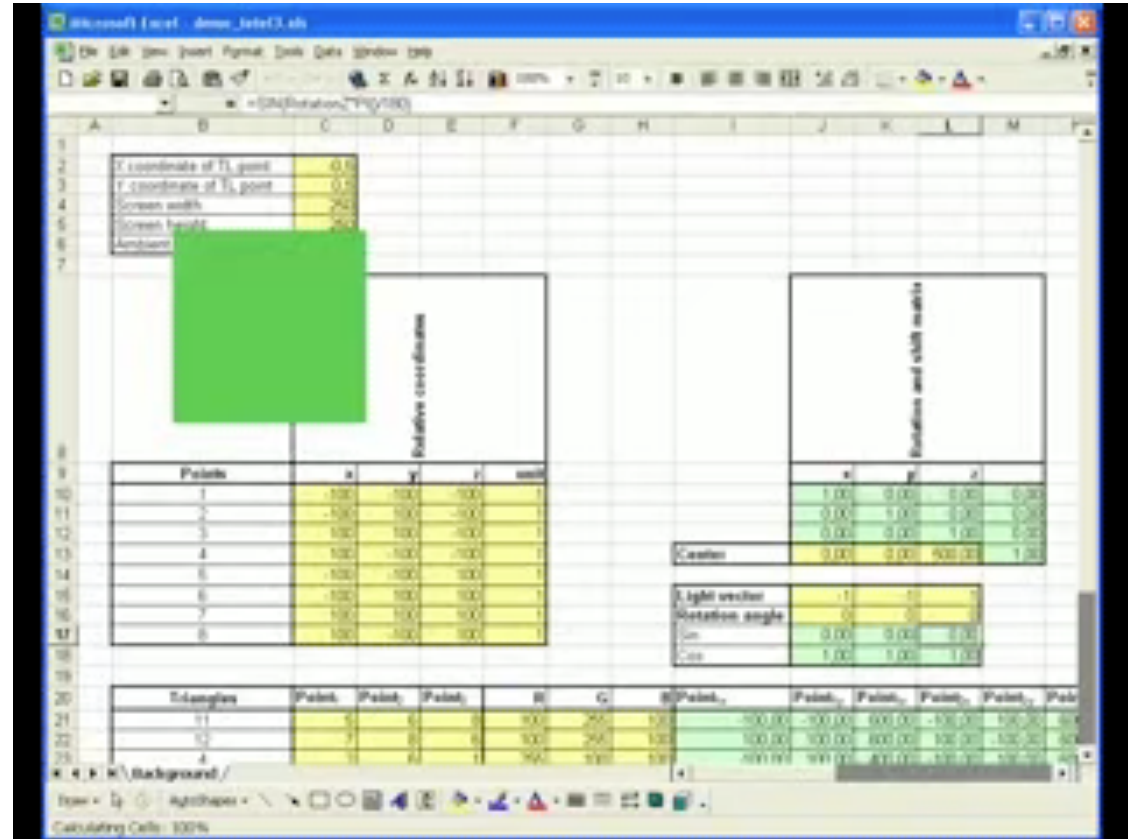
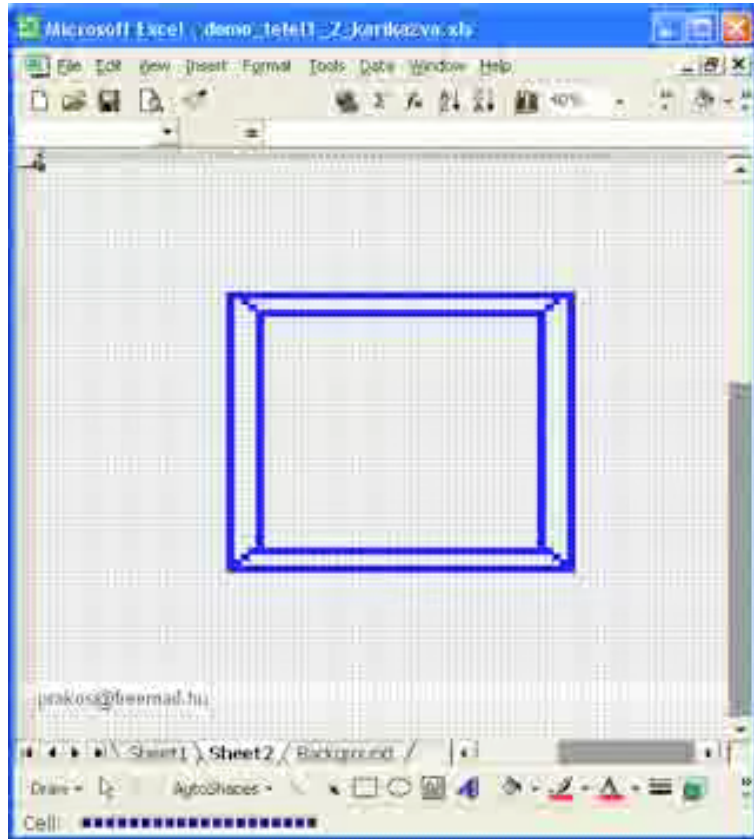
```
// Initialisierung
VertexArrayObject vao = new VertexArrayObject( num_vertices );
vao->begin( GL_TRIANGLES );
vao->addVertex( 0.0, 0.0, 0.0 );
vao->addVertex( 0.5, 0.75, 0.0 );
vao->addVertex( -0.5, -0.25, 0.0 );
...
vao->end();

// display
vao->draw();
```

