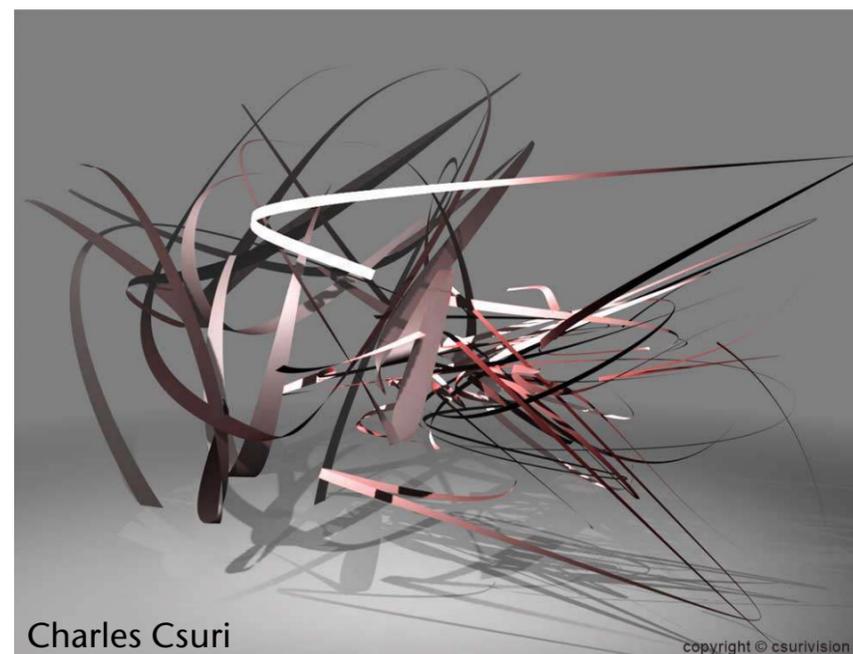




# Computer-Graphik 1

## Visibility Computations – Hidden Surfaces, Frame Buffers, and Shadows

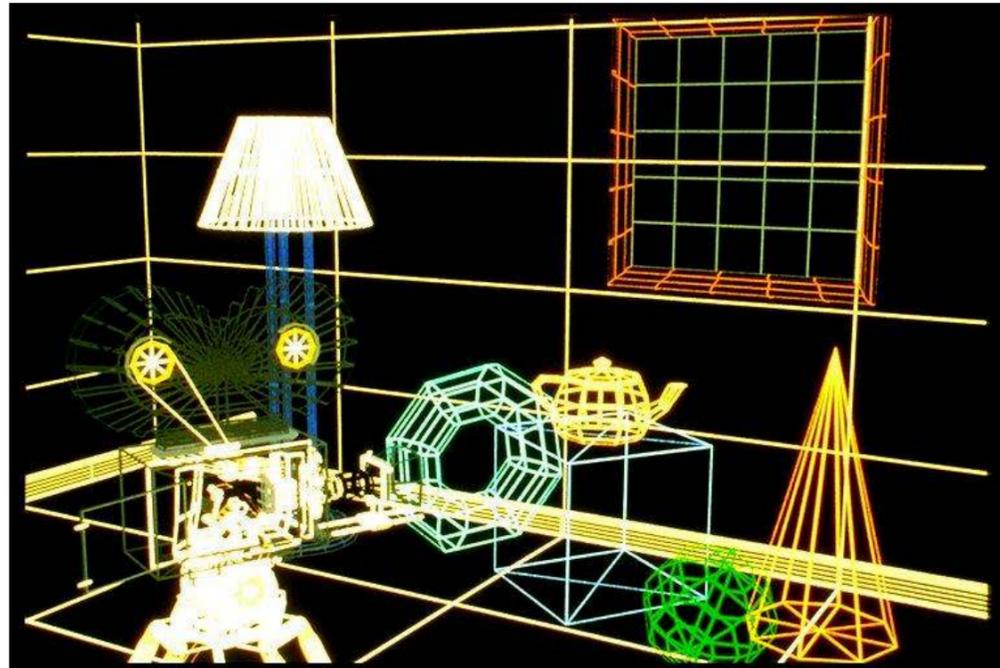


G. Zachmann  
University of Bremen, Germany  
[cgvr.cs.uni-bremen.de](http://cgvr.cs.uni-bremen.de)

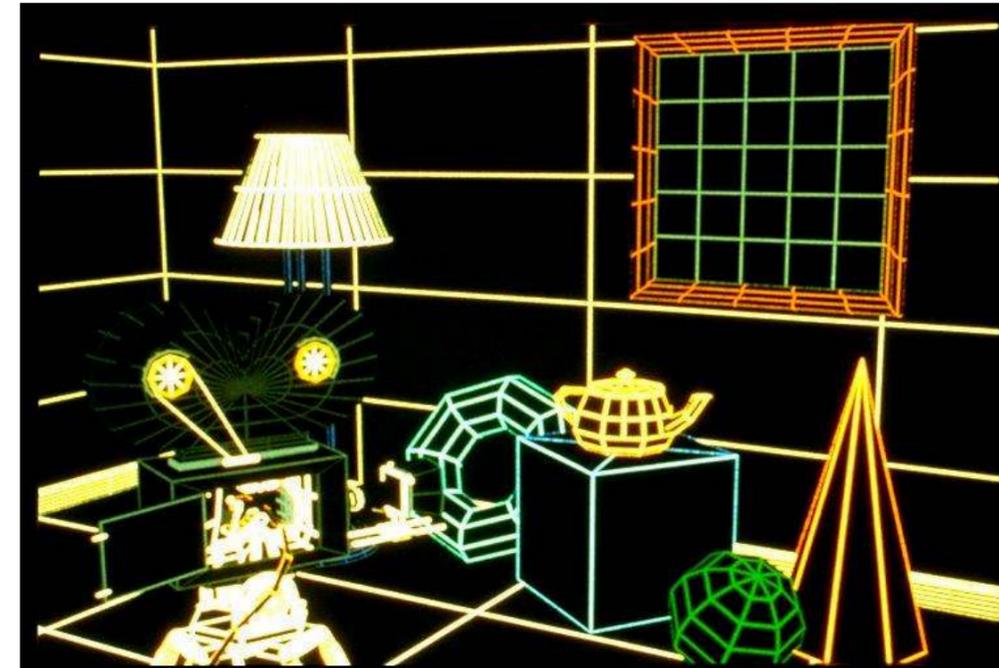


- **Verdeckung (occlusion)** entsteht, wenn mehrere Objekte bei der Projektion von 3D nach 2D (teilweise) die gleichen Bildschirmkoordinaten aufweisen
- Sichtbar ist das dem Auge am *nächsten* liegende Objekt
- Falls dieses Obj (halb-)durchsichtig ("transparent") ist → dahinter liegende Objekte sind auch (teilweise) sichtbar

Wireframe-  
Rendering *ohne*  
Verdeckungs-  
berechnung



Wireframe-  
Rendering *mit*  
Verdeckungs-  
berechnung



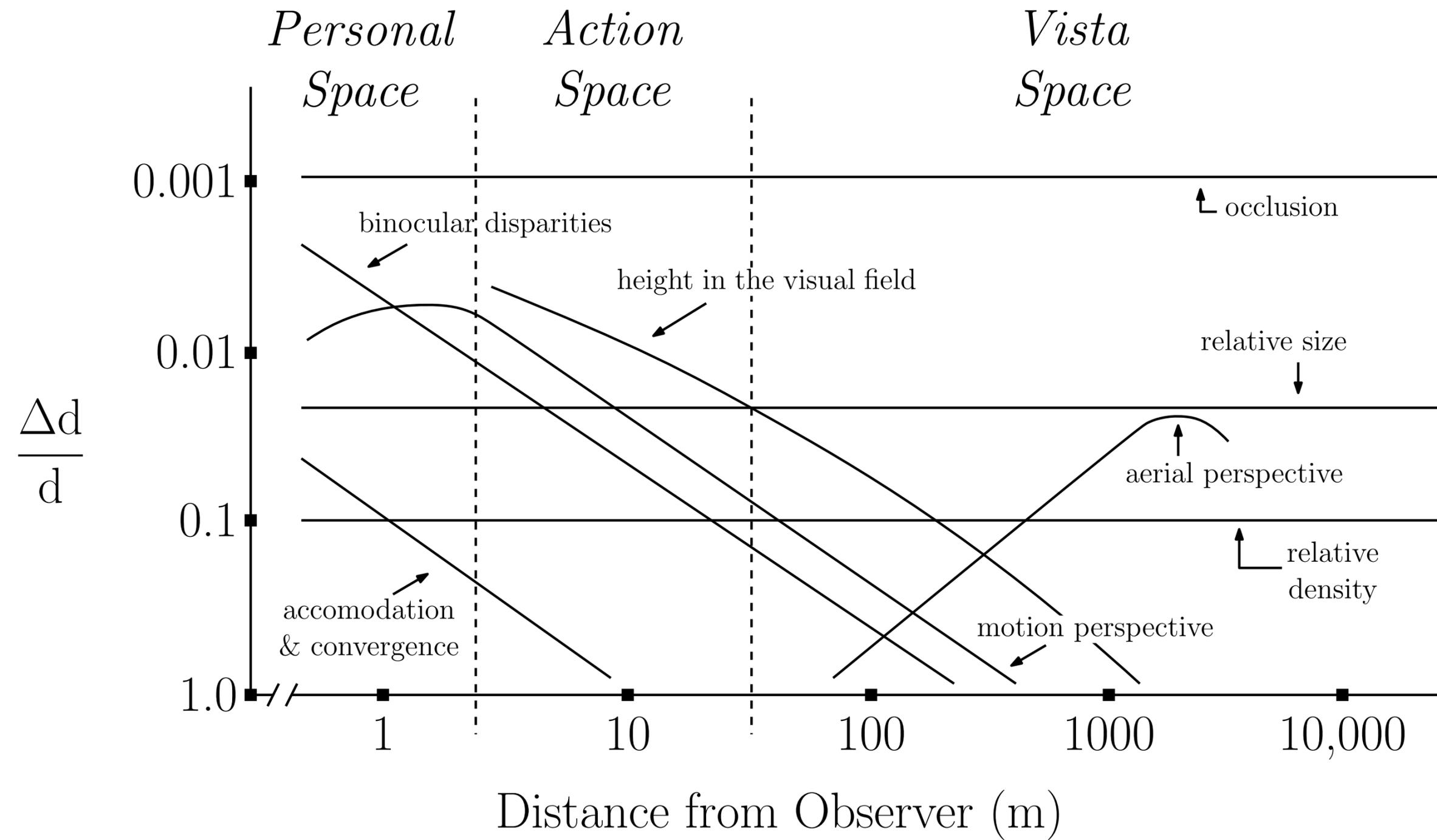
Pixar "Shutterbug"

- Verdeckung ist ein extrem wichtiger (der wichtigste?) *Depth Cue*:



# Just-Noticeable Depth Thresholds

(Just FYI)

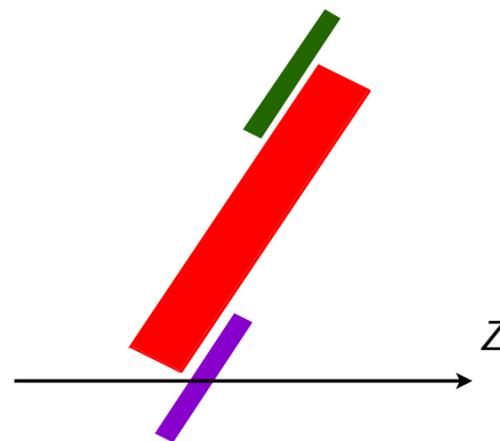
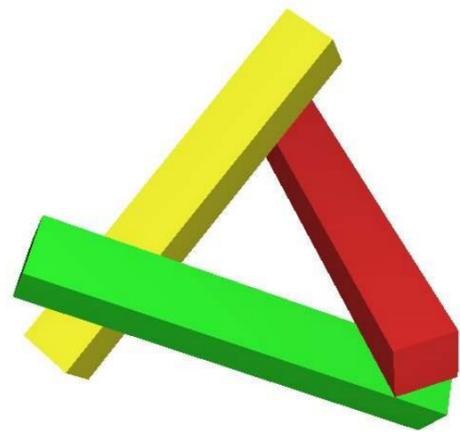
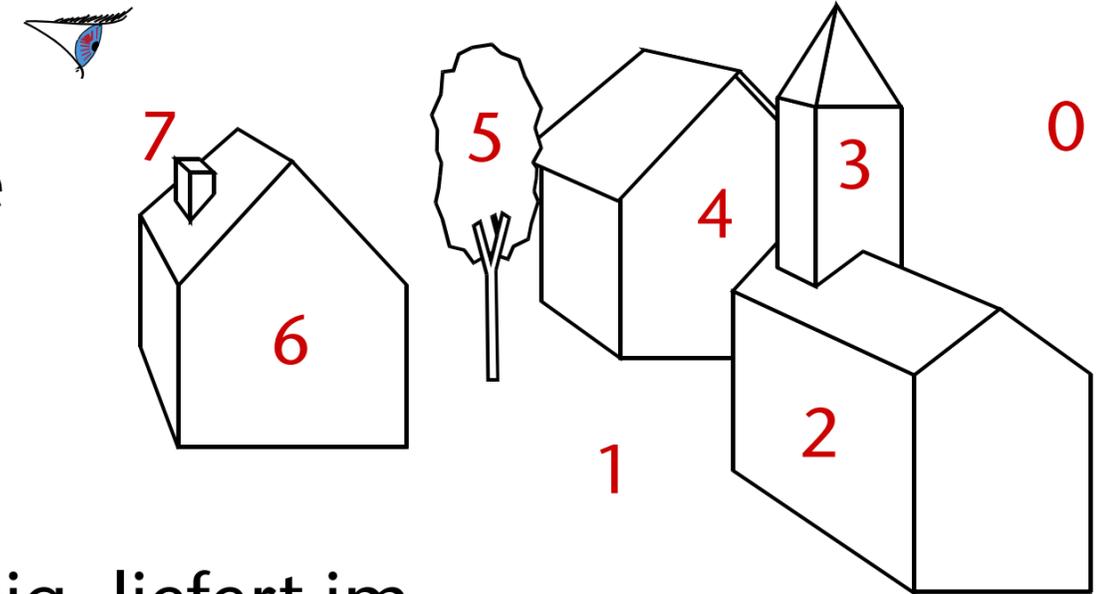


# Unterscheidung zweier wichtiger Kategorien

- Es gibt 2 große Problemklassen innerhalb des Bereichs "Visibility Computations"
  1. Verdeckungsrechnung: welche "Pixel" eines Polygons werden von anderen verdeckt?
    - Bezeichnungen: *Hidden Surface Elimination* (früher auch *Hidden Line Elimination*), *Visible Surface Determination*
  2. Culling: welche Polygone / Objekte *können* gar nicht sichtbar sein? (z.B., weil sie sich hinter dem Viewpoint befinden → *view frustum culling*; oder z.B., weil sie von einem anderen Objekt komplett verdeckt werden → *occlusion culling*)  
→ s. "Advanced Computer Graphics"
- Achtung: die Grenzen sind fließend
  - Tendentieller Unterschied: bei HSE geht es eher darum, überhaupt ein **korrektes Bild** zu rendern, bei Culling geht es eher um eine **Beschleunigung** des Renderings großer Szenen

# Die einfachste Idee: Painter's Algorithm

- Idee: Zeichne das Bild wie ein Maler
  - Zuerst Hintergrund, dann Objekte von hinten nach vorne
- Probleme:
  - Sortierung nicht trivial, manchmal unmöglich
  - Zerlegung in Teilpolygone teuer, Viewpoint-abhängig, liefert im worst-case  $O(n^2)$  viele Teile  $\rightarrow$  Rendering ist nicht mehr linear in der Anzahl Polygone!

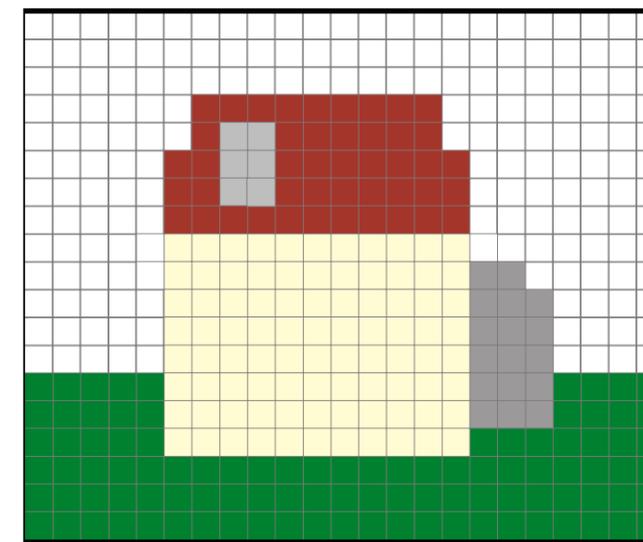
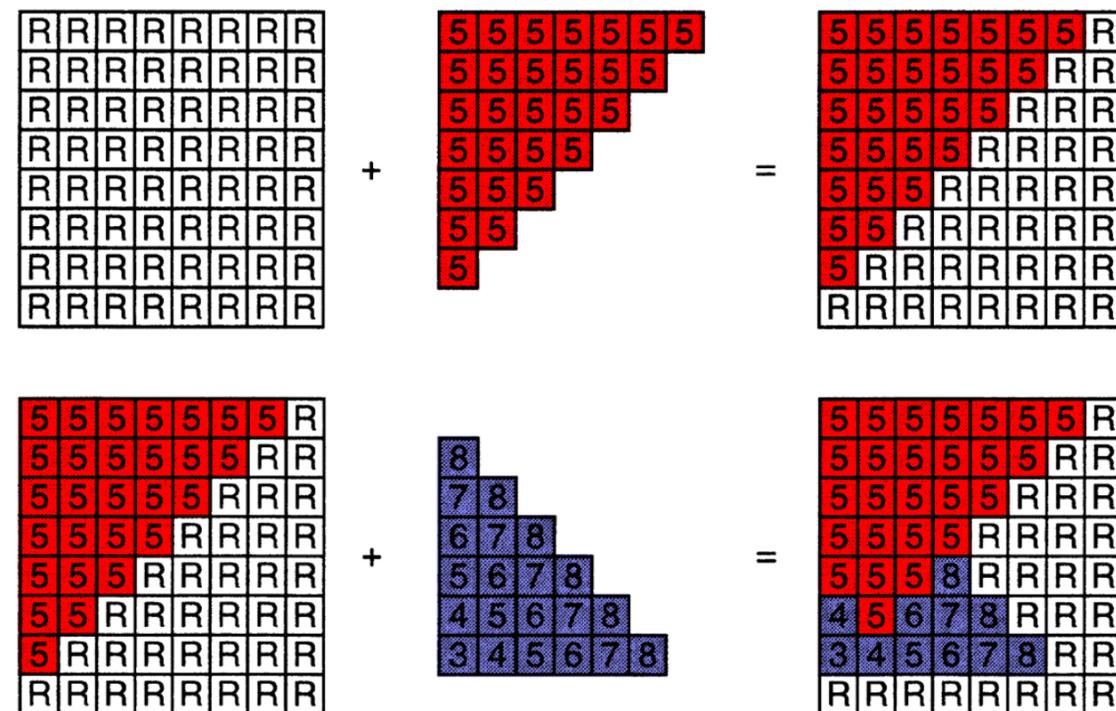
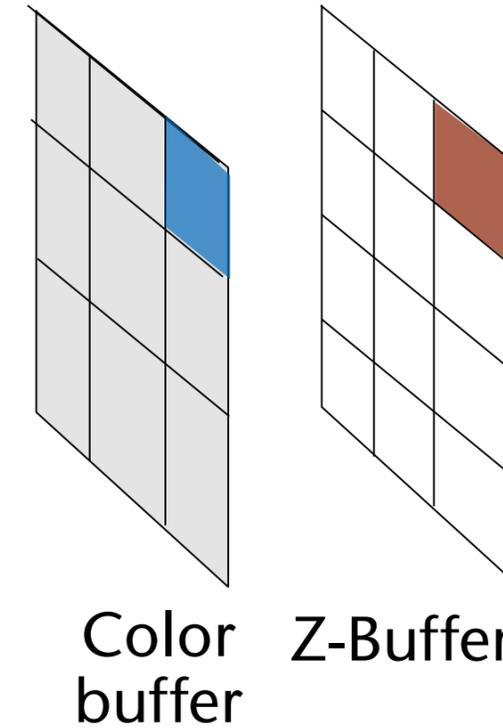


# Die Standard-Lösung heute: der Z-Buffer

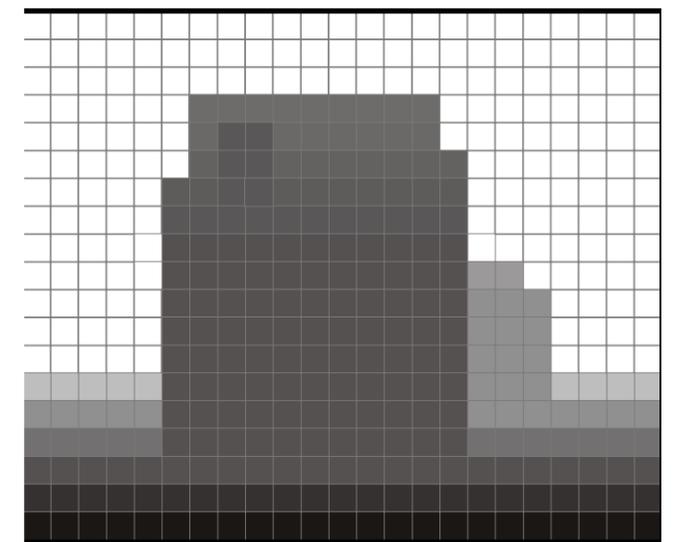


Wolfgang Strasser

- Zusätzlicher Buffer zum Color Buffer
- Speichert pro Pixel den Abstand **z zur Kamera**
- Ein Fragment wird nur geschrieben, wenn **z kleiner** ist als der Wert im Z-Buffer
- Beispiel:



Color Buffer



Z-Buffer

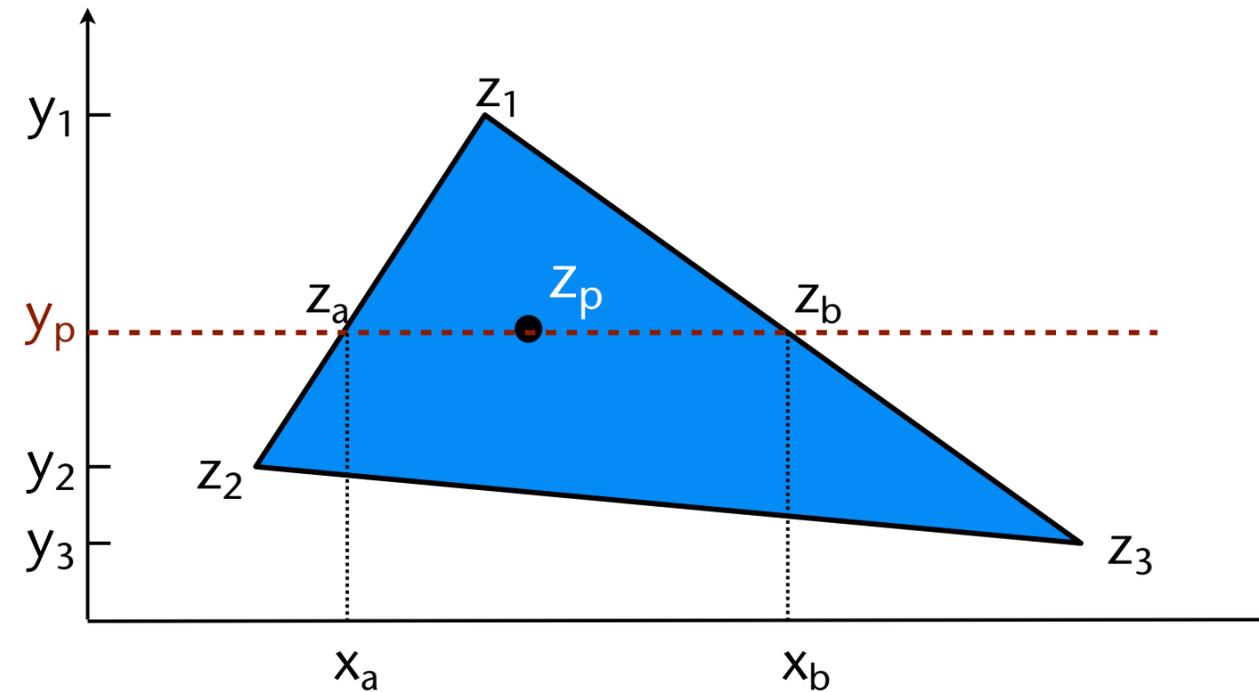
*"640 Kilobyte ought to be enough for anybody."*

Bill Gates, 1981



# Berechnung des Z-Wertes für die Scan-Conversion

## 1. Alternative: mehrfache lineare Interpolation



$$z_a = z_1 + \frac{y_p - y_1}{y_2 - y_1} (z_2 - z_1)$$

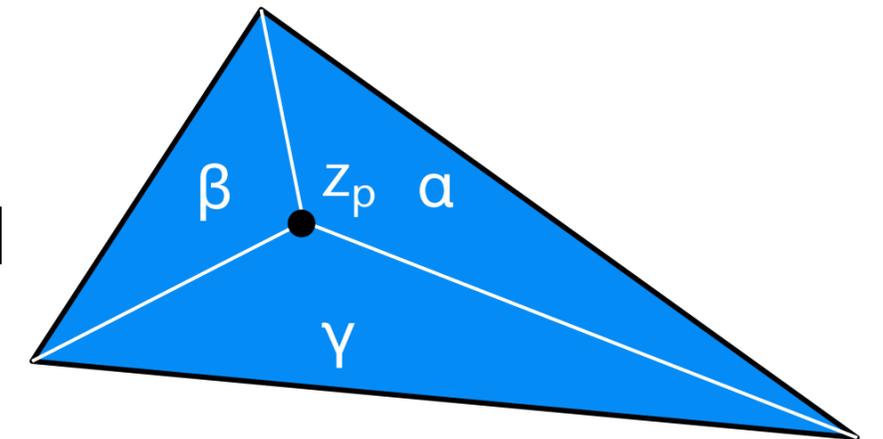
$$z_b = z_1 + \frac{y_p - y_1}{y_3 - y_1} (z_3 - z_1)$$

$$z_p = z_a + \frac{x_p - x_a}{x_b - x_a} (z_b - z_a)$$

## 2. Alternative:

$$z_p = \alpha z_1 + \beta z_2 + \gamma z_3$$

wobei  $\alpha, \beta, \gamma =$  baryzentrische Koord. (können inkrementell oder mit den bekannten Formeln berechnet werden)



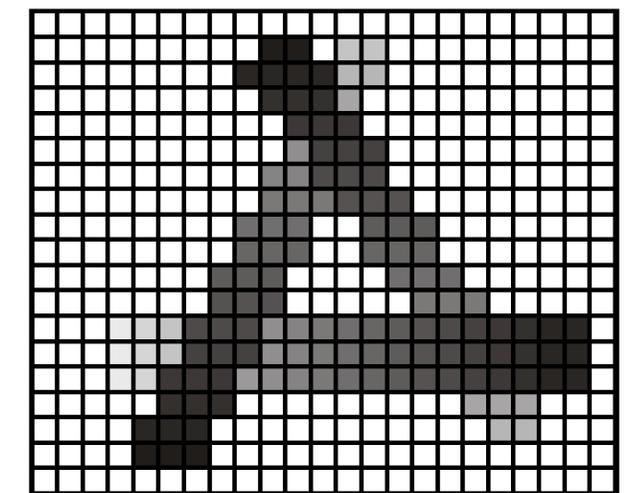
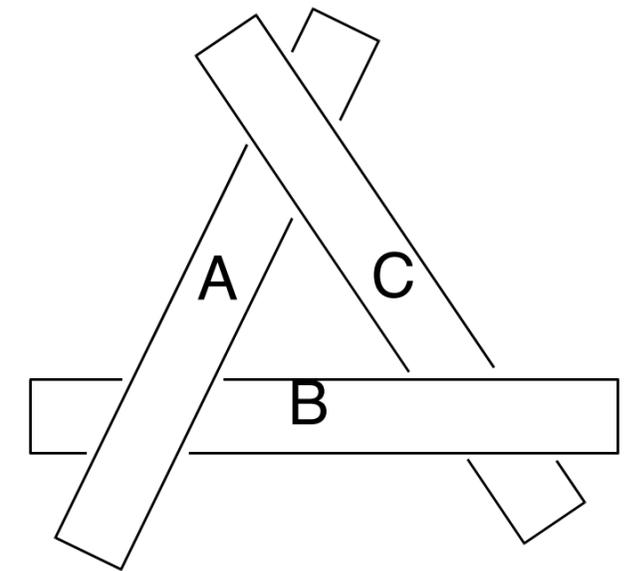
# Pseudo-Code für Rasterisierung mit Z-Buffer

```

for all pixels in window:
    framebuffer[x,y] = background color; zbuffer[x,y] = ∞;
for every triangle:
    compute projection & color at vertices
    (precomputations for incremental barycentric coords)
    compute bbox, then clip bbox to screen limits
    for all pixels x,y in bbox:
        calc barycentric coords (incrementally)
        compute Z of fragment at pixel (x,y)
        if  $\alpha, \beta, \gamma > 0$ : // pixel is in triangle
            if  $Z < zBuffer[x,y]$ : // pixel is visible
                compute color c of fragment
                framebuffer[x,y] = c
                zBuffer[x,y] = Z

```

Funktioniert auch  
in schwierigen Fällen



# Der Z-Buffer in OpenGL (FYI)

## 1. Fenster mit Z-Buffer anmelden (hier am Bsp. von GLUT)

```
glutInitDisplayMode( GLUT_DOUBLE | GLUT_RGB | GLUT_DEPTH );
```

## 2. Einschalten:

```
glEnable( GL_DEPTH_TEST );
```

## 3. Wichtig: nicht nur Bildspeicher, sondern auch Z-Buffer löschen!

```
glClear( GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT );
```

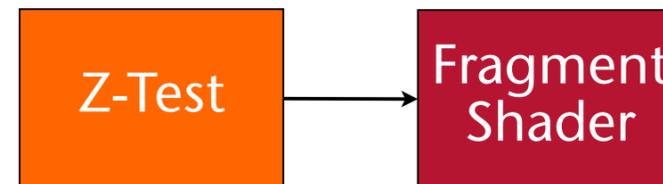
- Achtung: unter Qt (und anderen GUI-Libs) ist (1) und (2) per Default angeschaltet
  - Mehr Info unter <http://www.qt-project.org/doc/qt-4.8/QGLFormat.html>
  - Beispiel zu QGLFormat im "OpenGL/Qt-Programmbeispiel" auf der Homepage der Vorlesung

# Der Z-Test in der Pipeline

- Wann findet der Z-Test statt?



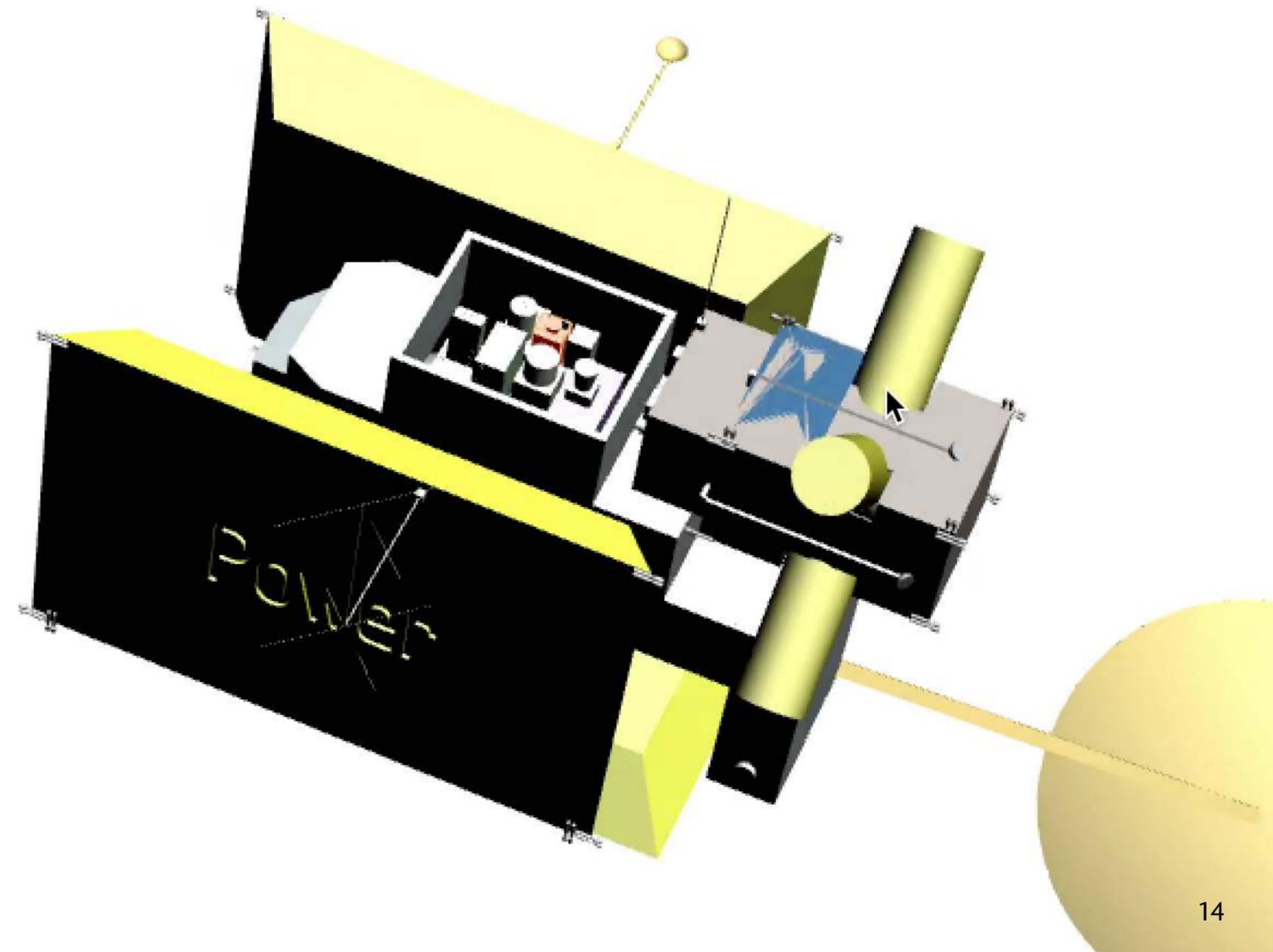
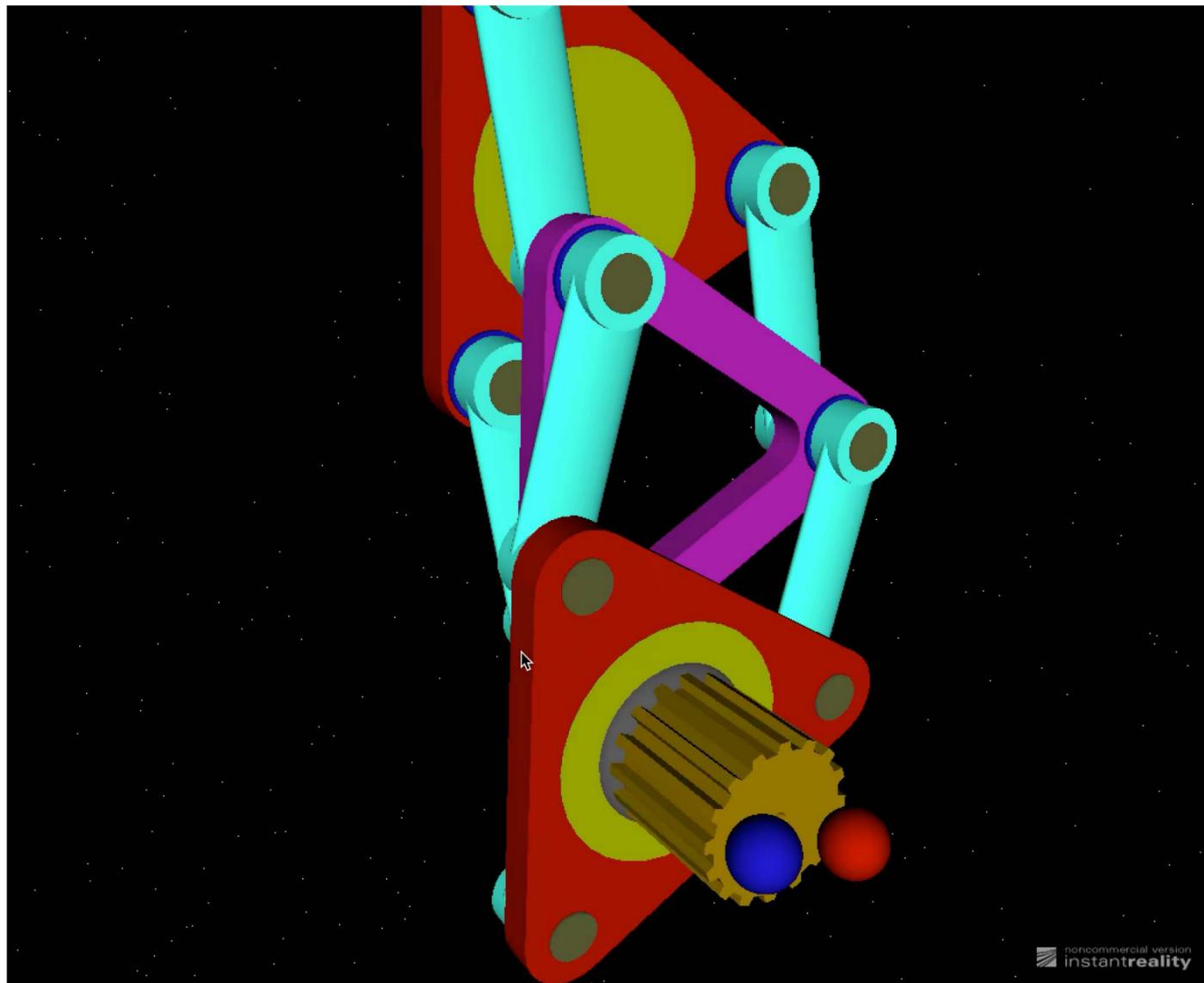
- "Early-Z":



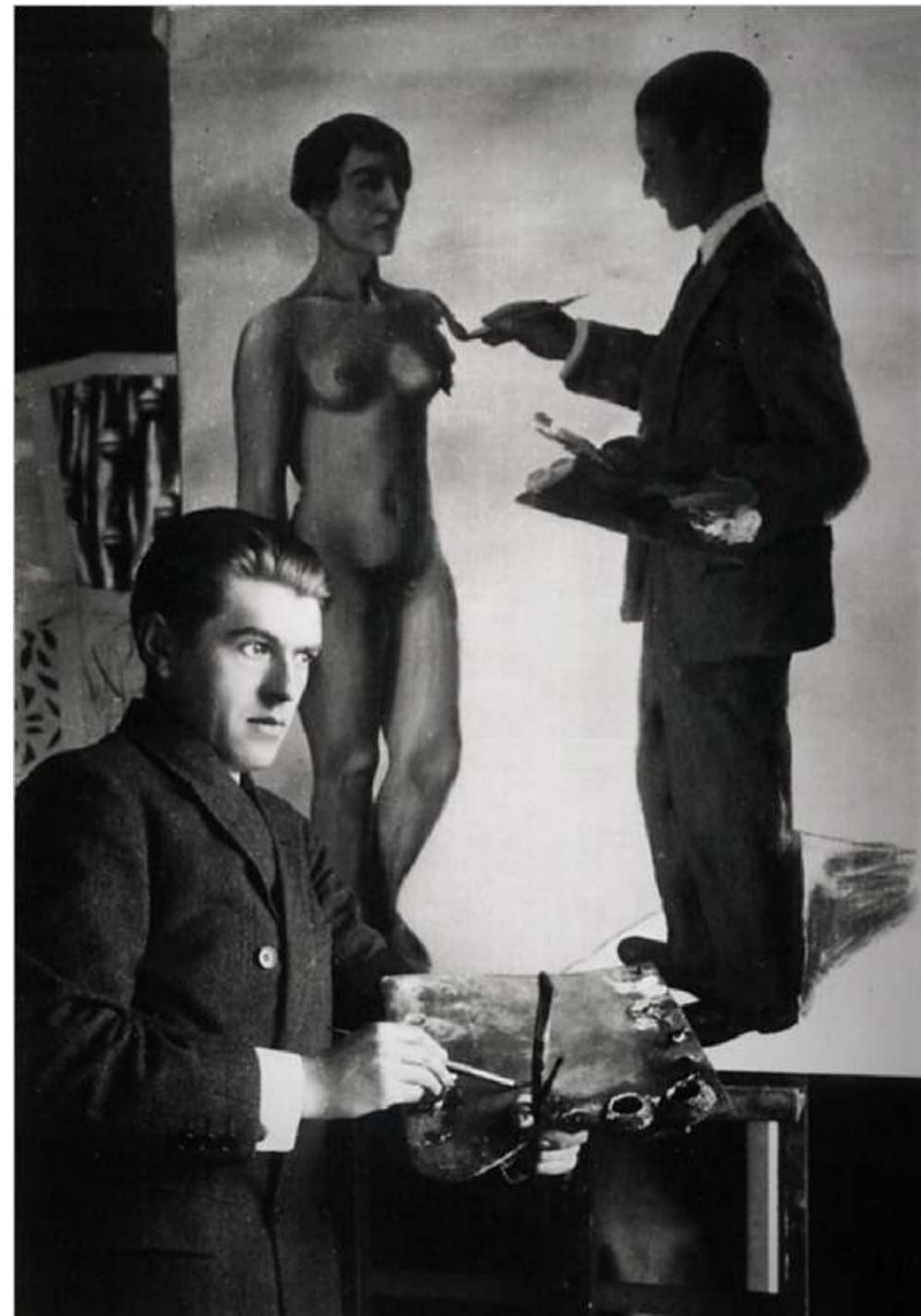
- Spart teure Fragment-Shader-Programmausführungen
- Reduziert Bandbreite von der GPU zum Framebuffer, und vom Texturspeicher zur GPU
- Wird automatisch *deaktiviert*, falls das Shader-Programm den Z-Wert (`gl_FragDepth`) manipuliert!

# Z-Fighting

- Wegen der begrenzten Auflösung des Z-Buffers kommt es bei koplanaren (und fast koplanaren) Polygonen zum sog. **Z-Fighting** bzw. **Flickering**



# Exkurs: der Surrealist Magritte hat (auch) mit Verdeckung gespielt

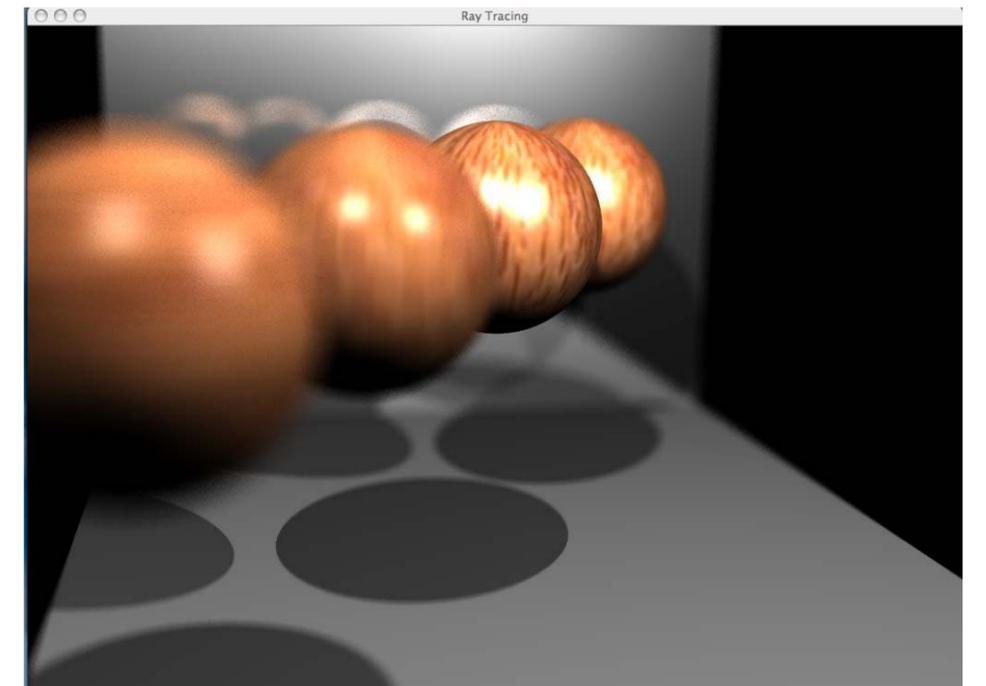
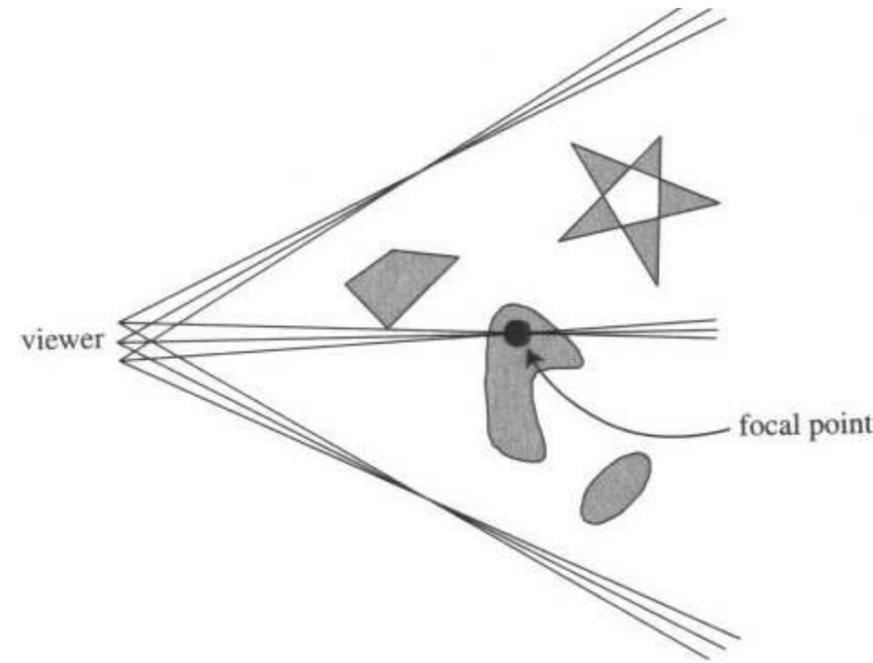


# Bewertung des Z-Buffers zur Verdeckungsrechnung

- Komplexität des Algorithmus'  $\in O(n)$  , mit  $n = \text{Anzahl Polygone}$ 
  - Kein zusätzlicher Aufwand, z.B. durch Sortieren (z.B.  $O(n \log n)$  )
- Eigentlich:  $O(n+p)$ , wobei  $n = \# \text{ Pgone}$ ,  $p = \# \text{ Fragmente aller Pgone}$  (kann unter Umständen viel größer als Anzahl sichtbarer Pixel sein!)
- Läßt sich ideal in Hardware implementieren:
  - Parallelisierung ohne Kommunikations-Overhead möglich
  - Keine komplizierte "Logik" nötig (wenige if's)
  - Keine komplizierten Datenstrukturen zu traversieren (z.B. verzeigerte Strukturen, z.B. Bäume)
- Nachteile:
  - Pro Pixel kann nur ein Primitiv gespeichert werden
    - Einige fortgeschrittene Effekte, z.B. Transparenz, benötigen aber alle Primitive
  - Genauigkeit des Z-Buffers ist oft stark beschränkt (*image space vs. object space*)
    - Auch heute noch manchmal 16-Bit Integer-Werte im Z-Buffer (z.B. in Handys, um Speicherplatz zu sparen)

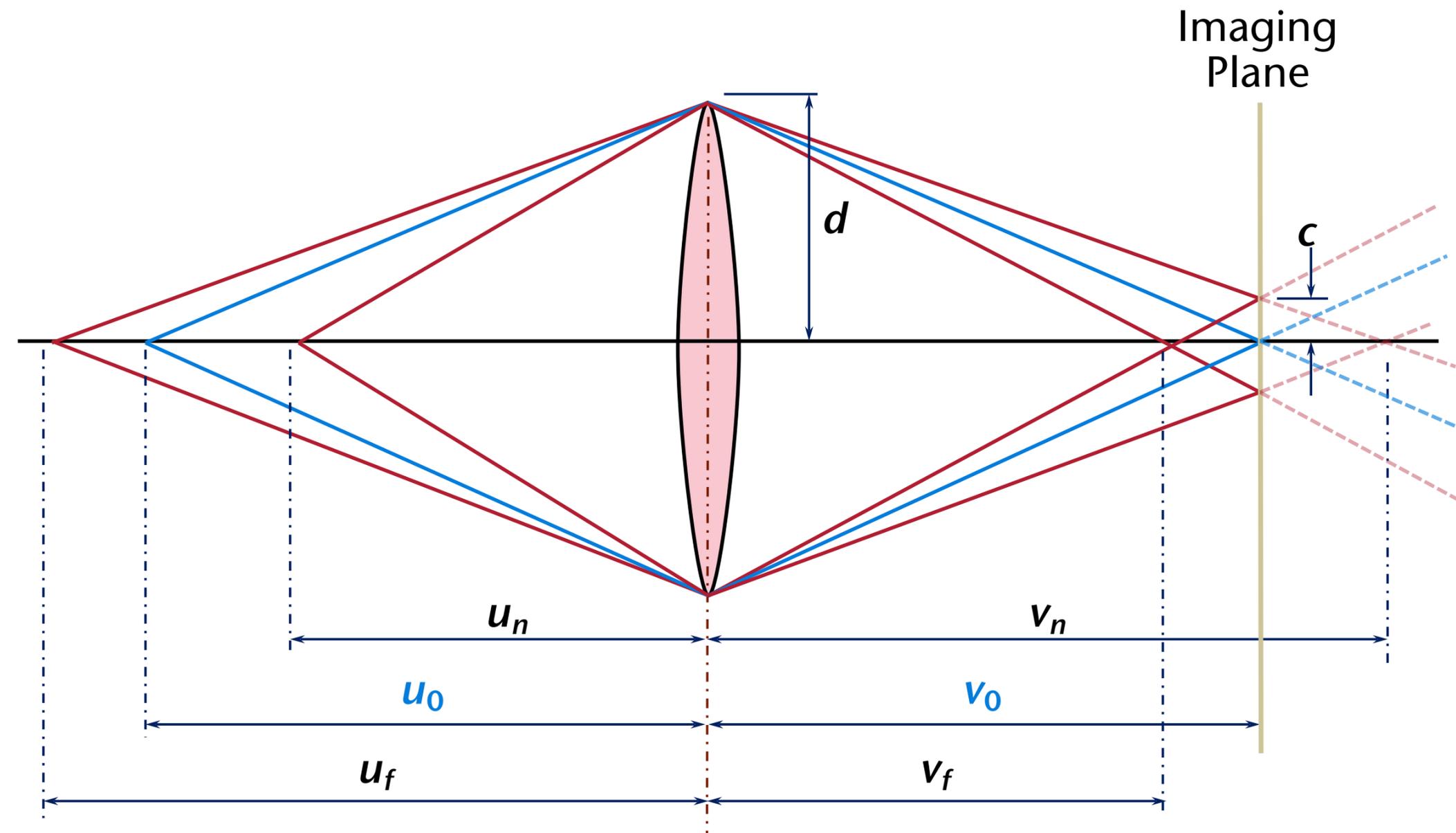
# Anwendung: Depth-of-Field (Tiefenunschärfe)