OpenGL Cheat Sheet zu VAO's & VBO's

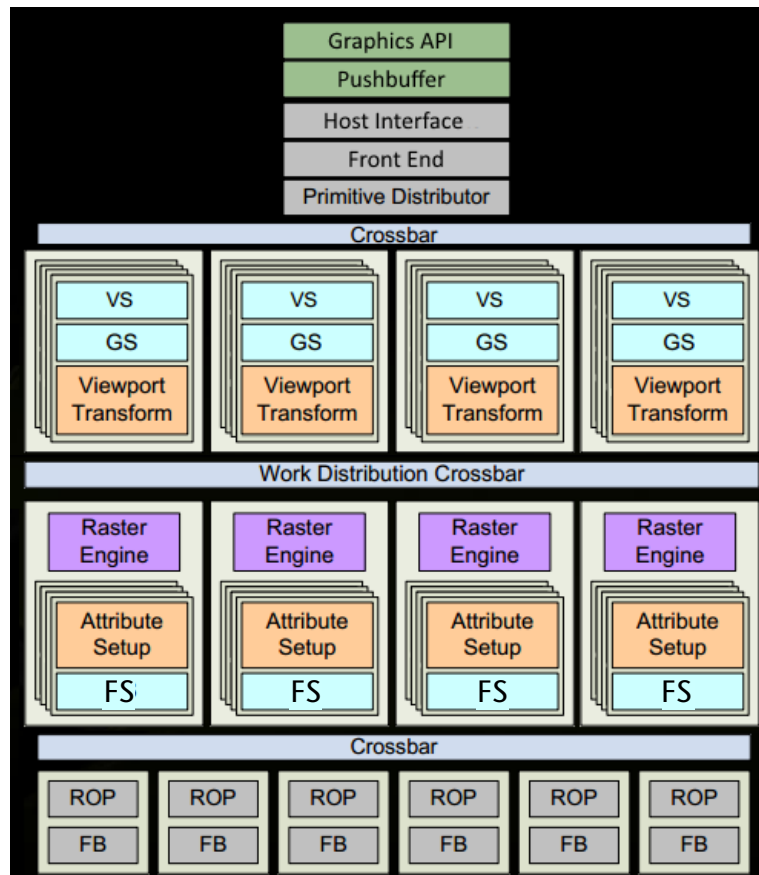
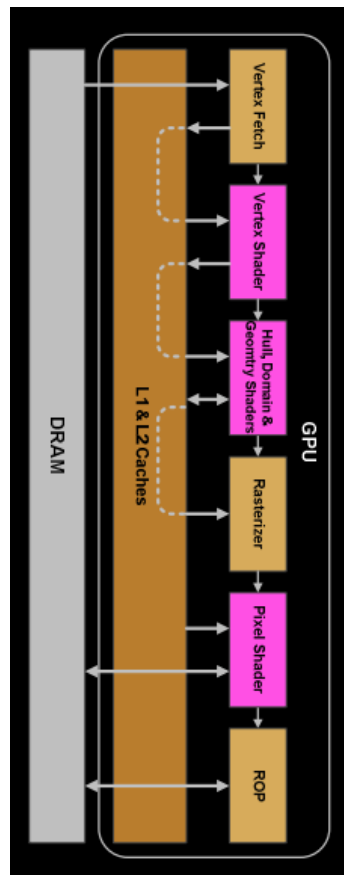