- Wichtiger **depth cue**
- Die alte Methode:
  - Rendere die Szene  $n$  Mal von leicht verschiedenen Viewpoints, je nach Größe der (virtuellen) Blende (*aperture*)
  - Akkumuliere alle Bilder im sog. **Accumulation-Buffer**
  - Teile am Ende die Werte im Accumulation-Buffer durch  $n \rightarrow$  Mittelwert
- Problem: sehr teuer  $\rightarrow 1/n * \text{FPS}$



# Der *Circle of Confusion* (CoC)

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



# Herleitung

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

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

- Wende Strahlensatz auf vorige Zeichnung an ("*using similar triangles*"):
 
$$\frac{v_n - v_0}{v_n} = \frac{c}{d}$$

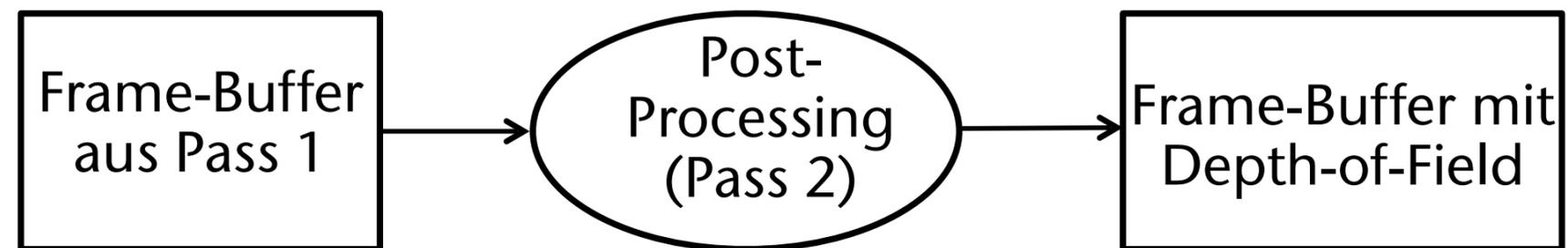
- Ergibt also den Radius des CoC für einen beliebigen Punkt P (mit  $u_p, v_p$ ):
 
$$c = d \cdot \left| \frac{v_p - v_0}{v_p} \right| \quad (2)$$

- Linsengleichung (1) einsetzen in (2) ergibt:

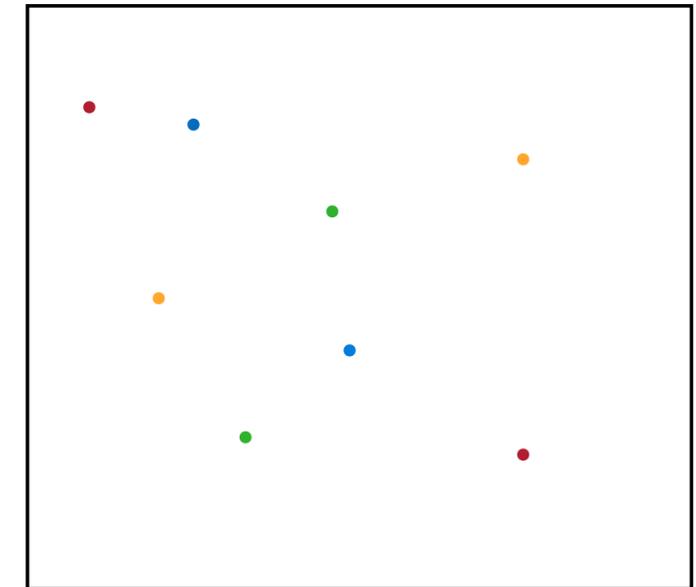
$$c = R(u_p) = d \cdot \left| 1 - \frac{u_0}{u_p} \cdot \frac{u_p - f}{u_0 - f} \right| \quad (3)$$

# Der Algorithmus

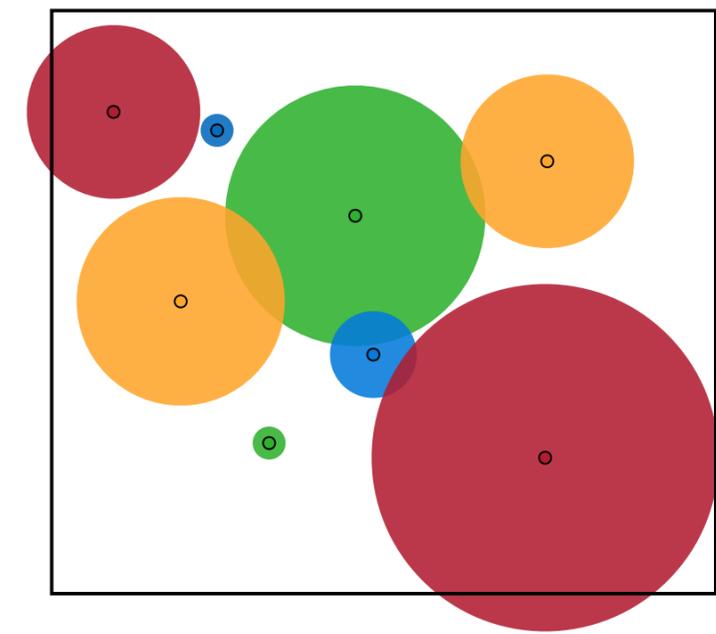
1. Pass: rendere die Szene normal; speichere zu jedem Pixel dessen z-Wert im Z-Buffer
2. Pass (Post-Processing): für jedes Pixel, "verschmiere" dessen Farbwert auf die Nachbarpixel, abhängig vom Radius des CoC



- Problem: die Operation in Pass 2 ist eine sog. *Scatter-Operation* → sehr teuer bzw. unmöglich (je nach Implementierung auf der GPU)



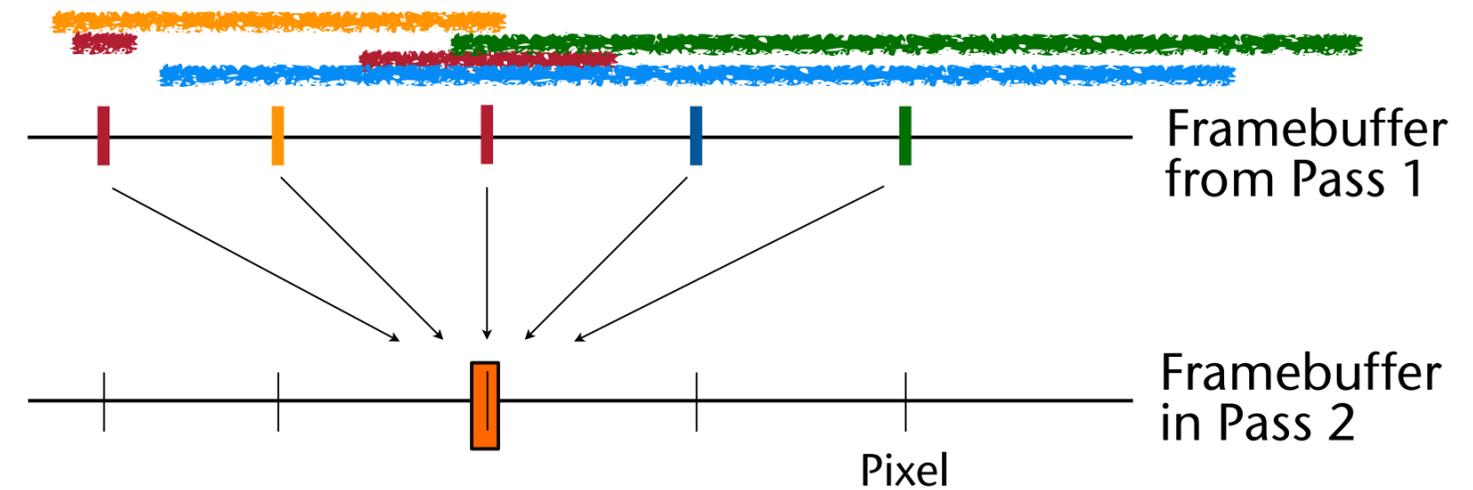
1.



2.

- Lösung: konvertiere in eine sog. **Gather-Operation** in jedem Pixel

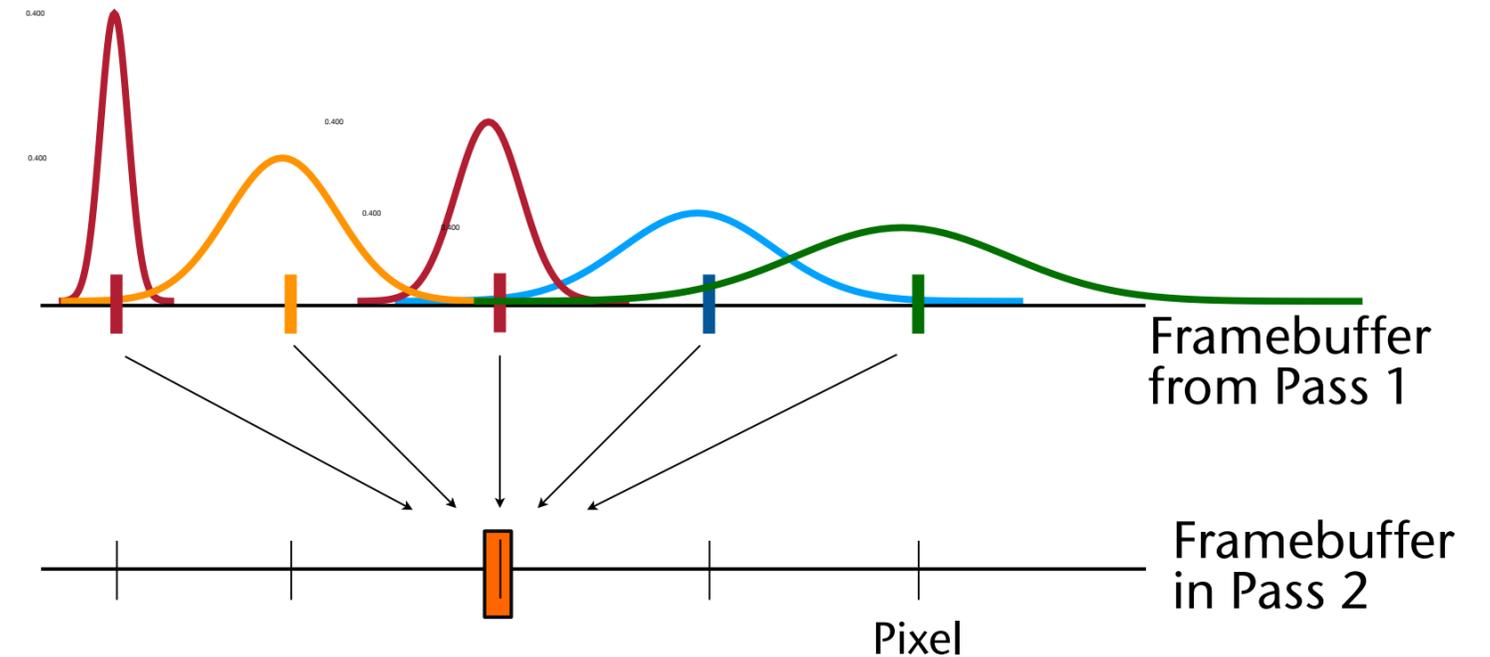
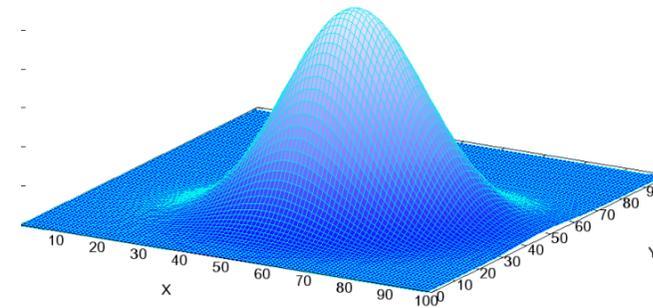
```
foreach pixel (i,j) in framebuffer 2:
  sum = (0,0,0) , n = 0
  forall pixels (k,l) in m,m-neighborhood:
    r = radius_of_CoC( z_buffer_1[k,l] )
    if r > dist( (i,j), (k,l) ):
      sum += color_buffer_1[k,l]
      n += 1
  color_buffer_2[i,j] = sum / n
```



- Wichtig: Nachbarpixel, die weiter als *deren* Circle-of-Confusion entfernt sind, müssen ausgeschlossen werden!
- Für jedes Pixel in Framebuffer 1 ist  $\text{radius\_of\_CoC} \geq 1$ !

# Etwas realistischere Variante

- Je nach Linse: CoC kann verschiedene "Footprints" haben
- Einfache Variante:
  - Approximiere Footprint durch Gauß-Funktion
  - Überlagere diese im jeweiligen "Gathering Pixel"
  - Sehr ähnlich zur **Faltung** (*convolution*)
  - Hier: Breite der Gauß-Funktion hängt von  $z - z_0$  ab,  $z =$  Tiefe des jeweiligen "Scattering Pixels"

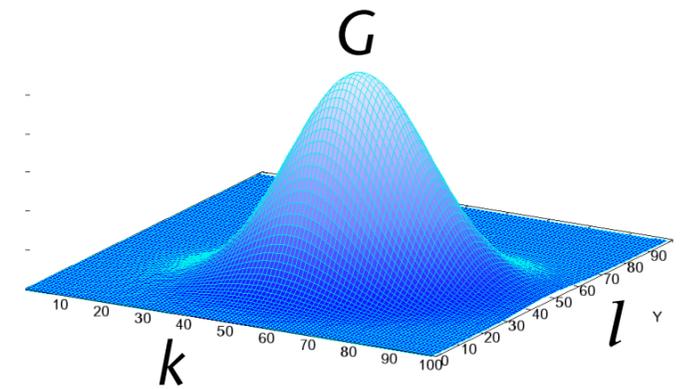


# Der verbesserte Algorithmus

- Normale Faltung: Input-Bild  $I$ , Output-Bild  $O$ , Kernel  $G$

$$O(x, y) = \sum_{k=-\frac{r}{2}}^{\frac{r}{2}} \sum_{l=-\frac{r}{2}}^{\frac{r}{2}} I(x+k, y+l) \cdot G(k, l)$$

$$G(k, l) = \frac{1}{2\pi r^2} e^{-\frac{k^2+l^2}{2r^2}}$$



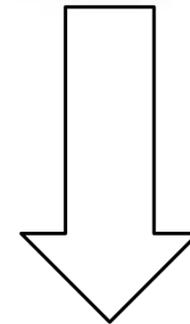
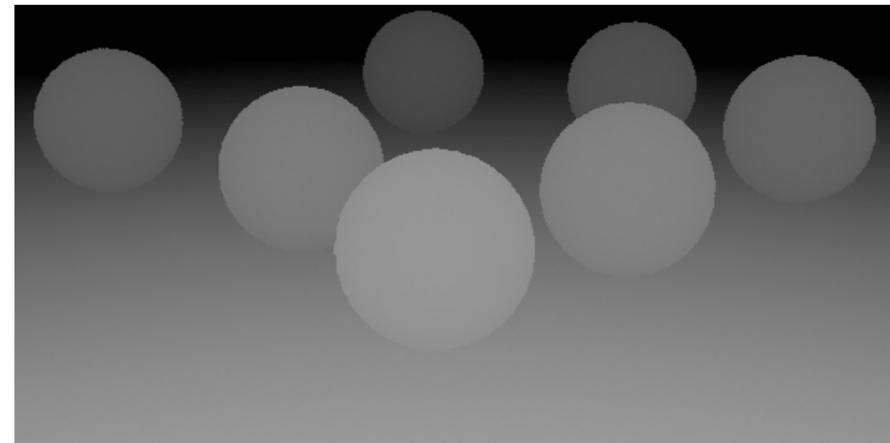
- Bei uns: die "Breite" von  $G$  (Parameter  $r$ ) muss vom Radius des CoC an der Stelle  $(x+k, y+l)$  abhängen!

$$G = G(k, l, x, y) = \frac{1}{2\pi r^2} e^{-\frac{k^2+l^2}{2r^2}} \quad \text{mit} \quad r = R(\text{zbuffer}[x+k, y+l])$$

- Damit wird der Algorithmus zu:

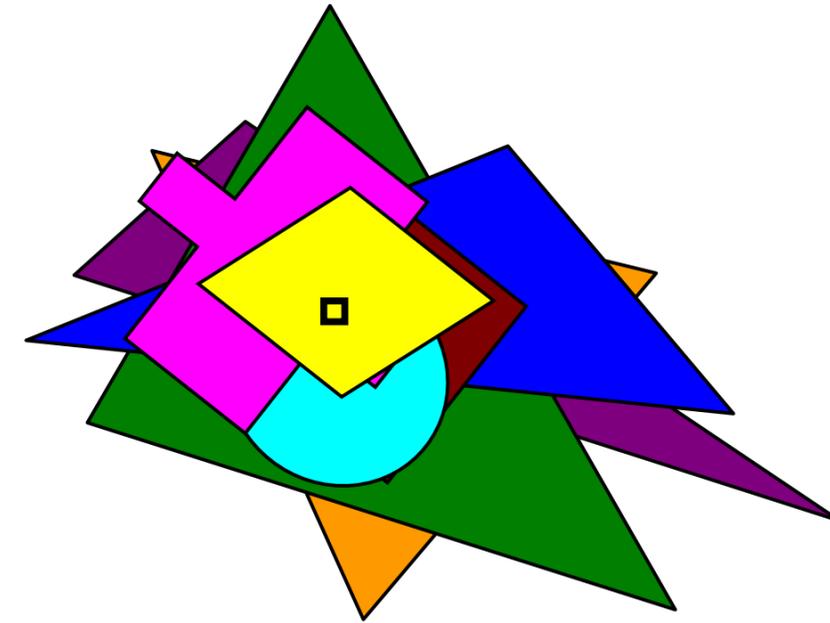
```
foreach pixel (i,j) in framebuffer 2:  
    sum_c = (0,0,0)  
    sum_g = 0  
    for k=-m,...,+m; l=-m,...,+m:  
        r = radius_of_CoC( z_buffer_1[i+k,j+l] )  
        g = kernel_weight( k, l, r )  
        sum_c += g * color_buffer_1[i+k,j+l]  
        sum_g += g  
    color_buffer_2[i,j] = sum_c / sum_g
```

# Beispiel



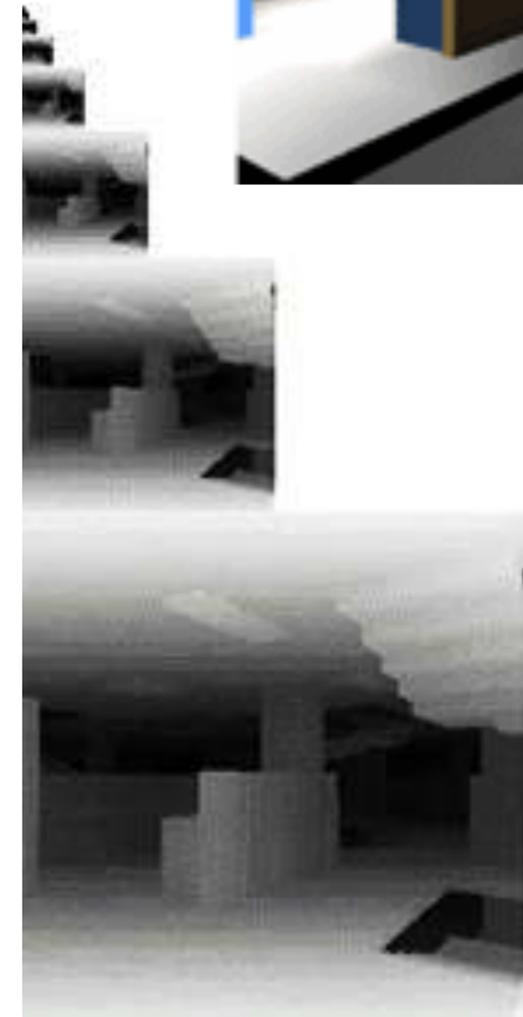
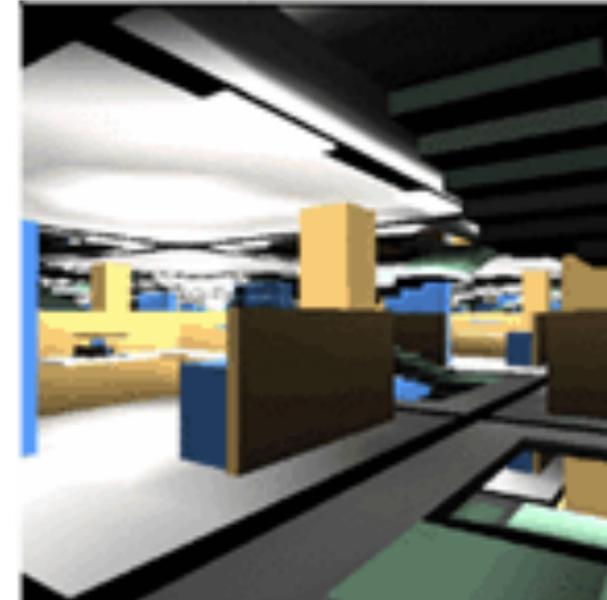
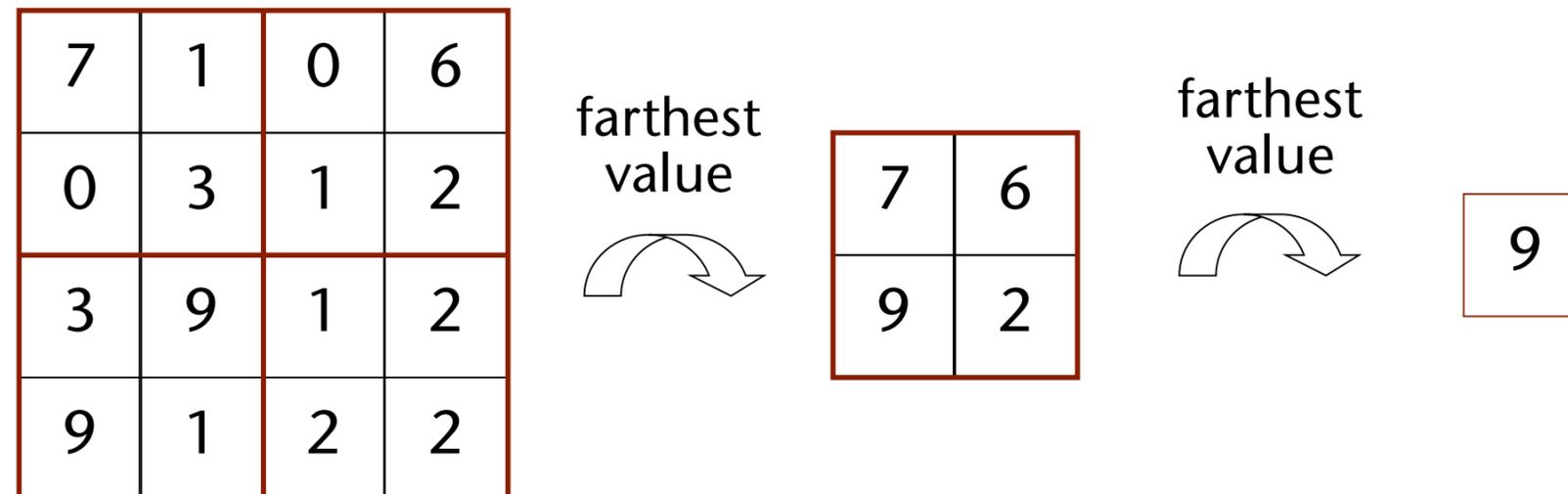
# Depth-Complexity und Overdraw

- Frage: 10 Dreiecke überdecken ein Pixel — wie groß ist die *erwartete* Anzahl Schreib-Operationen in den Color-Buffer ?
- Lösung:  $1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{10} \approx \ln(10) + 0.55\dots = 2.9289\dots$ 
  - Hinweis: harmonische Reihe!
- Definition **Depth-Complexity**:
  - Anzahl Polygone der Szene, die "hinter" einem Pixel liegen
  - Manchmal auch diese Definition: Depth-Complexity = Anzahl Z-Tests pro Pixel
- Definition **Over-Draw**: Maß dafür, wie oft ein Pixel im FB überschrieben wird
- Fazit:  $\text{overdraw} \approx \ln(\text{depth complexity}) + 0.5$



# Der Hierarchische Z-Buffer (HZB)

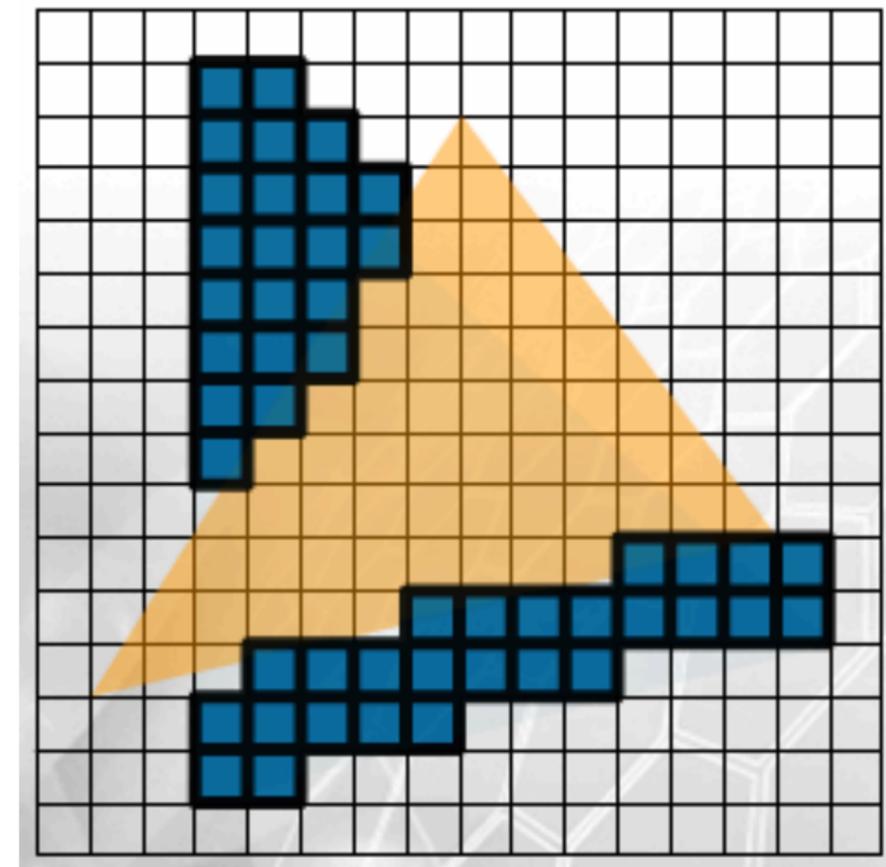
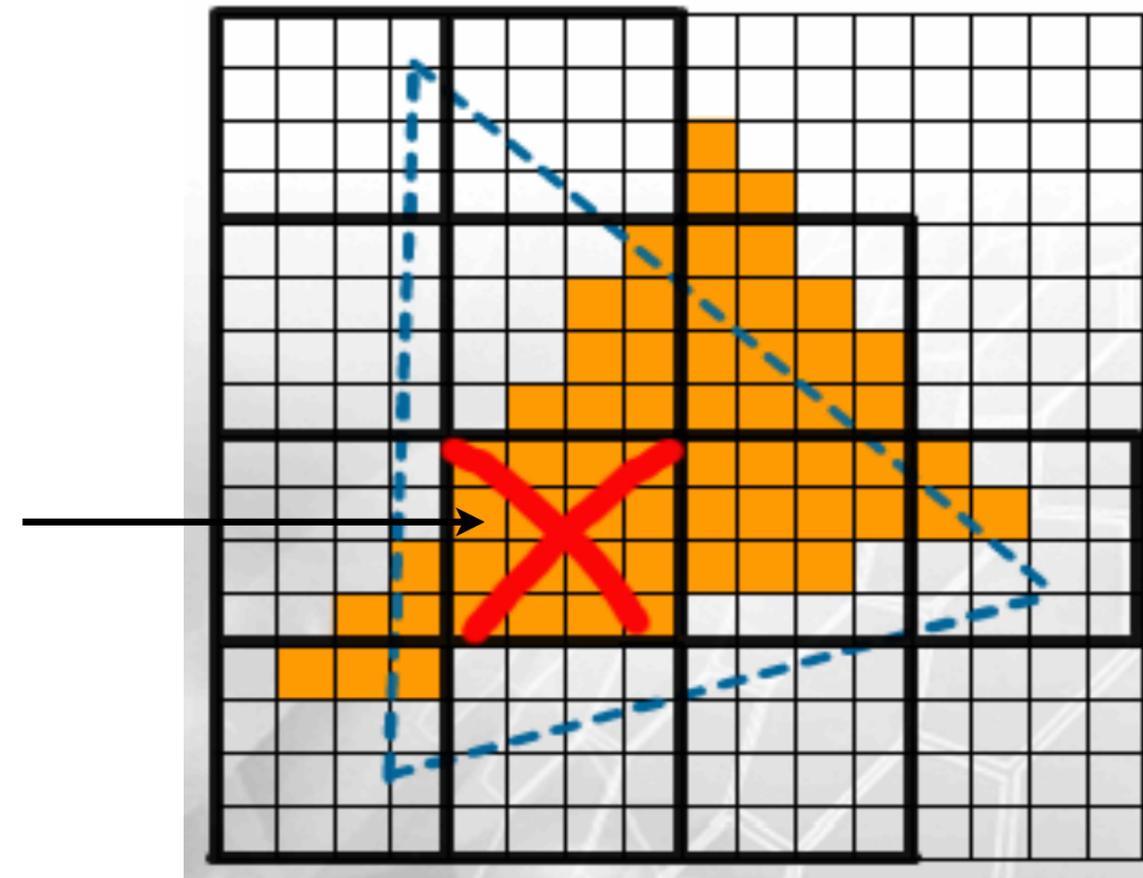
- Frage: wie kann man auch bei großer Depth-Complexity den Overdraw gering halten? (auch im worst case)
- Idee: "Z-Pyramide"
  - Einfacher Z-Buffer = höchste Auflösung
  - Weitere Levels durch Zusammenfassen von je  $n \times n$  Pixel
  - Z-Wert jeweils auf  $\max\{ n^2 \text{ Z-Werte} \}$  setzen



# Beispiel mit 2 Levels

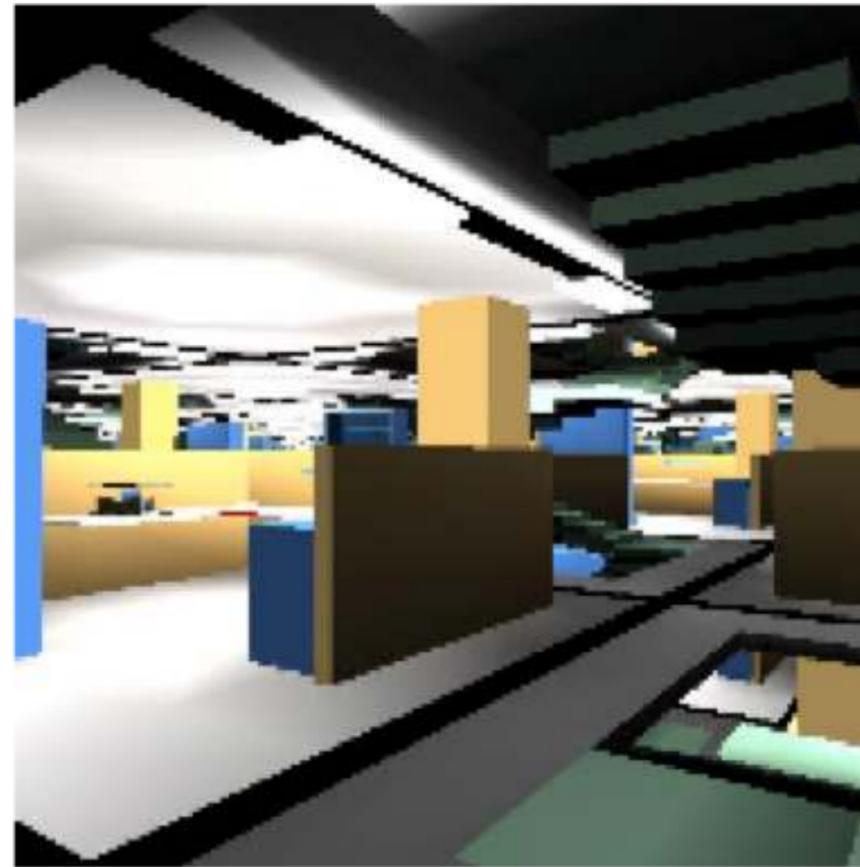
- Sei orangenes Dreieck bereits gezeichnet
- Blaues Dreieck soll (dahinter) gezeichnet werden
- Rasterisiere Dreieck erst auf grobem Level, dann ggf. innerhalb der "Kacheln"

Kachel ist vollständig  
verdeckt, also verwirfe  
gesamte Kachel

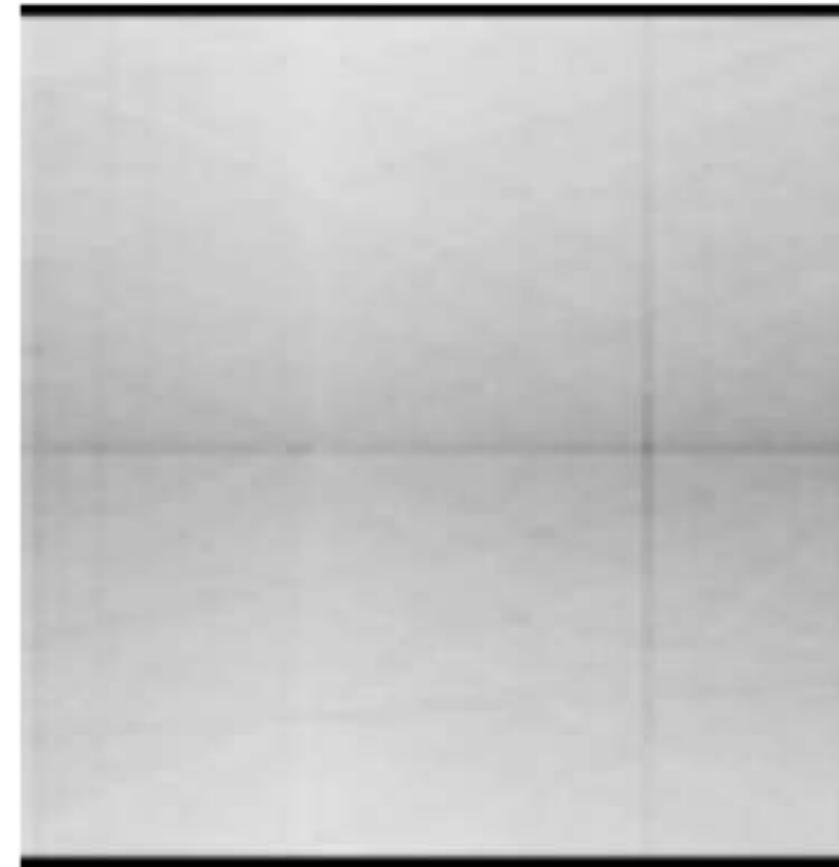


# Vergleich

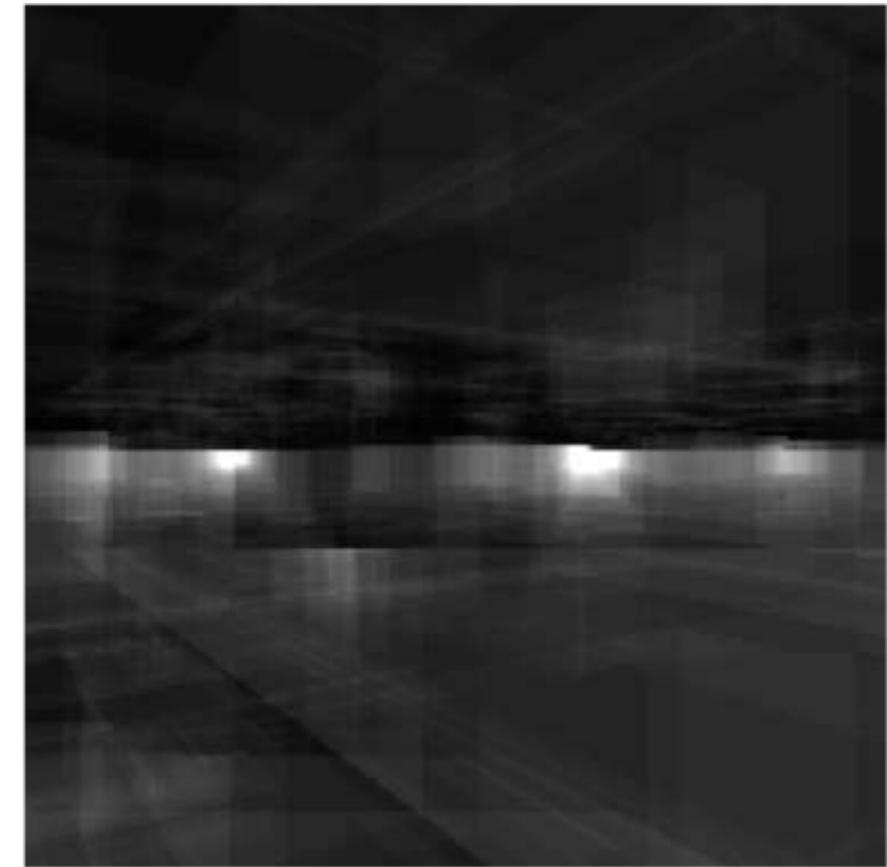
540 Mio Polygone



Overdraw mit  
einfachem Z-Buffer

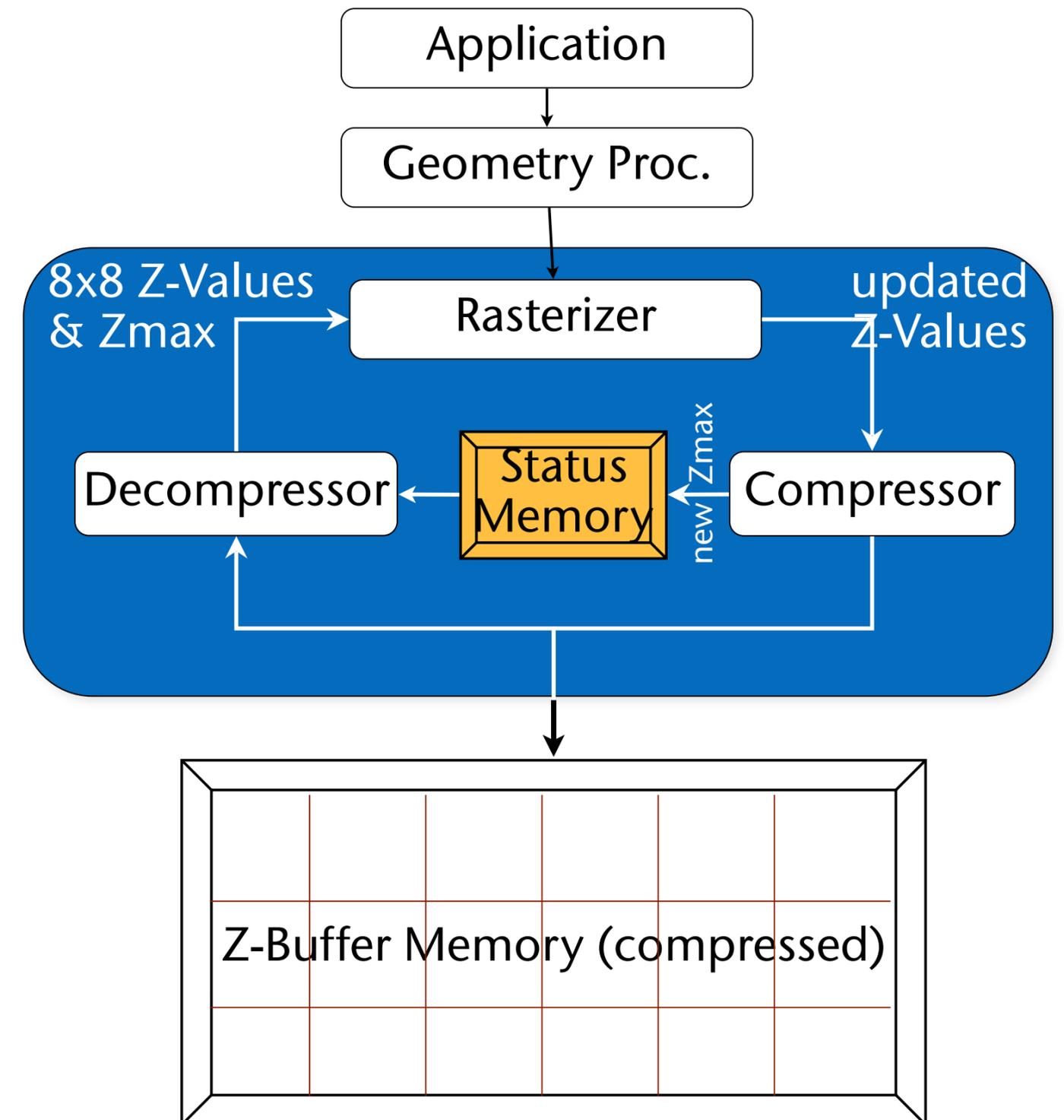


Overdraw mit HZB



- Problem: Bandbreite zwischen Rasterizer und Speicher ist limitiert
  - Annahmen: Auflösung 1280x1024, für jedes Pixel ist depth complexity = 4
  - I/O-Aufwand pro Fragment: 1x Z-Buffer-Read + 1x Z-Buffer-Write + 1x Color-Buffer-Write + 2x Texture-Read, pro Read/Write 32 Bit
- Ergibt ca. 18 GByte/sec!
- Wie implementiert man schnell `glClear (DEPTH_BUFFER_BIT)` ?
- Wie implementiert man den HZB?
- Lösungsansatz:
  - Nur 2 Levels des HZB implementieren → Z-Buffer in **Kacheln** aufteilen
  - Kacheln (**tiles**) **komprimieren**

- Zentrale Idee: Status-Speicher auf dem Chip (sehr schnell) für den Zustand der Kacheln
- Pro Kachel speichere im Status-Memory:
  - Zustand  $\in \{ \text{"compressed"}, \text{"uncompressed"}, \text{"cleared"} \}$
  - $Z_{\max}$  der Kachel

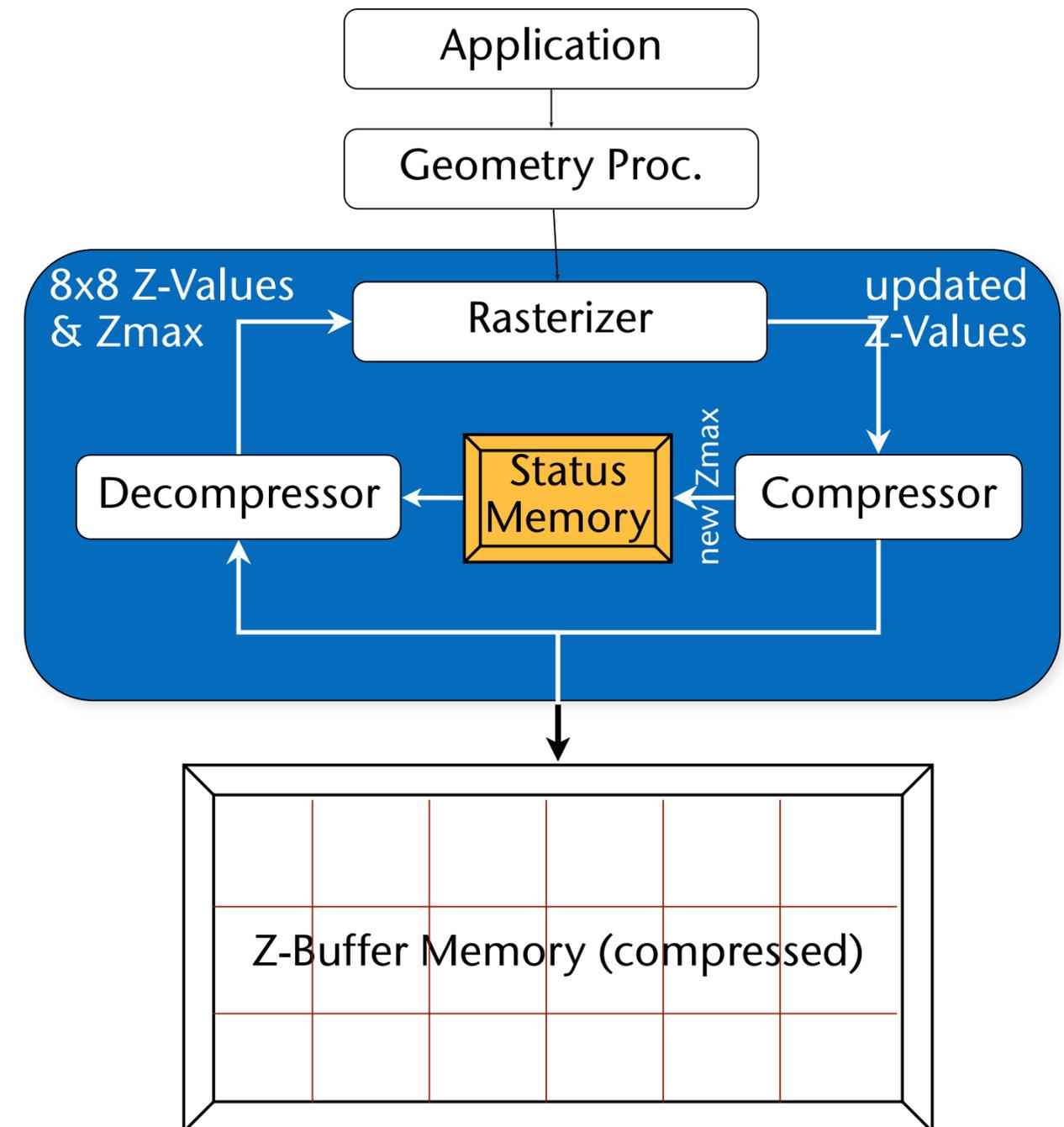


- Z-Buffer löschen:

- Bei `glClear()` wird der Status jeder Kachel auf "cleared" gesetzt
- Beim Lesen einer Kachel: Decompressor checkt Status, sieht "cleared", schickt  $Z_{far}$  an Rasterizer
- Kein Datenfluß auf dem Bus

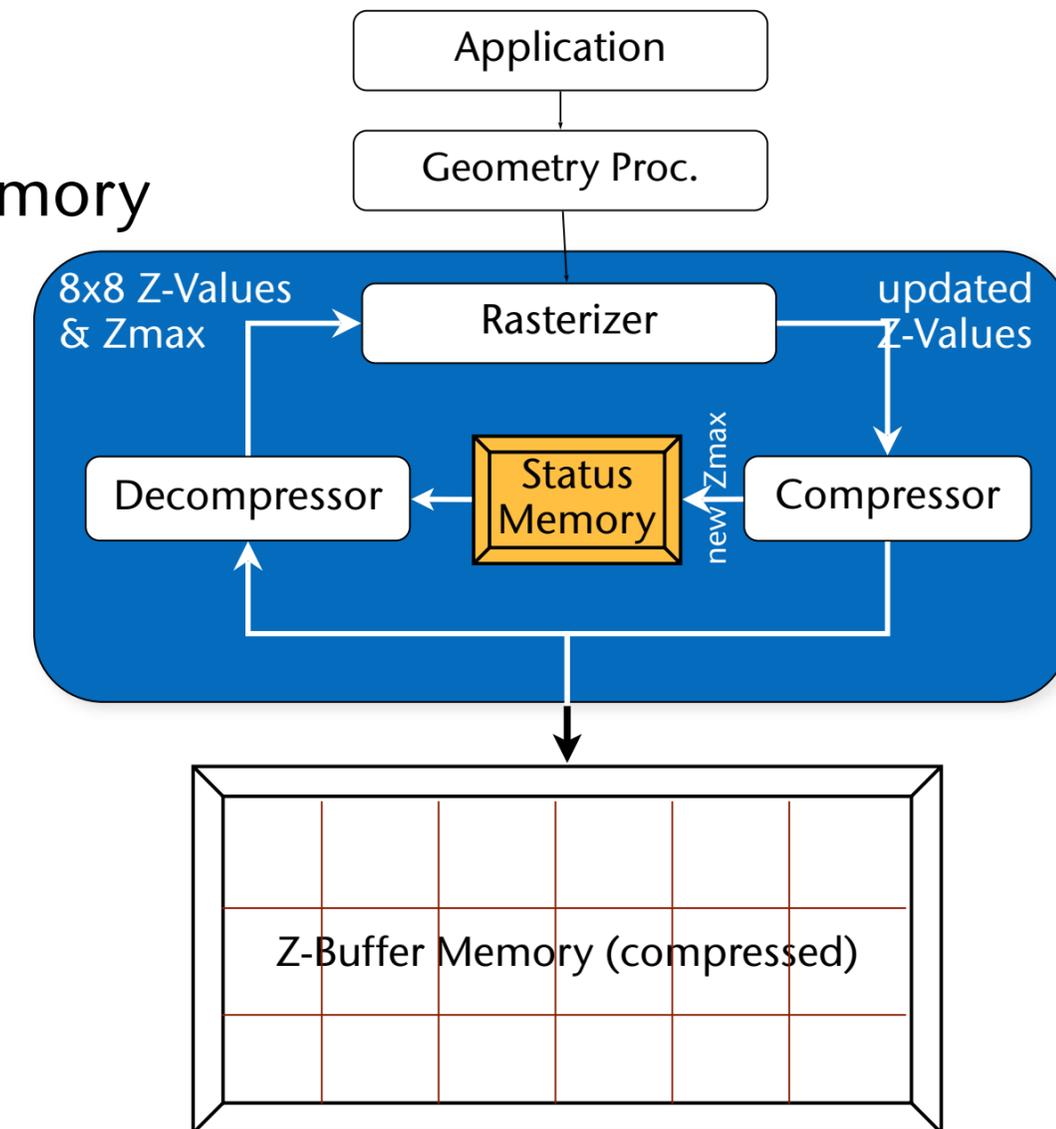
- Z-Buffer schreiben:

- Compressor berechnet neues  $Z_{max}$  der Kachel und schreibt es in Status Memory
- Komprimiert aktuelle Z-Werte der Kachel
- Falls signifikante Kompression möglich: setze Status auf "compressed", sonst "uncompressed"
- Schreibe un-/komprimierte Kachel in Z-Buffer