Microsoft Excel: Revolutionary 3D Game Engine? 😊

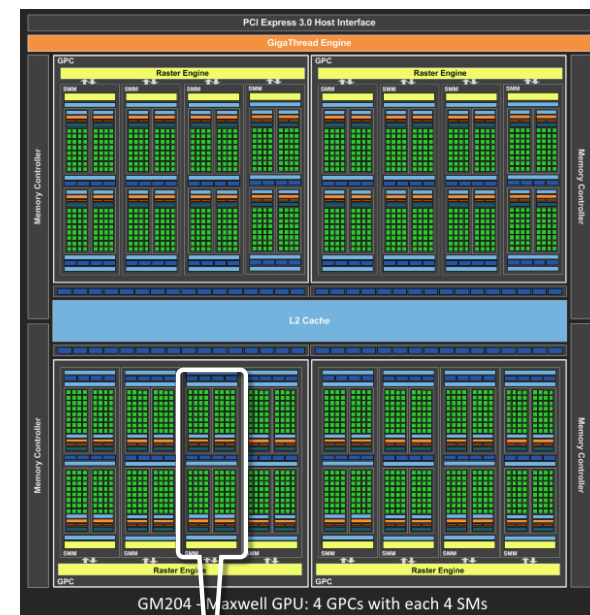


http://cgvr.cs.uni-bremen.de/teaching/cg_literatur/excel_3d_engine/

A Hardware View of the Pipeline

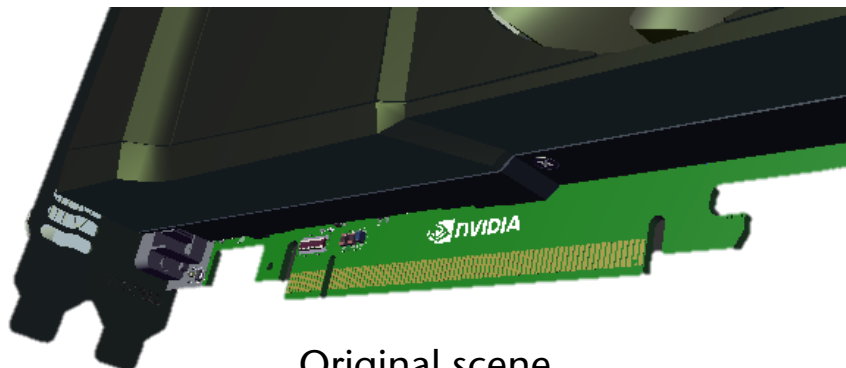


GPU Architecture

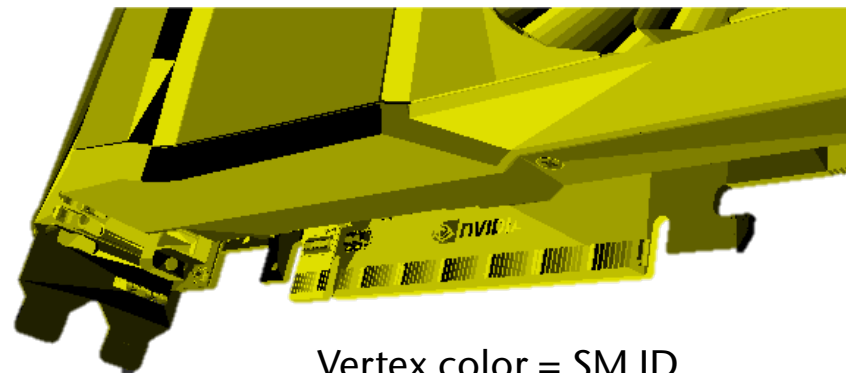


Streaming Multiprocessor (SM)

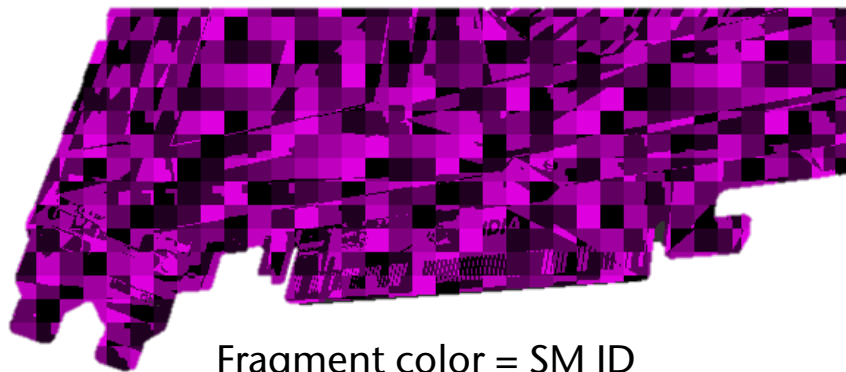
How the GPU Distributes Work



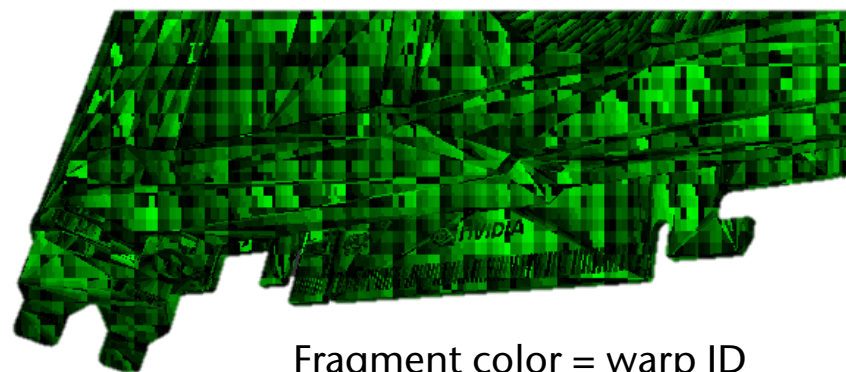
Original scene



Vertex color = SM ID



Fragment color = SM ID



Fragment color = warp ID

Christoph Kubisch: Life of a triangle