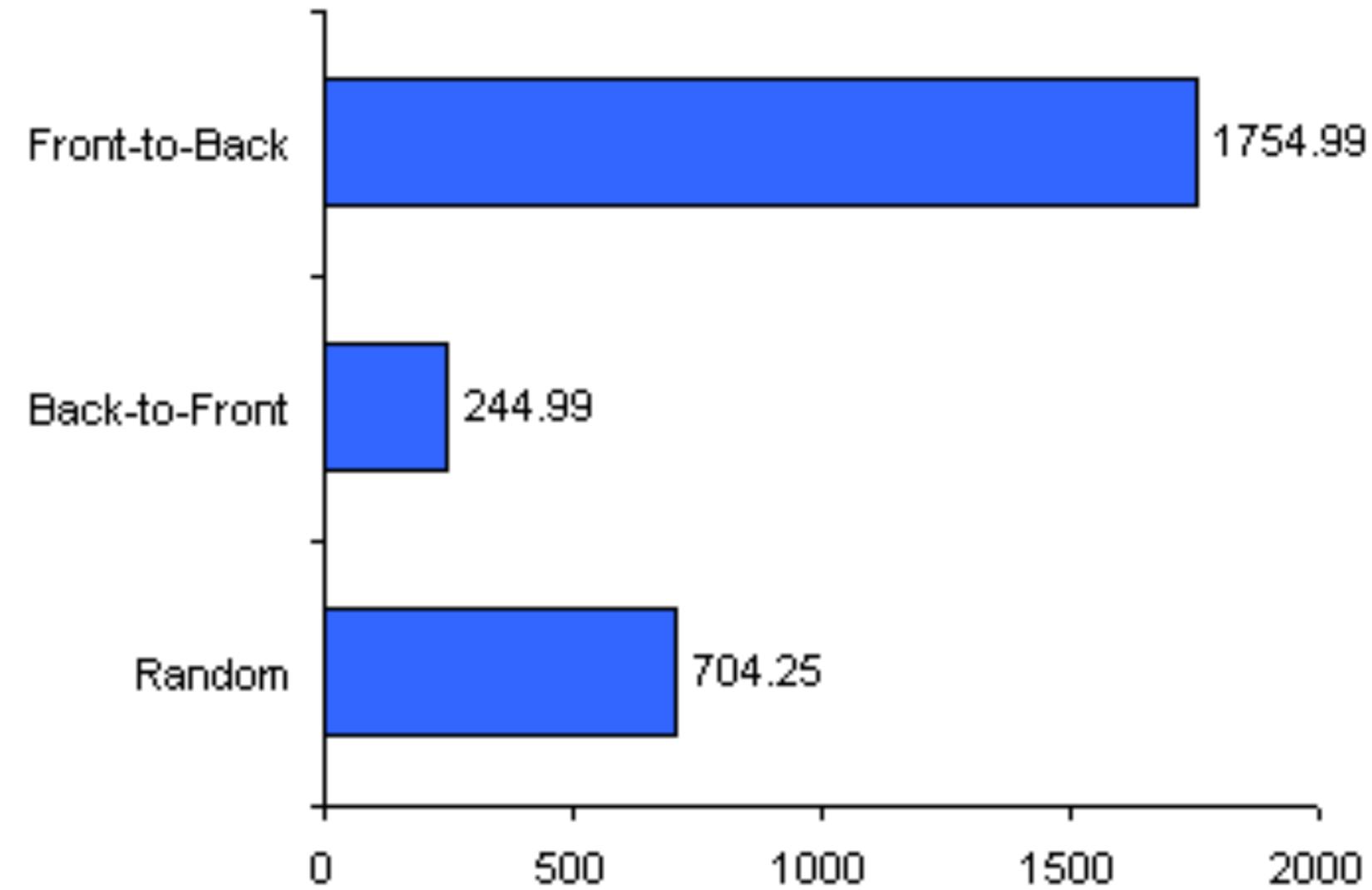
- Z-Buffer lesen:

- Decompressor liest zuerst  $Z_{\max}$  der Kachel aus dem Status Memory
- Verschiedene Tests möglich:
  1. Teste die Z-Werte der 3 Vertices des Dreiecks gegen  $Z_{\max}$
  2. Teste die Z-Werte des  $\Delta$ 's an den 4 Ecken der Kachel gegen  $Z_{\max}$ 
    - Bemerkung: diese 4 Z-Werte kann man in den Nachbarkacheln wiederverwenden
  3. Berechne alle Z-Werte der Fragmente in Kachel, teste gegen  $Z_{\max}$
- Fordere Z-Werte der Kachel aus dem Z-Buffer an, falls alle Tests "fehlschlagen"; ggf. dekomprimieren
- Kompression (z.B. DPCM) erreicht bis zu Faktor 4:1
- Nennt sich "*HyperZ*" oder "*Lightspeed Memory Architecture*" bei den Graphikkartenherstellern



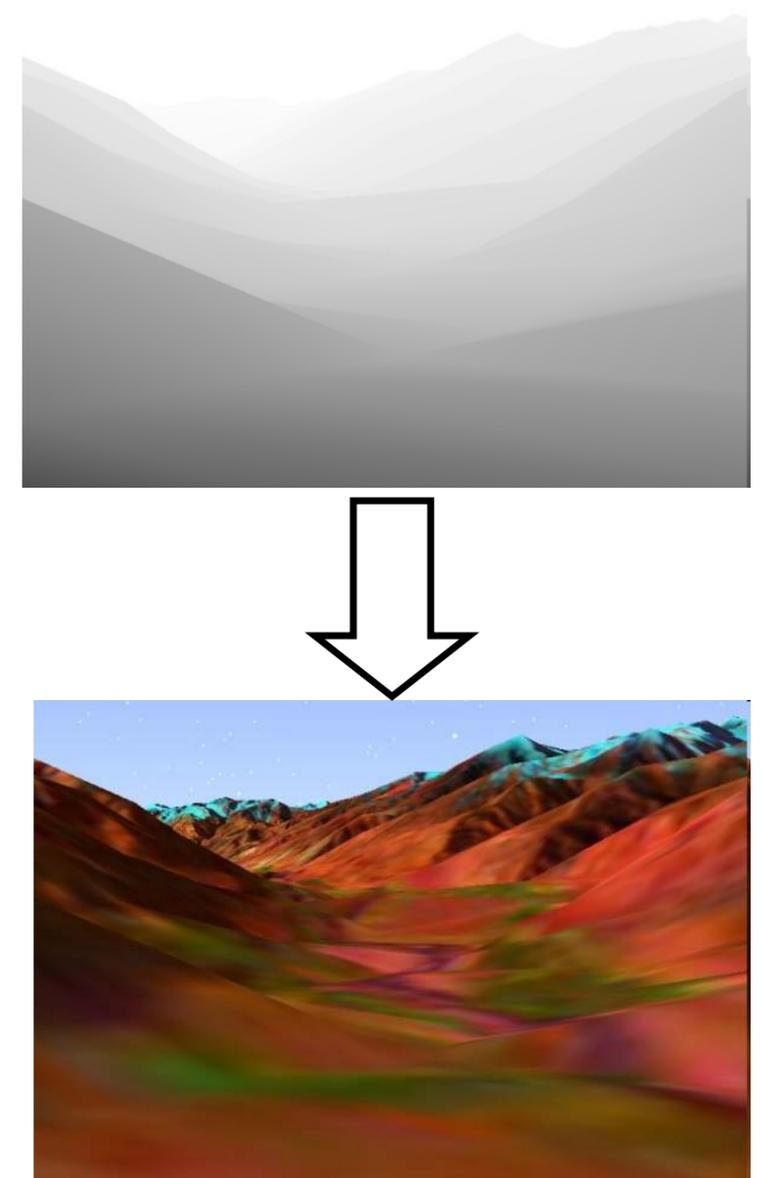
# Performance-Gewinn in einer Graphikkarte

Scene Order Rendering Performance - 8 Layers 1280x1024



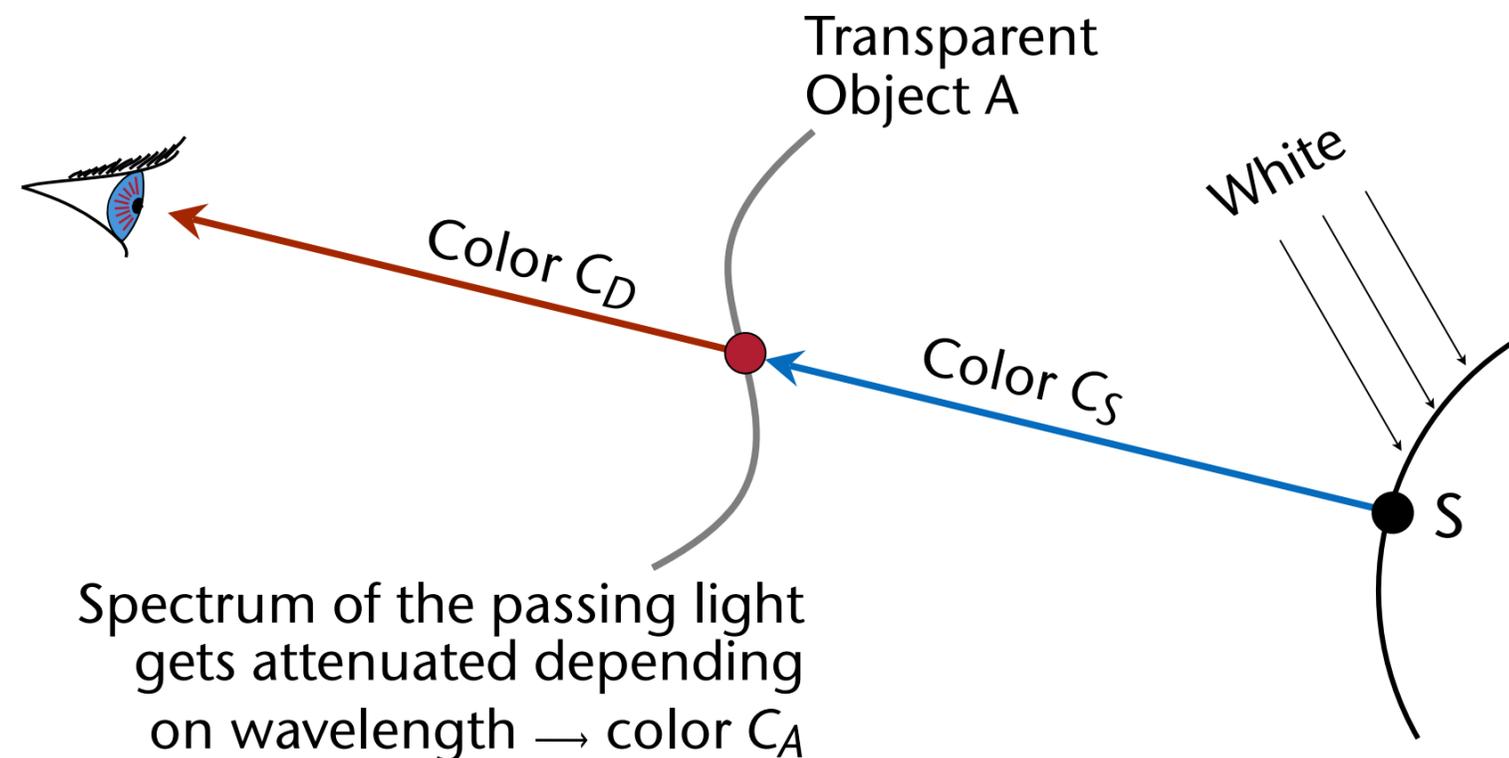
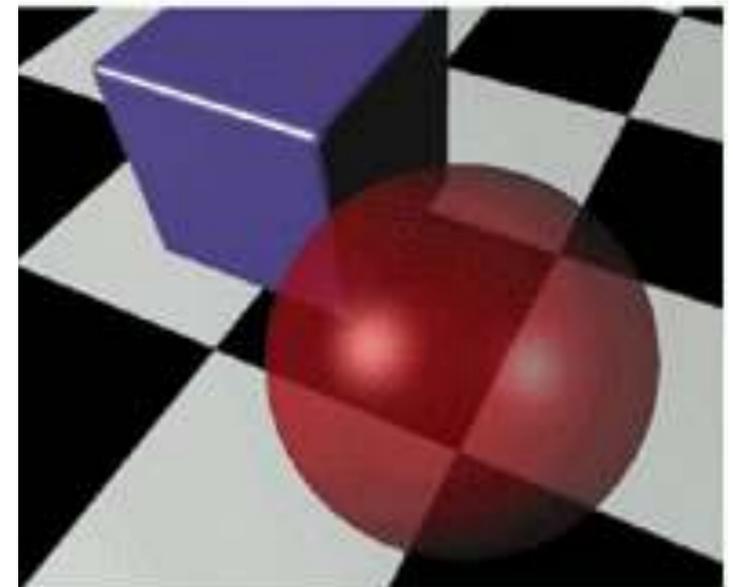
# Einfacher Rendering-Performance-Trick "*Early-Z Pass*"

- Wegen Komprimierung des Z-Buffers: Durchsatz der GPU ist ca. *doppelt* so hoch, falls **nur** der Z-Buffer geschrieben wird (nicht Color-Buffer)
- Vorgehensweise:
  - Schalte Color-Buffer aus, nur Z-Buffer an
  - Pass 1: rendere Szene "ohne alles" (keine Lichtquellen, keine Farben, keine Texturen), schreibe nur Z-Buffer = "*lay down depth*"
  - Pass 2: rendere Szene "mit allem", lösche *nicht* den Z-Buffer → HZB kann voll wirken → *kein Overdraw*



# Rendering Transparent Objects

- For example: objects made of glass
- Transparency = material that lets light pass partially
- Often, some wavelengths are attenuated more than others → colored transparency
  - Extreme case: color filter in photography
- Model:



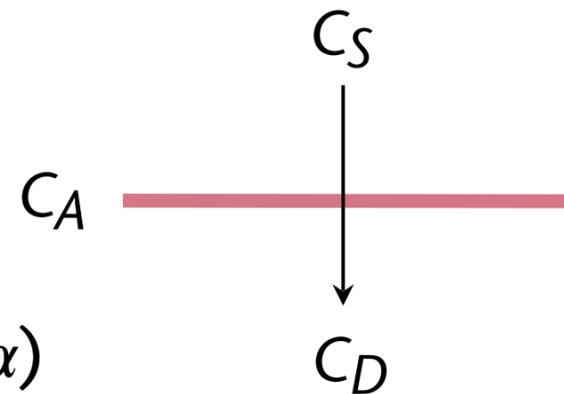
- Approximation: **alpha blending**

- $\alpha \in [0, 1]$  = **opacity** (= opposite of transparency)

- $\alpha = 0 \rightarrow$  completely transparent,  $\alpha = 1 \rightarrow$  completely opaque

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

- Practical implementation:  $\alpha = 4^{\text{th}}$  component in color vectors  $C = (r, g, b, \alpha)$



- During rendering, the graphics card performs these fragment operations:

1. Read color from frame buffer  $\rightarrow C_S$

2. Compute  $C_D$  by above equation

3. Write  $C_D$  into framebuffer

- For later: "transparent color"  $C_A$  of the object = transmission spectrum (similar to reflectance spectrum of opaque objects)

- Problem: several transparent objects behind each other!

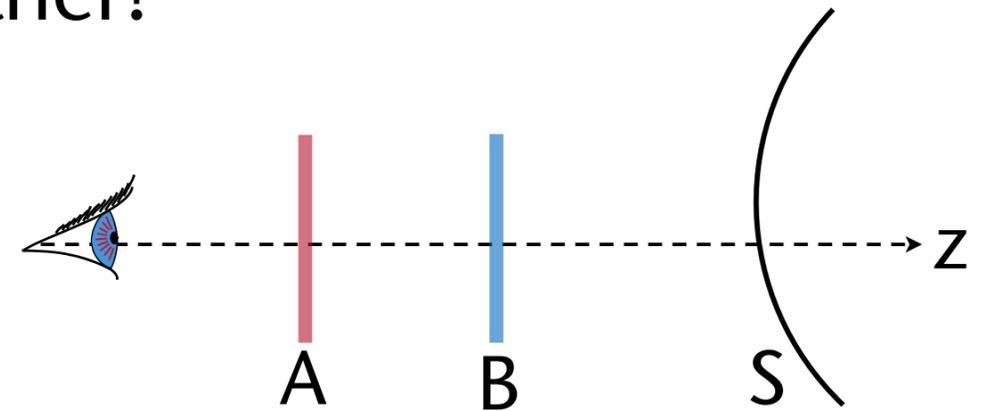
- Assume Z-buffer is off, i.e., no Z-test is done

1. First *A* then *B* results in:

$$C'_D = \alpha_A C_A + (1 - \alpha_A) C_S$$

$$C_D = \alpha_B C_B + (1 - \alpha_B) C'_D$$

$$= \alpha_B C_B + (1 - \alpha_B) \alpha_A C_A + (1 - \alpha_B) (1 - \alpha_A) C_S$$



2. First *B* then *A* results in:

$$C'_D = \alpha_B C_B + (1 - \alpha_B) C_S$$

$$C_D = (1 - \alpha_A) \alpha_B C_B + \alpha_A C_A + (1 - \alpha_B) (1 - \alpha_A) C_S$$

- Conclusion: **you must render transparent polygons/particles from back to front!** (and the Z-buffer can be switched off)

# Benutzung in OpenGL

(FYI)

- Switch blending on:

```
glEnable( GL_BLEND );
```

- Determine blending function:

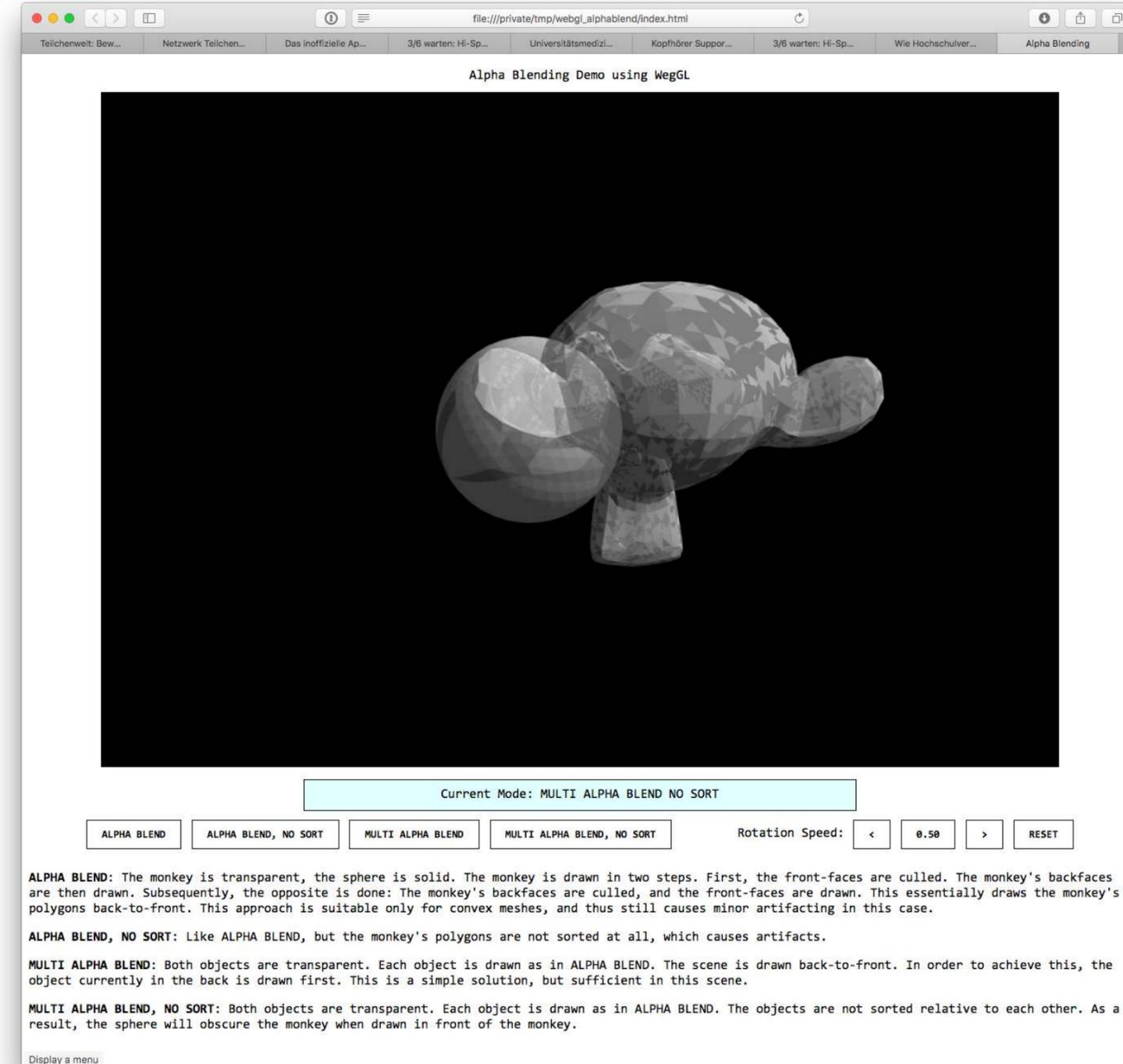
```
glBlendFunc( GLenum s, GLenum d );
```

Parameters **GL\_SRC\_ALPHA**, **GL\_ONE\_MINUS\_SRC\_ALPHA** yield

$$C'_D = \alpha C_A + (1 - \alpha) C_D$$

where  $C_D$  = color from frame buffer

- There are many more variants, e.g., you can just accumulate colors using **(GL\_ONE, GL\_ONE)**



# Object-Space- vs. Image-Space-Algorithmen

- **Image Space Algorithmen:** arbeitet im diskreten(!) 2D-Bildraum
  - Hier: bestimme für jeden **Pixel**, welches Objekt sichtbar ist
  - Funktioniert auch bei dynamischen Szenen, da i.A. wenig / keine Hilfsdatenstrukturen
  - Beispiel: Z-Buffer, hierarchischer Z-Buffer
- **Object Space Algorithmen:** ganz allg. Algorithmen, die direkt auf den 3D-Koord. der Objekte arbeiten (mit Floating-Point)
  - Hier: bestimme vor dem Abschicken von OpenGL-Befehlen, welche Polygone andere verdecken; berechne den jeweils sichtbaren Teil eines Polygons
  - Berechnung basiert oft auf dem Aufbau komplexer Hilfsdatenstrukturen
  - Funktioniert besser bei statischen Szenen

# Binary Space Partition (BSP) Tree

[ca. 1982]

- Ein Object-Space-Algorithmus/-Datenstruktur
  - *For depth sorting*
  - Generell für Polygon-Sortierung bzgl. eines beliebigen Punktes im Raum
- Ansatz: rekursive Unterteilung des Raumes durch Ebenen, die durch die Polygone der Szene induziert werden (Autopartition)
- Sehr effizient für statische Szenen
- Ermöglicht sehr schnell Hidden-Surface-Elimination für alle Viewpoints mittels Painter's Algorithm
- Ursprünglich fürs Rendering ohne Z-Buffer entwickelt, heute immer noch eine sehr wichtige Datenstruktur in der CG
  - Wurde sogar 1996 noch im Spiel Quake (und auch Quake II?) verwendet für Hidden-Surface-Elimination!

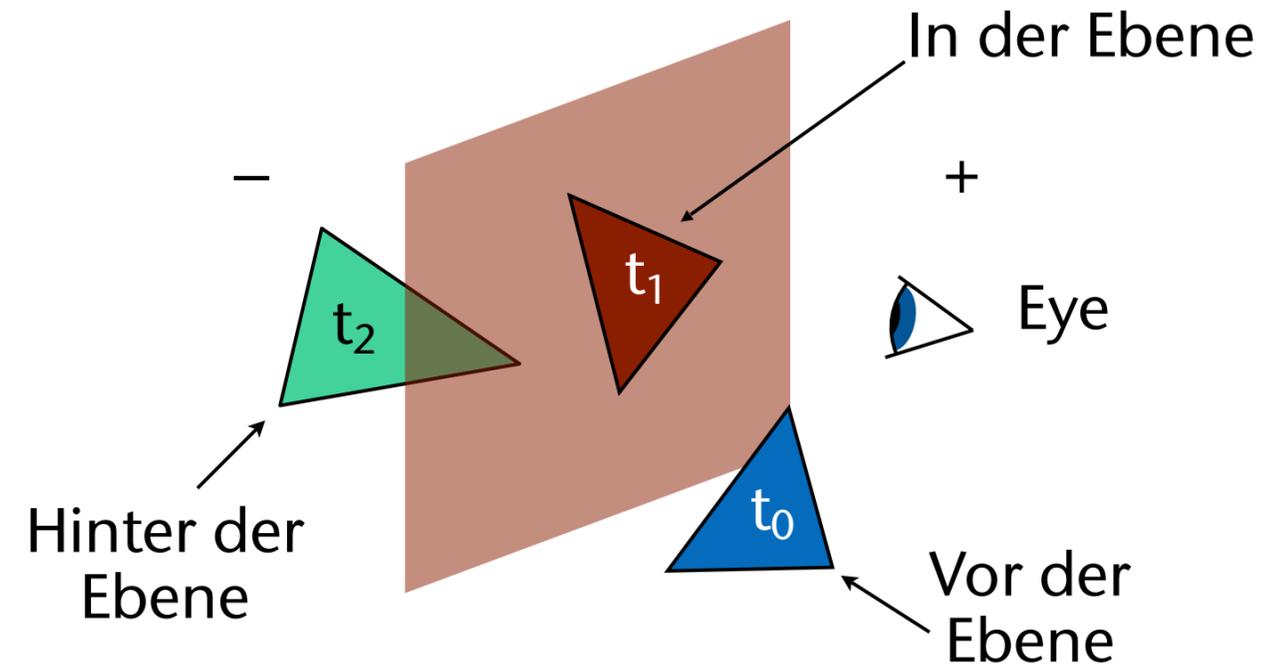
# Grundlegende Idee

- Annahme (vorerst): keine zwei Polygone schneiden sich
- $F_p$  sei die implizite Gleichung der Ebene, in der das Polygon  $p$  liegt (**supporting plane**)
- Ein Hidden-Surface-Algo für folgende Szene:

```

if  $F_{t_1}(\text{eye}) > 0$  :
    draw  $t_2$ 
    draw  $t_1$ 
    draw  $t_0$ 
else:
    draw  $t_0$ 
    draw  $t_1$ 
    draw  $t_2$ 

```



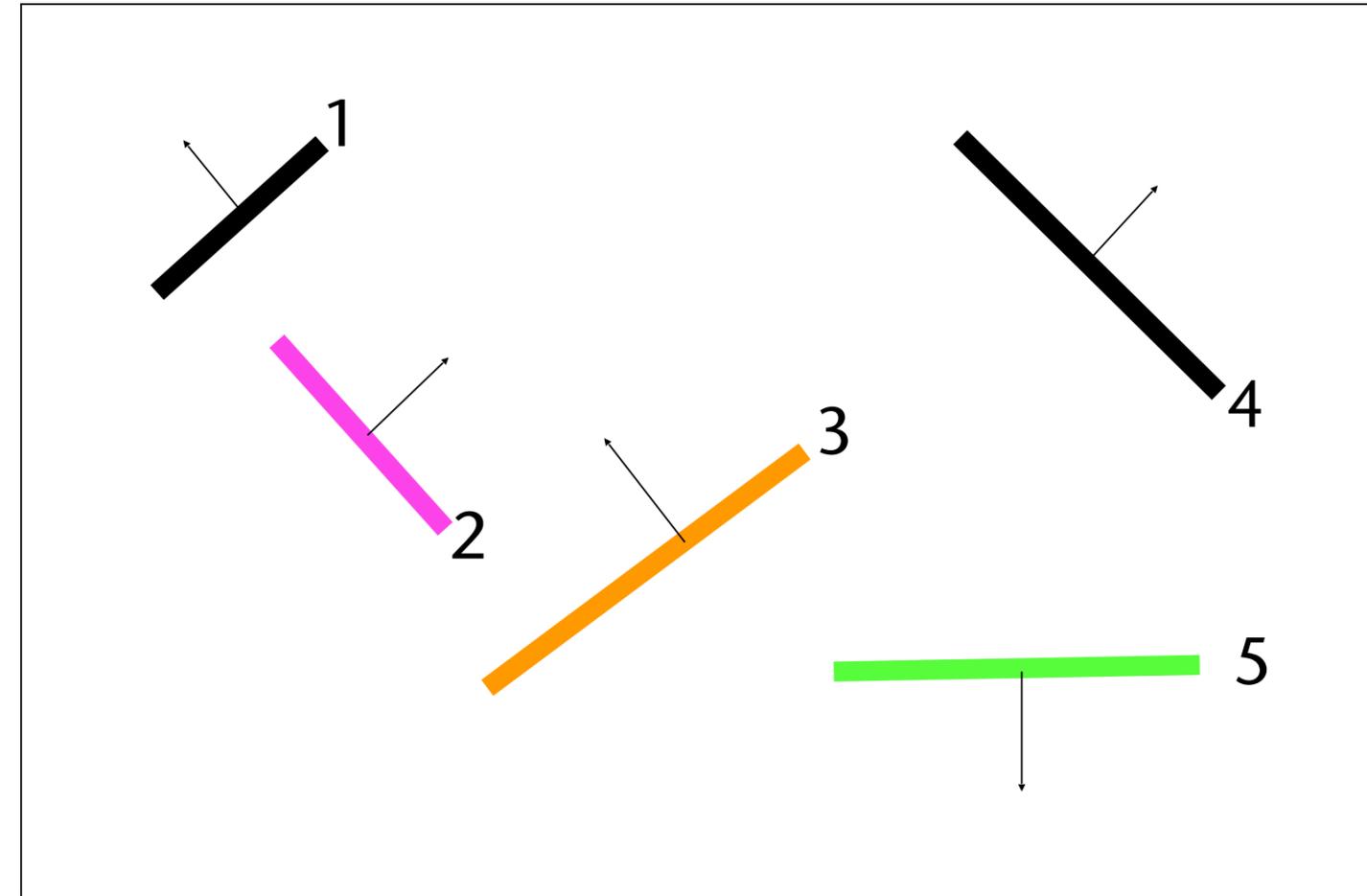
- $F_{t_1}$  = Ebenengleichung für supporting plane von  $t_1$
- Funktioniert für beliebigen Viewpoint!

# Rekursiver Aufbau und (informelle) Definition eines BSP Tree

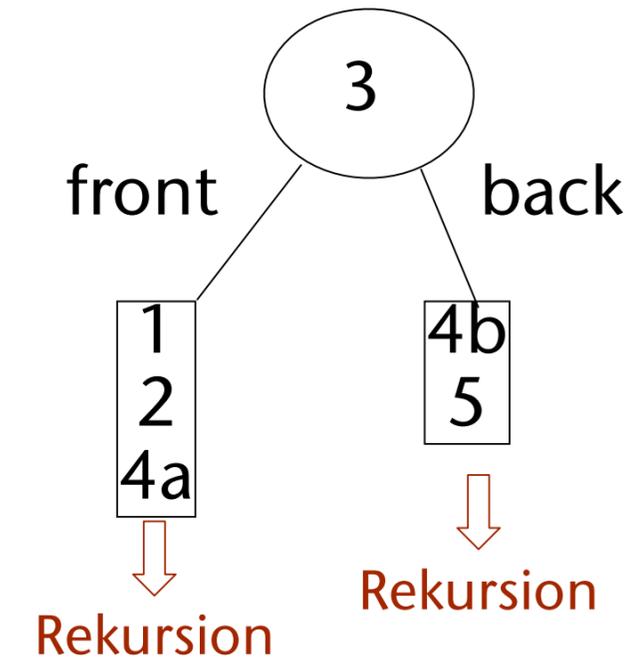
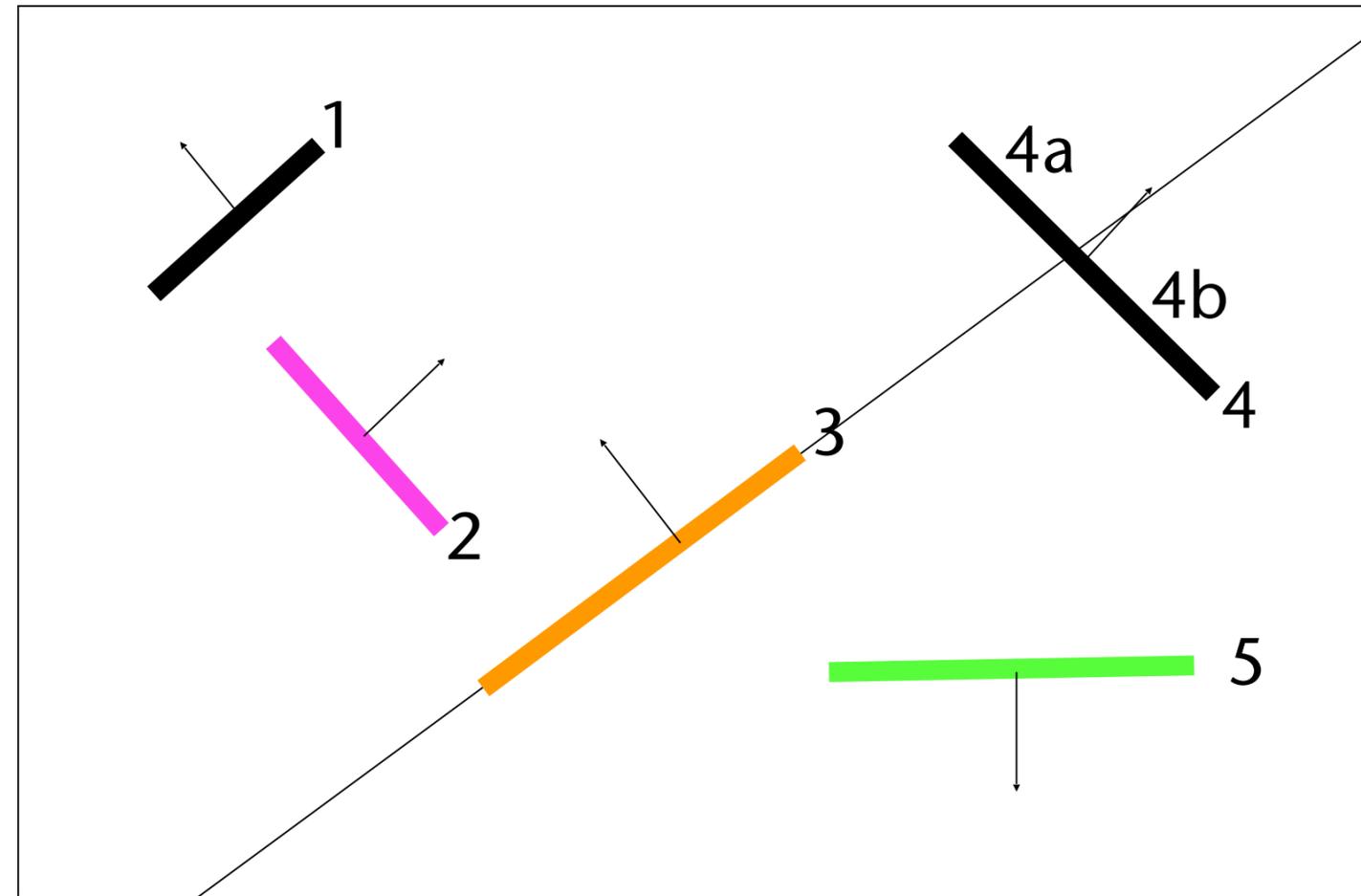
1. Wähle ein (zufälliges) Polygon; erzeuge damit folgenden Wurzelknoten:
  - Speichere dieses Polygon in der Wurzel
  - Das Polygon definiert gleichzeitig eine sog. **Splitting-Ebene**
  - Speichere diese auch in der Wurzel (Normale  $\mathbf{n}$  und Offset  $d$ )
  - Speichere außerdem alle weitere Polygone, die exakt **in** dieser Ebene liegen
2. Partitioniere die Menge der restlichen Polygone in zwei Teilmengen, je nachdem auf welcher Seite sie liegen
  - Schneidet ein Polygon die Ebene, dann unterteile dieses in zwei Polygone, jeweils ein Teil auf einer Seite (*splitting*)
3. Baue rekursiv je einen BSP für alle Polygone auf der negativen bzw. positiven Seite und hänge diese als Kinder an die Wurzel
4. Stop, wenn ein Unterbaum nur noch ein Polygon enthält
  - NB: diese Art BSP heißt **Auto-Partition**

# Beispiel

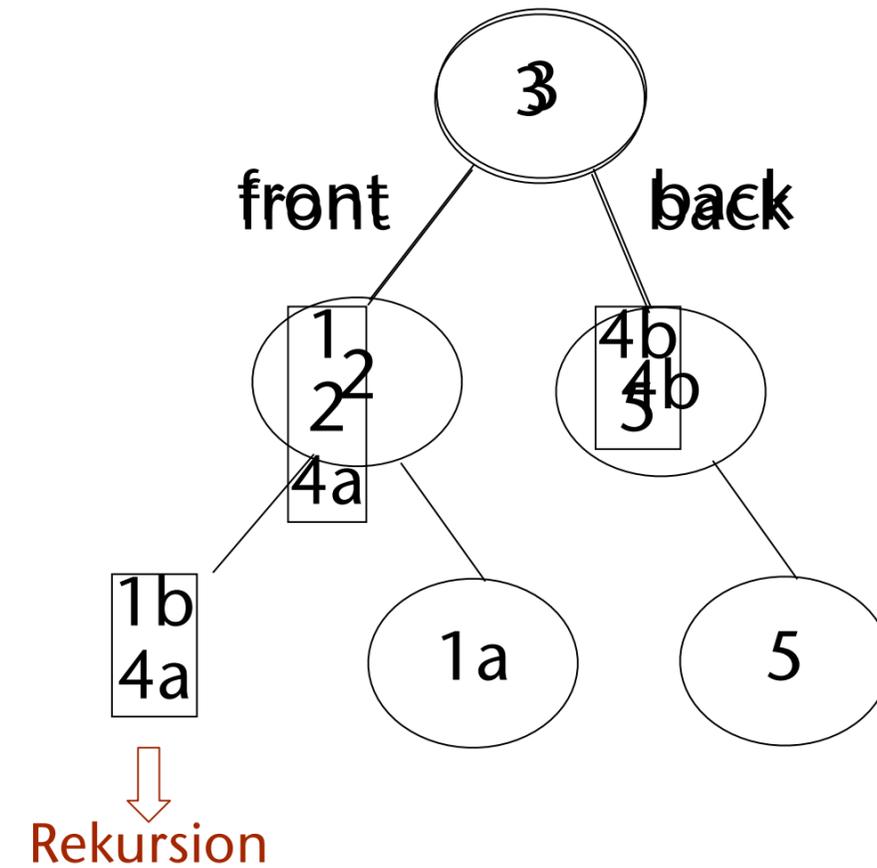
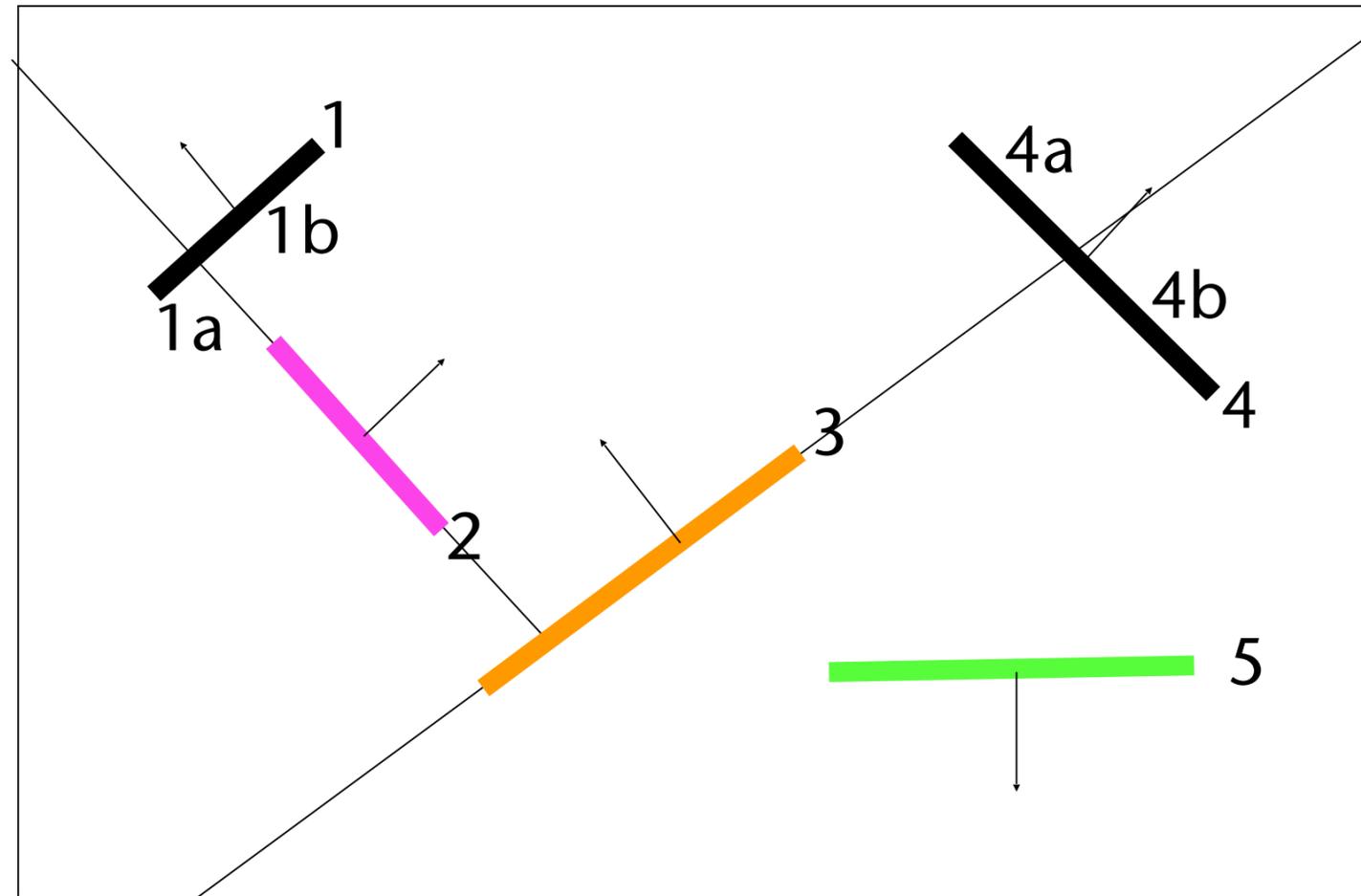
- Ausgangsszene:



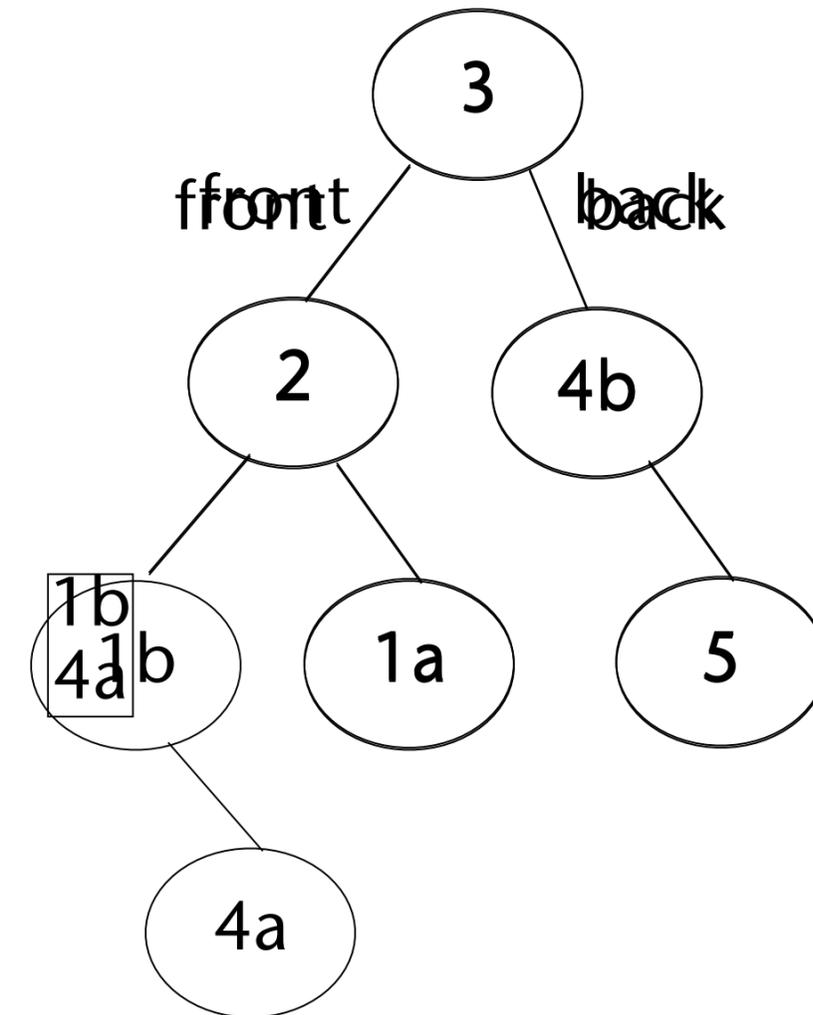
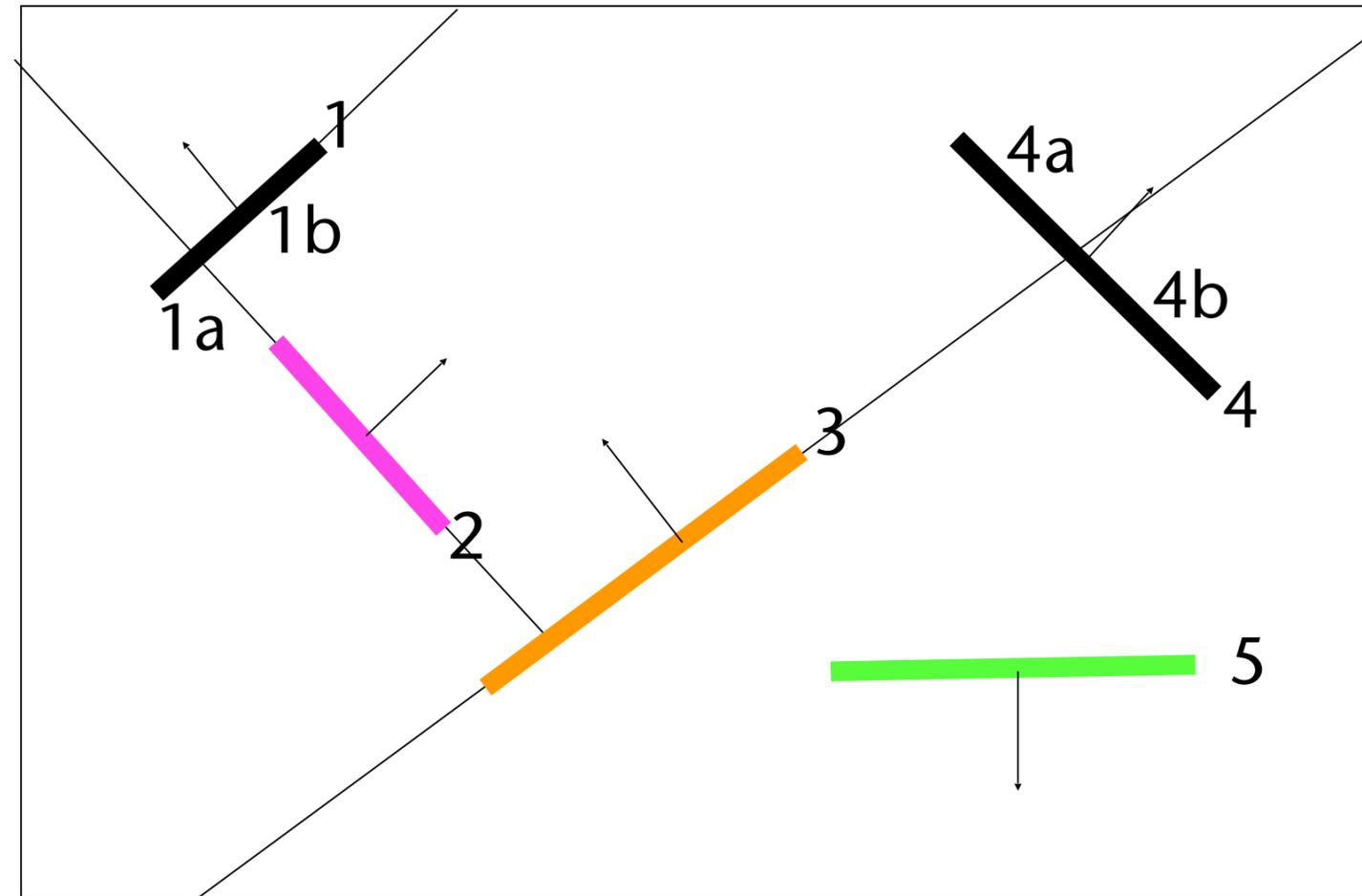
- Wähle z.B. Polygon 3 als Wurzelement



- Wähle Polygon 2 und 4b als nächste Knoten



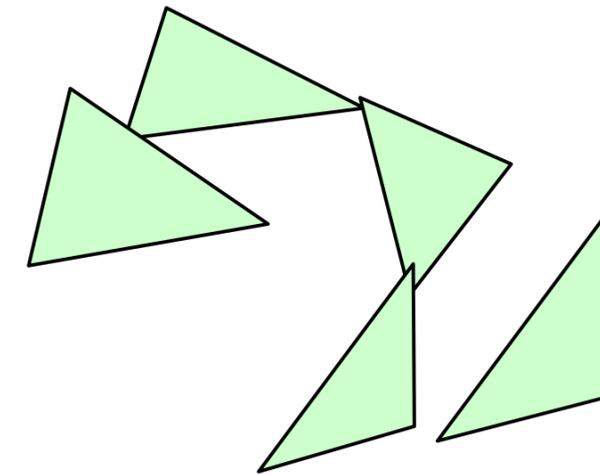
- Nun wähle Polygon 1b als Knoten



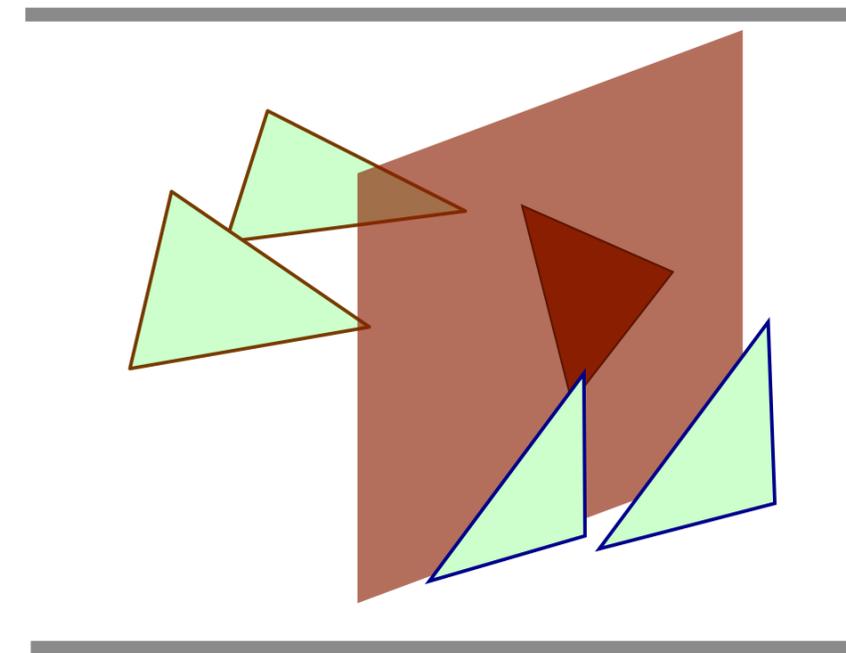
# Der Pseudo-Code zur Konstruktion

```

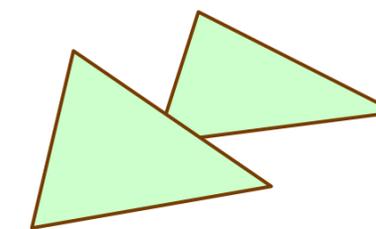
buildBSP( polygons ):
    node = new Node
    node.t = polygons[0] // or pick random
    front = new PolygonSet
    back = new PolygonSet
    if polygons.size > 1:
        for p in polygons:
            if p lies exactly in node.plane: ...
            if p intersects node.plane :
                split p
                do following test with each part
            if p on back-side of node.plane:
                back.push( p )
            else
                front.push( p )
    node.front = buildBSP( front )
    node.back = buildBSP( back )
    return node
    
```



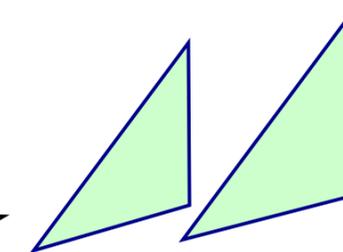
Polygon-Menge



Splitting



Rekursionschritt



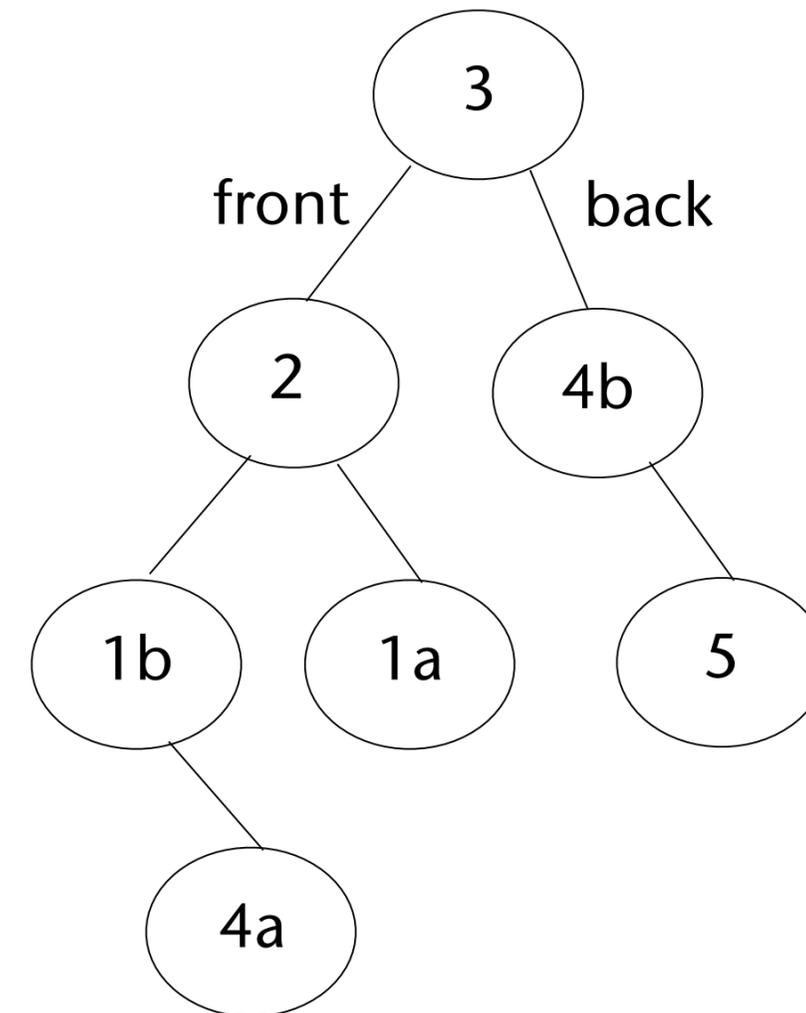
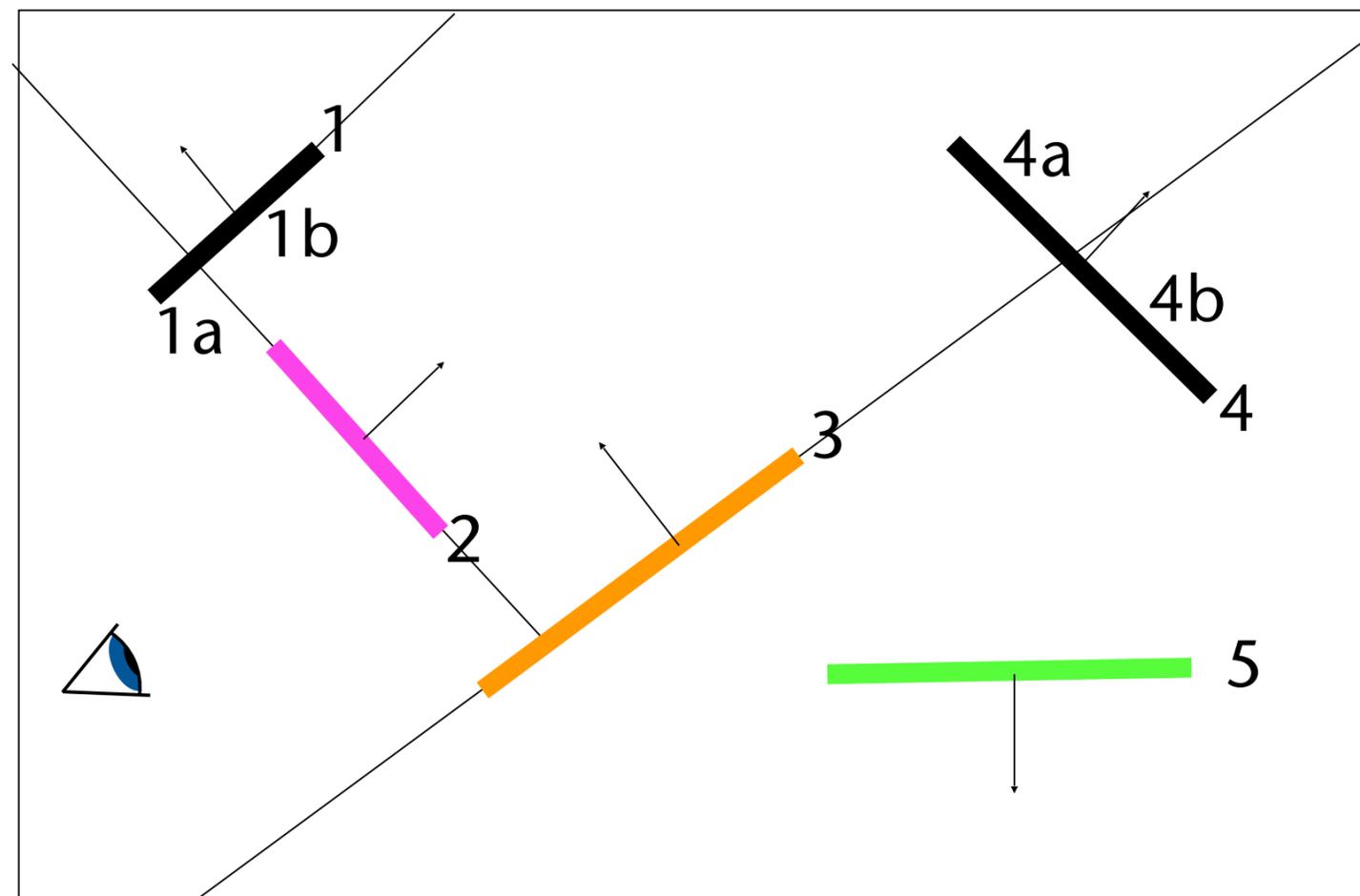
# Der Rendering-Algorithmus mit BSPs

- Rendering (back to front):
  - Beginne bei der Wurzel
  - 1. Zeichne Polygone rekursiv auf der **Gegenseite** vom Viewpoint aus
  - 2. Zeichne Polygon(e) **im** Knoten
  - 3. Zeichne rekursiv Polygone auf der **selben Seite** wie Viewpoint

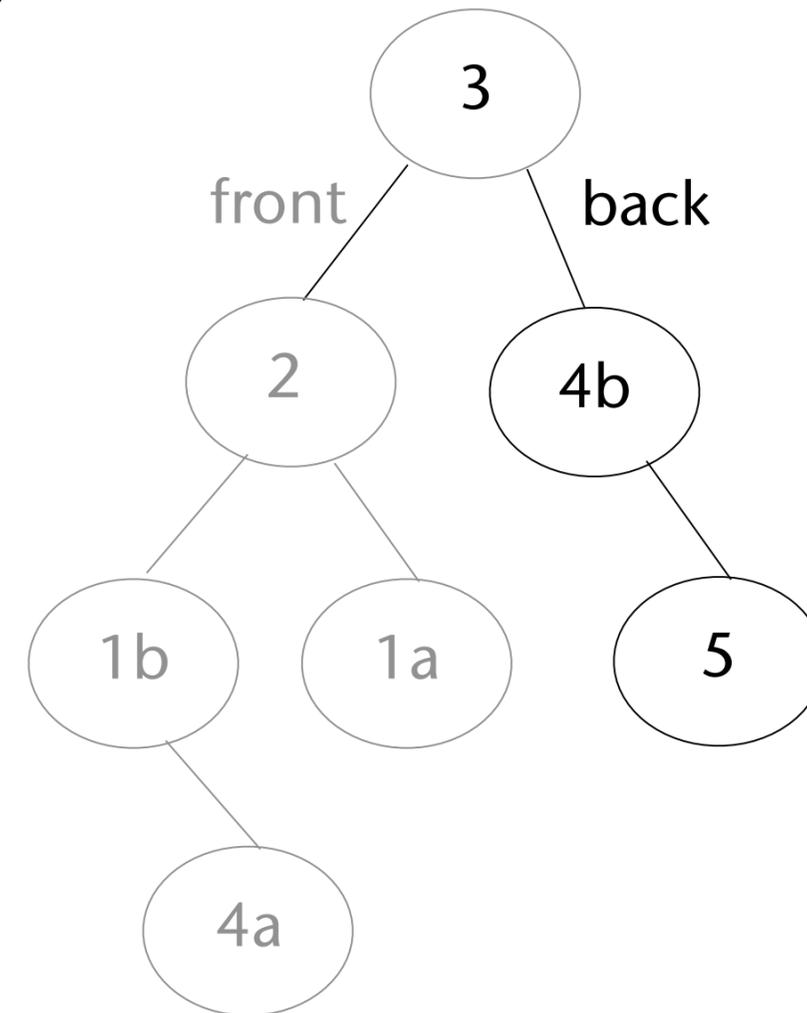
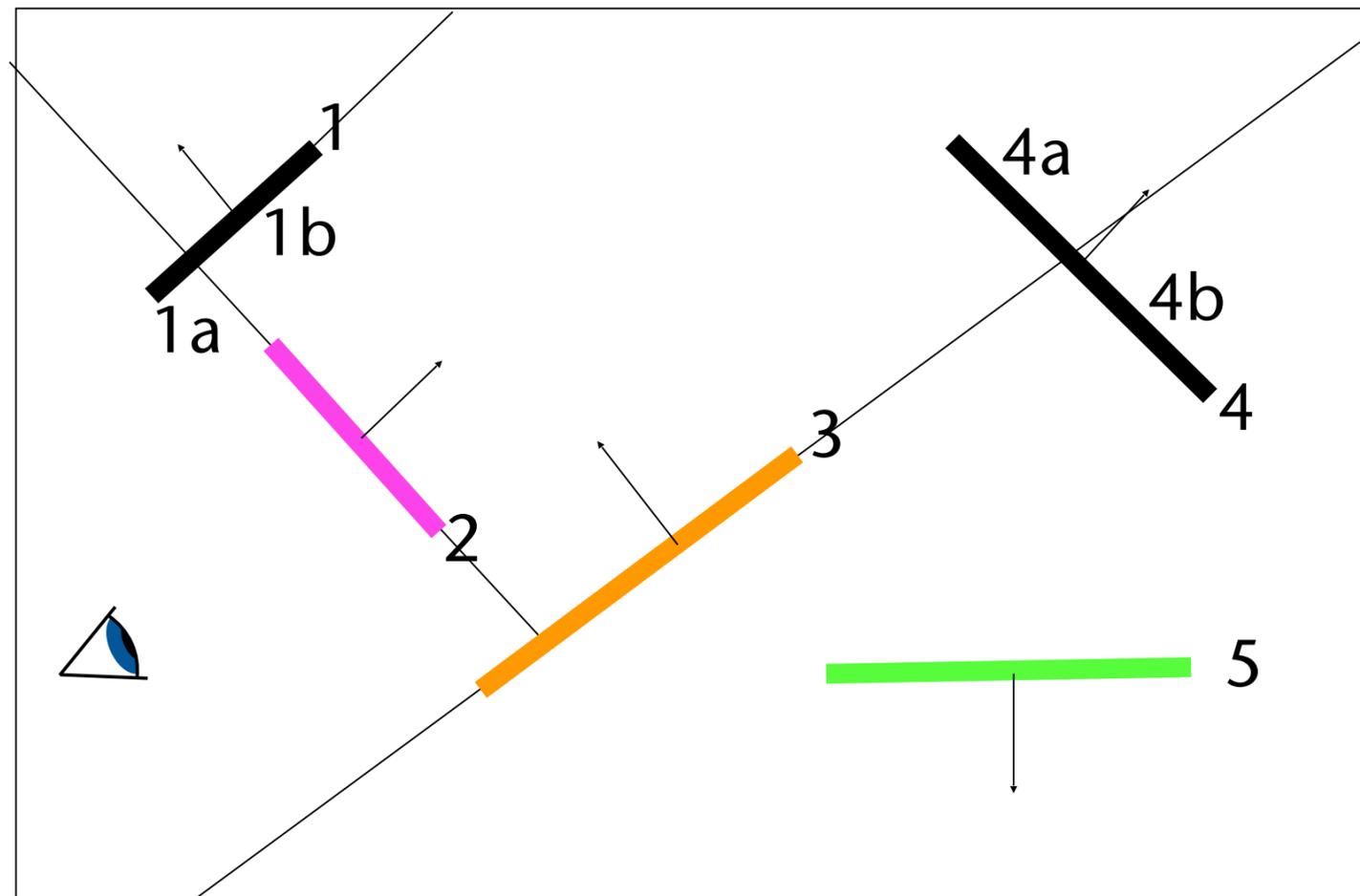
```
draw(node, eye):  
    if node is child:  
        rasterize( node.triangle )  
    if node.plane(eye) < 0 :  
        draw( node.pos, eye )  
        rasterize( node.triangle )  
        draw( node.neg, eye )  
    else  
        draw( node.neg, eye )  
        rasterize( node.triangle )  
        draw( node.pos, eye )
```

# Beispiel fürs Rendering mittels BSP (Traversierung)

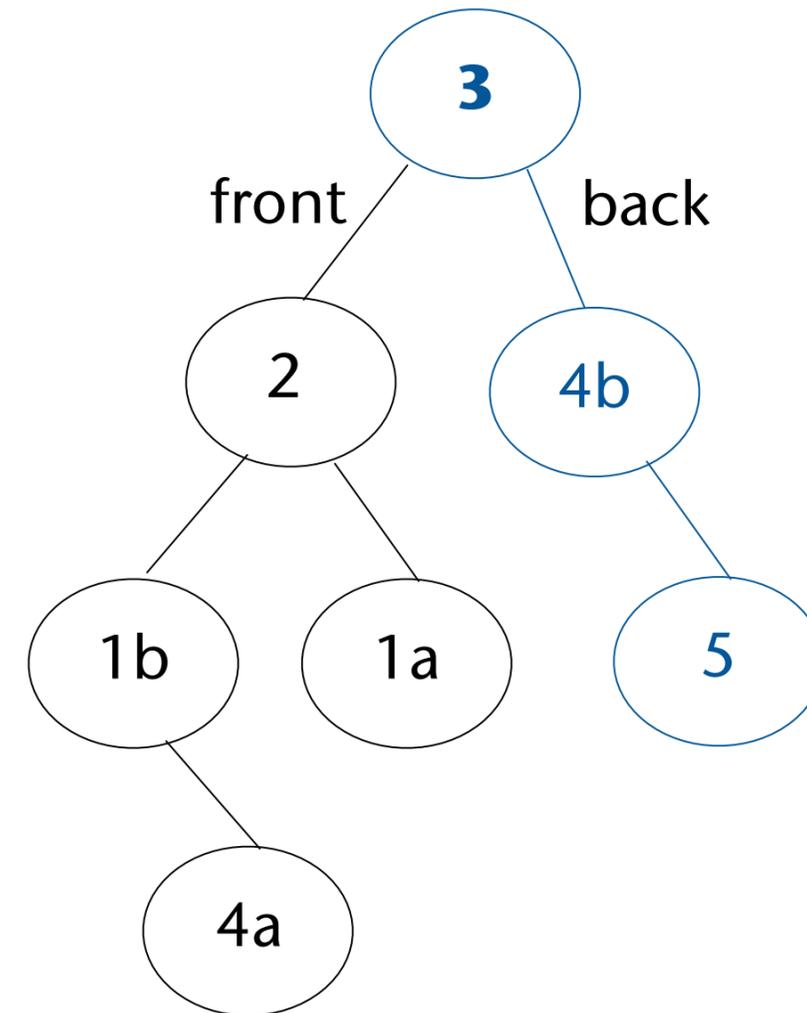
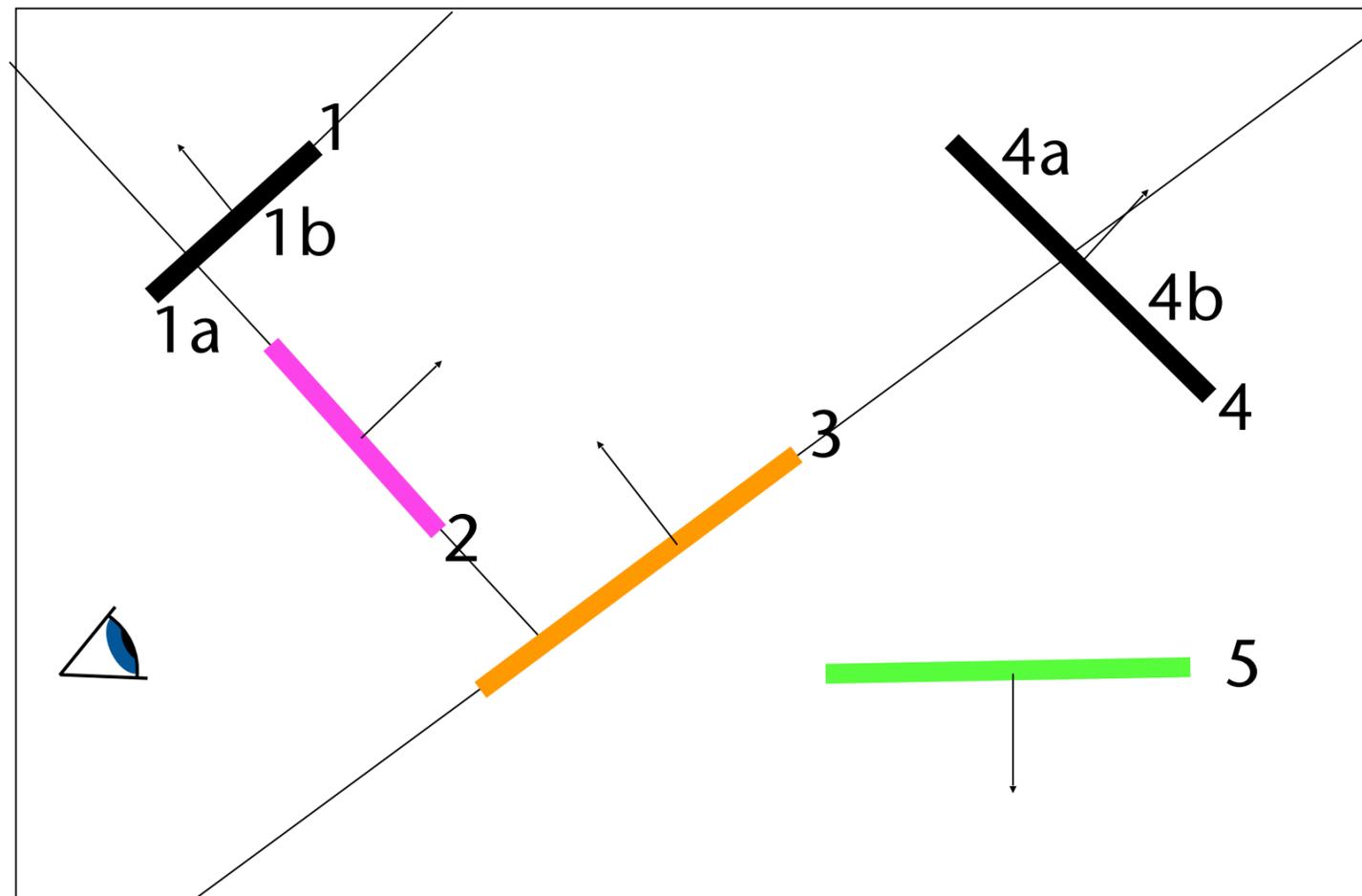
- Angenommen, der Viewpoint befindet sich wie hier dargestellt



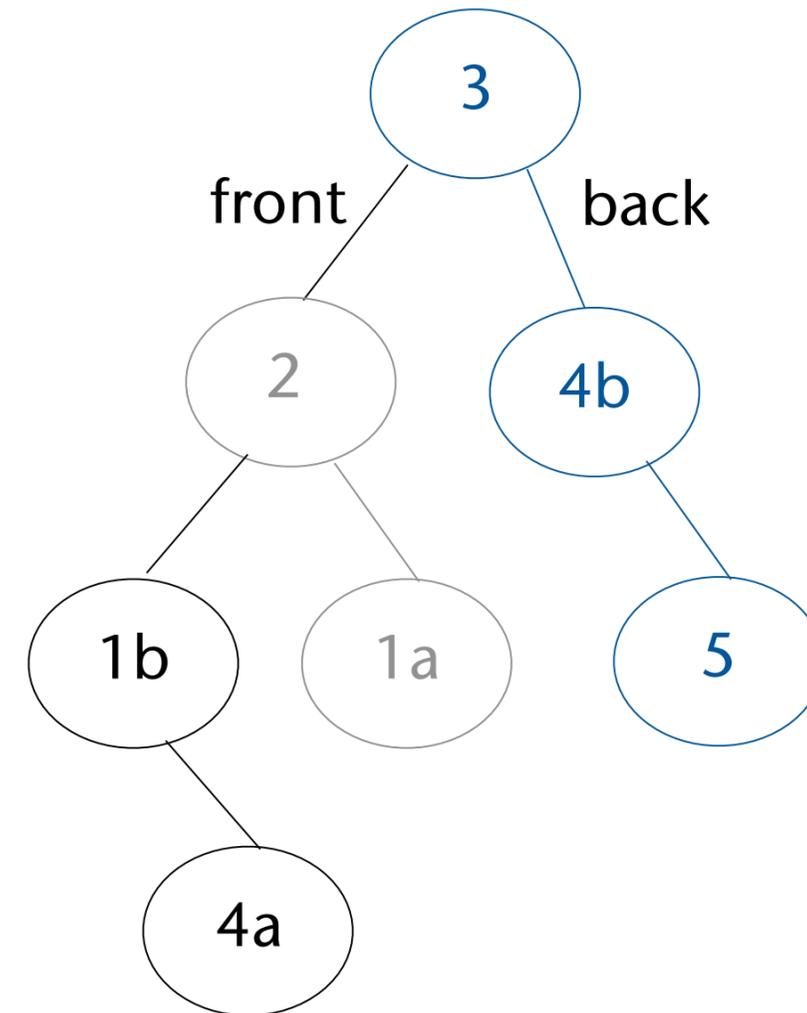
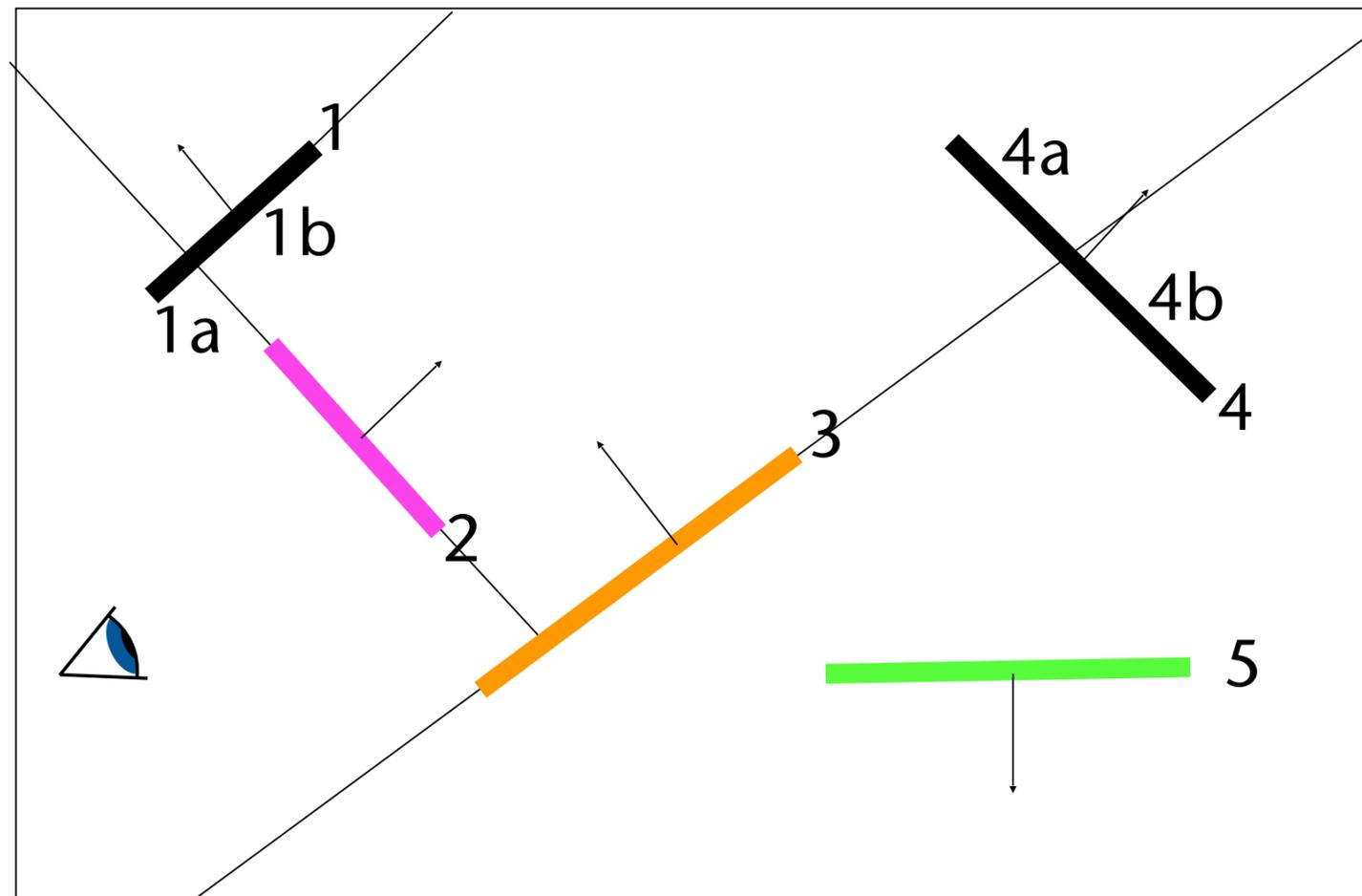
1. Viewpoint liegt auf der **Vorderseite** von 3 → zuerst die Polygone auf der **Rückseite** von 3 rendern
2. Rendere zuerst die Polygone auf der Vorderseite von 4b (nichts), dann 4b, dann auf der Rückseite von 4b (Polygon 5)



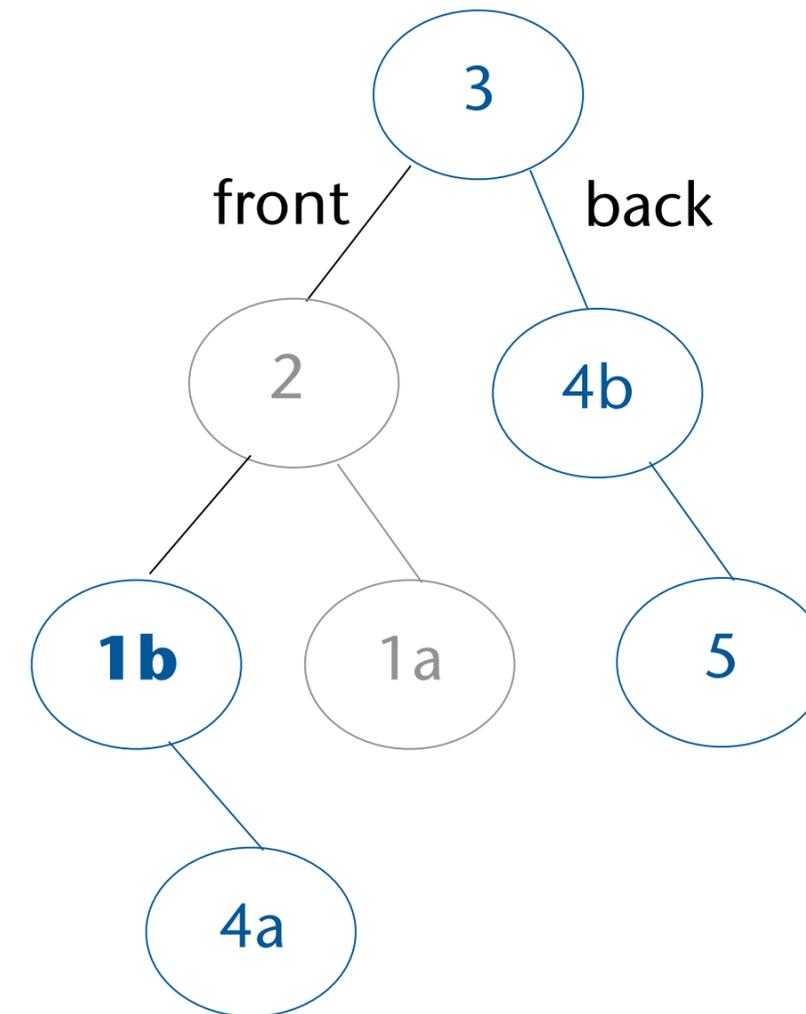
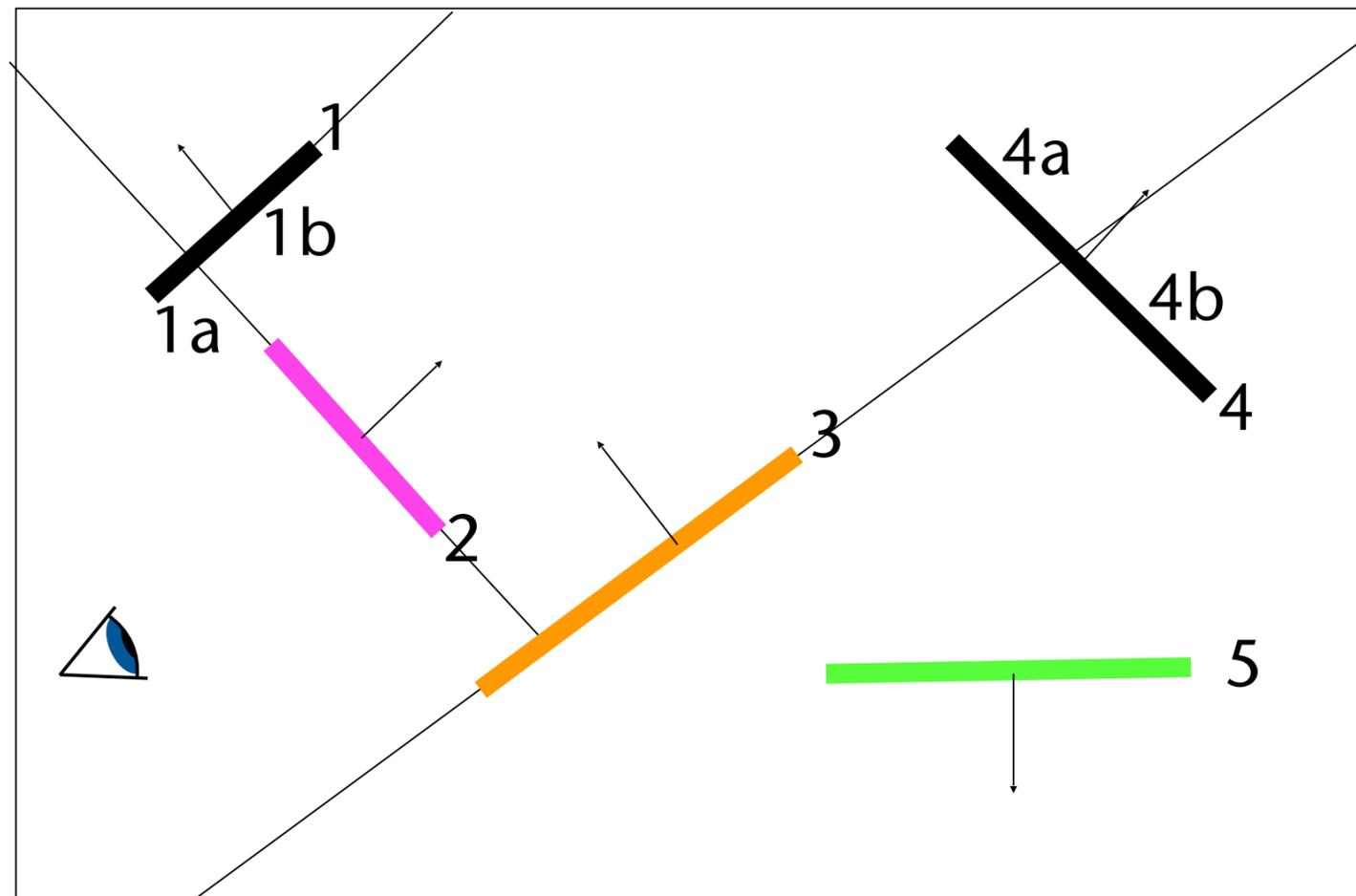
3. Nun (nachdem die Traversierung aus der Rekursion in den rechten Teilbaum zurück kommt) rendern wir Polygon 3 und dann die Vorderseite von 3 (= linker Teilbaum von 3)



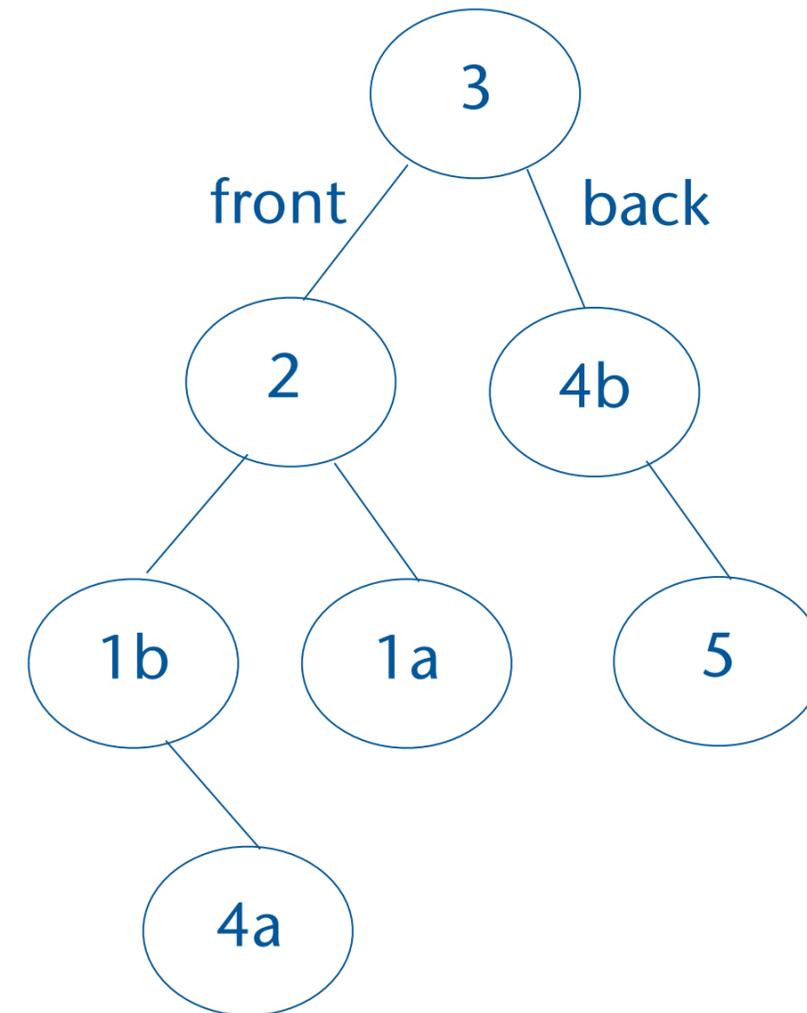
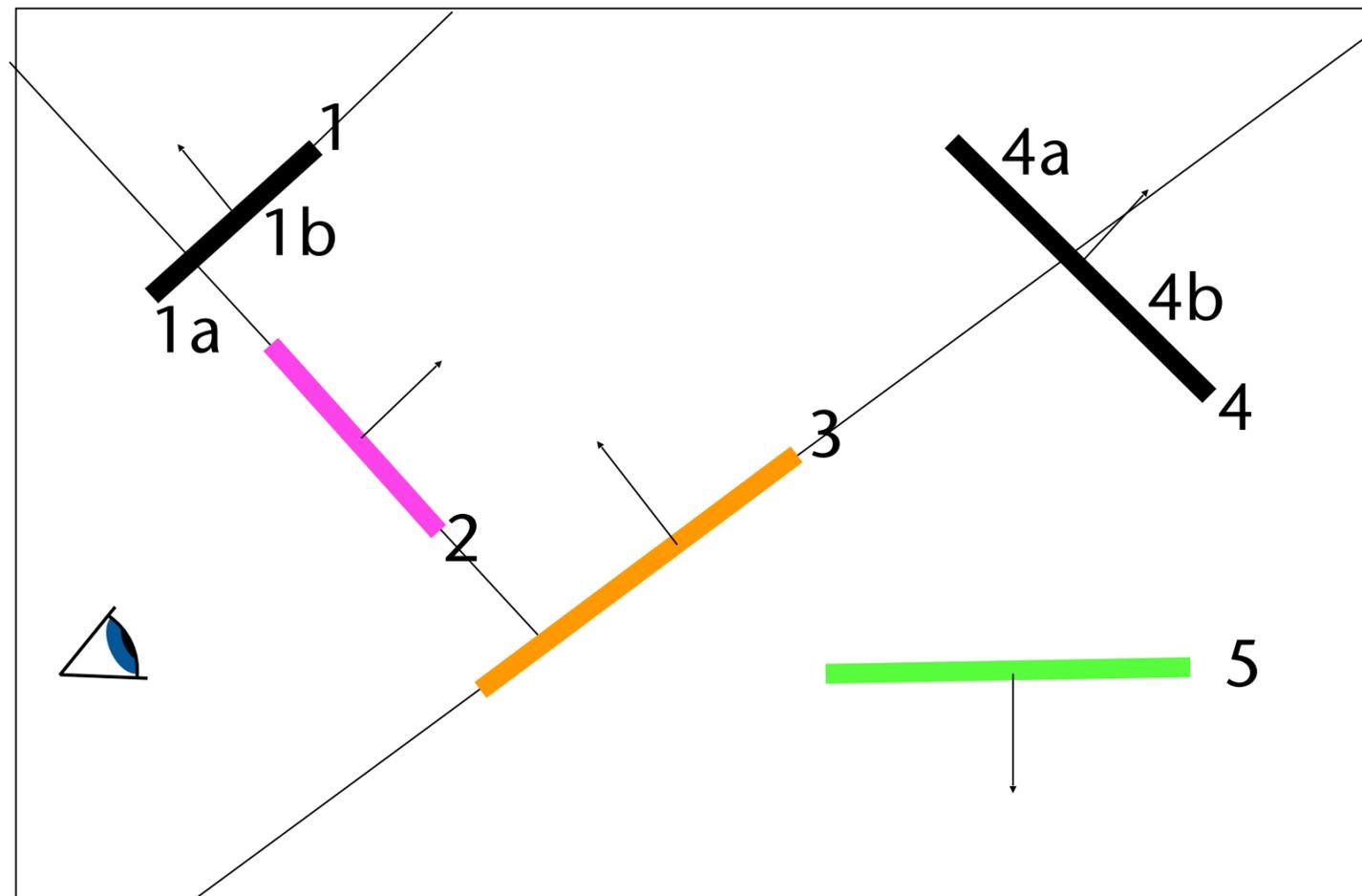
4. Der Viewpoint liegt auf der **Rückseite** von 2, somit werden erst die Polygone auf der **Vorderseite** von 2 gerendert



5. Der Viewpoint liegt auf der **Rückseite** von 1b, somit werden erst die Polygone auf der **Vorderseite** von 1b gezeichnet (nichts)
6. Rendere dann 1b, danach die Polygone auf der Rückseite von 1b, also 4a

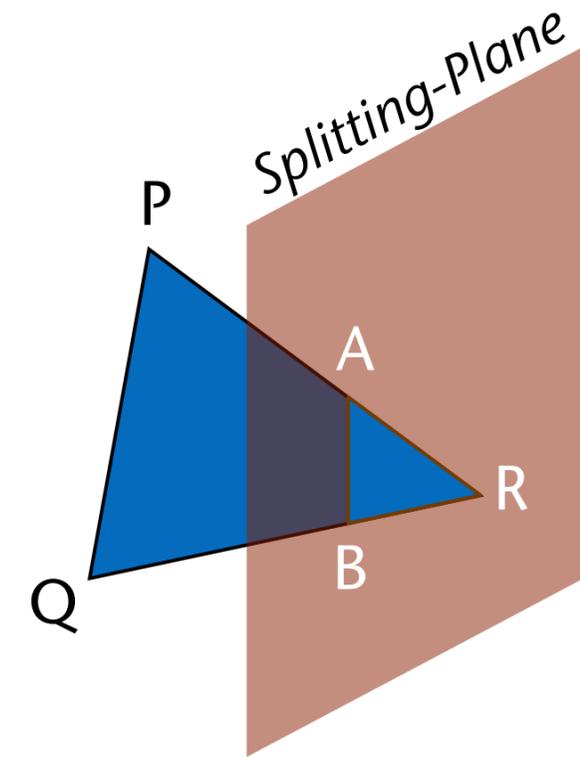


7. Danach rendere 2, danach die Polygone auf der Rückseite von 2, also 1a
- Ergibt Gesamtreihenfolge: 4b, 5, 3, 1b, 4a, 2, 1a



# Splitting von Dreiecken

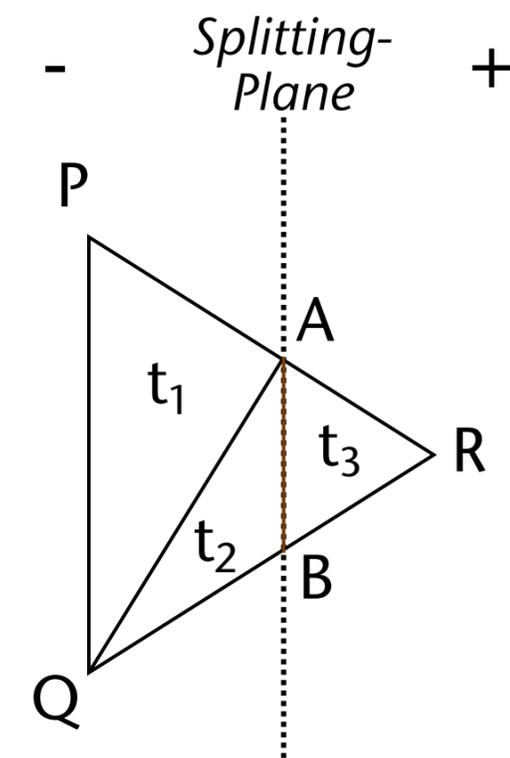
- Dreieck schneidet die Ebene  $\rightarrow$  unterteilen
  - I.A. entstehen 3 neue Teil-Dreiecke
- Achtung: Reihenfolge der Eckpunkte muß beibehalten werden, damit sich Normale nicht ändert!
- O.B.d.A. liegt R allein auf einer Seite der Ebene und es gilt  $F_{\text{plane}}(R) > 0$  :
  - Füge  $t_1, t_2$  in den negativen Unterbaum ein
  - Füge  $t_3$  in den positiven Unterbaum ein



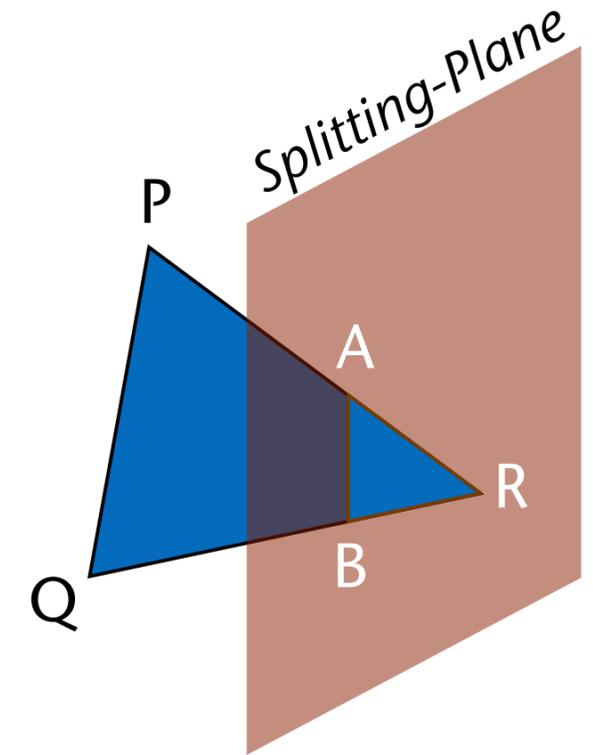
$$t_1 = (P, Q, A)$$

$$t_2 = (Q, B, A)$$

$$t_3 = (A, B, R)$$



- Wie bestimmt man A und B ?
  - A: Schnittpunkt der Gerade zwischen P und R und der Ebene  $F_{\text{plane}}$
  - Verwende Parameterform der Geradengleichung
$$X(t) = P + t(R - P)$$
  - Setze X in die Ebenengleichung ein:
$$f_{\text{plane}}(X) = (\mathbf{n} \cdot X) - d$$
$$= \mathbf{n} \cdot (P + t(R - P)) - d \stackrel{!}{=} 0$$
  - Berechne  $t$  und setze es in  $X(t)$  ein, um A zu berechnen:
$$t = \frac{d - (\mathbf{n} \cdot P)}{\mathbf{n} \cdot (R - P)}$$
  - Wiederhole für B



file:///private/tmp/webgl\_bsptree\_ext/index.html

Teilenweit: Bewerbe... Netzwerk Teilchenwel... Das inoffizielle Apple... 2/6 warten: Hi-Speed... Universitätsmedizin G... Kopfhörer Support | B... 2/6 warten: Hi-Speed... Wie Hochschulverbän... BSP\_WEBGL

BSP-TREE DEMO [CLEAR ALL] [HIDE 3D VIEW (WILL CLEAR ALL)] [RESET 3D VIEW CAMERA]

LMB > DRAW or MOVE  
RMB or CTRL+LMB > DELETE

BSP TREE

PARTITION VIEW

Display a menu

# Abstrakte Sichtweise auf einen BSP

- BSP-Konstruktion: liefert zu einer gegebenen Menge von Polygonen eine Datenstruktur, so dass zu jedem beliebigen Query-Punkt eine Sortierung der Polygonen (bzw. Polygonteile) ausgegeben werden kann
- BSP-Traversierung: liefert zu einem bestimmten Query-Punkt eine sortierte Folge der Polygone (bzw. Polygonteile) ausgegeben wird
  - Das funktioniert von fern zu nah, aber auch umgekehrt
  - Die Blickrichtung ist dabei völlig irrelevant

# Zusammenfassung

## Vorteile

- Sehr effiziente Datenstruktur, um Polygone bzgl. eines Punktes zu **sortieren**
- Unabhängig vom Viewpoint
- Auch für andere Aufgaben geeignet
  - Z.B. Konstruktion von Schnitt u.a. Boole'sche Operationen auf Objekten (CSG) → VL "Comp. Geometry"



## Nachteile

- Evtl. viele kleine Polygonteile (wg Splitting)
- Bei Rendering: starkes Over-drawing (viele Pixel werden "umsonst" geschrieben)
  - Wg. Back-to-front–Sortierung
- Schwierig, den Baum ausgeglichen zu halten
- Ungeeignet für dynamische Szenen

# Weitere Anwendung des BSP Tree: Camera "Collision Test"

- Aufgabe: gegeben sind ...
  - eine Menge Polygone (Szene des Spiels)
  - zwei Punkte  $P_1, P_2$  (= alte/neue Kamera-Position)
  - Teste ob  $P_1P_2$  eines der Polygone (z.B. eine Wand) durchdringt
- Lösung:
  - Baue BSP über der Menge der Polygone (Preprocessing)
  - Algorithmus zur Laufzeit:

```
checkColl( p1, p2, node ):
    d1 = node.distToPlane( p1 )
    d2 = node.distToPlane( p2 )
    if d1<0 && d2<0:
        return checkColl( p1, p2, node.left )
    if d1>0 && d2>0:
        return checkColl( p1, p2, node.right )
    // line p1p2 intersects plane of the node,
    // and (possibly) a polygon in left or right
    return
        intersect( p1, p2, node ) ||
        checkColl( p1, p2, node.left ) ||
        checkColl( p1, p2, node.right )
```

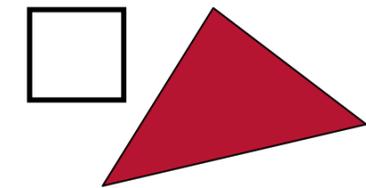
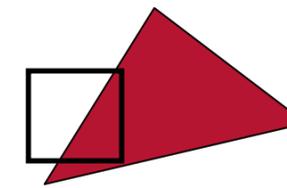
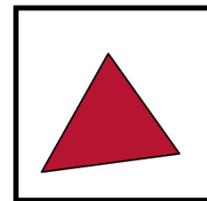
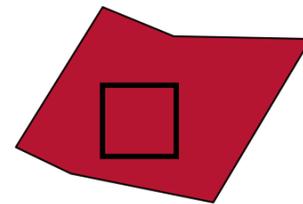
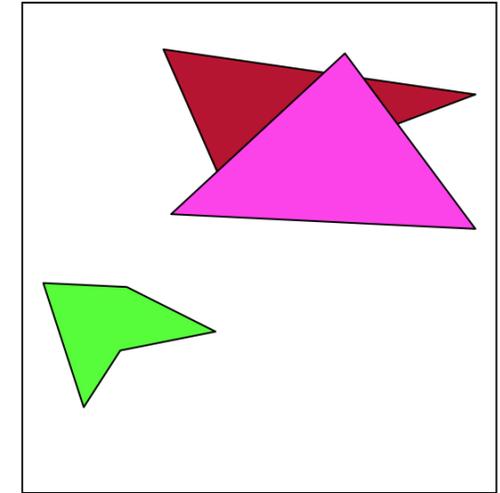
# Warnock's Algorithmus



- Ein Image-Space-Verfahren, das auf einer rekursiven Unterteilung des *image space* (*Bildschirm*) beruht, bis die einzelnen Gebiete "homogen" sind
- Heute nicht mehr relevant (im Moment)
- Demonstriert aber sehr schön folgendes algorithmisches Prinzip:
  - Kann man eine geometrische Entscheidung nicht für den ganzen Bereich fällen, so teile diesen erst einmal auf (hier: Bildraum wird aufgeteilt)
  - Ist im Prinzip eine Variante von **Divide-and-Conquer**
  - Ergibt als Datenstruktur einen sog. **Quadtree**

# Idee

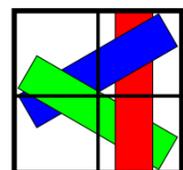
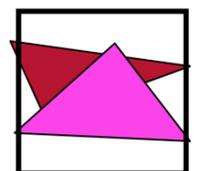
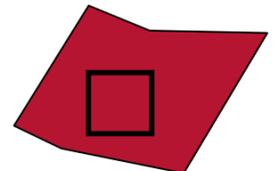
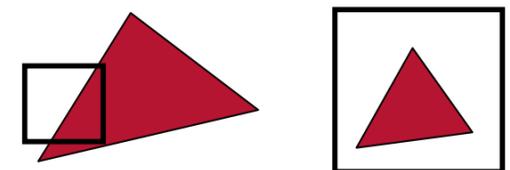
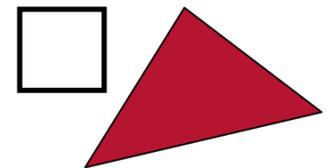
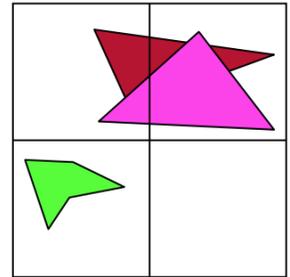
- Unterteile den Bereich in 4 gleiche Gebiete
- Treffe für jedes Teilgebiet die Entscheidung, welches Polygon (vorne) gezeichnet werden soll
- Zwischen einem Polygon  $P$  und einem Gebiet  $G$  gibt es folgende 4 Fälle:



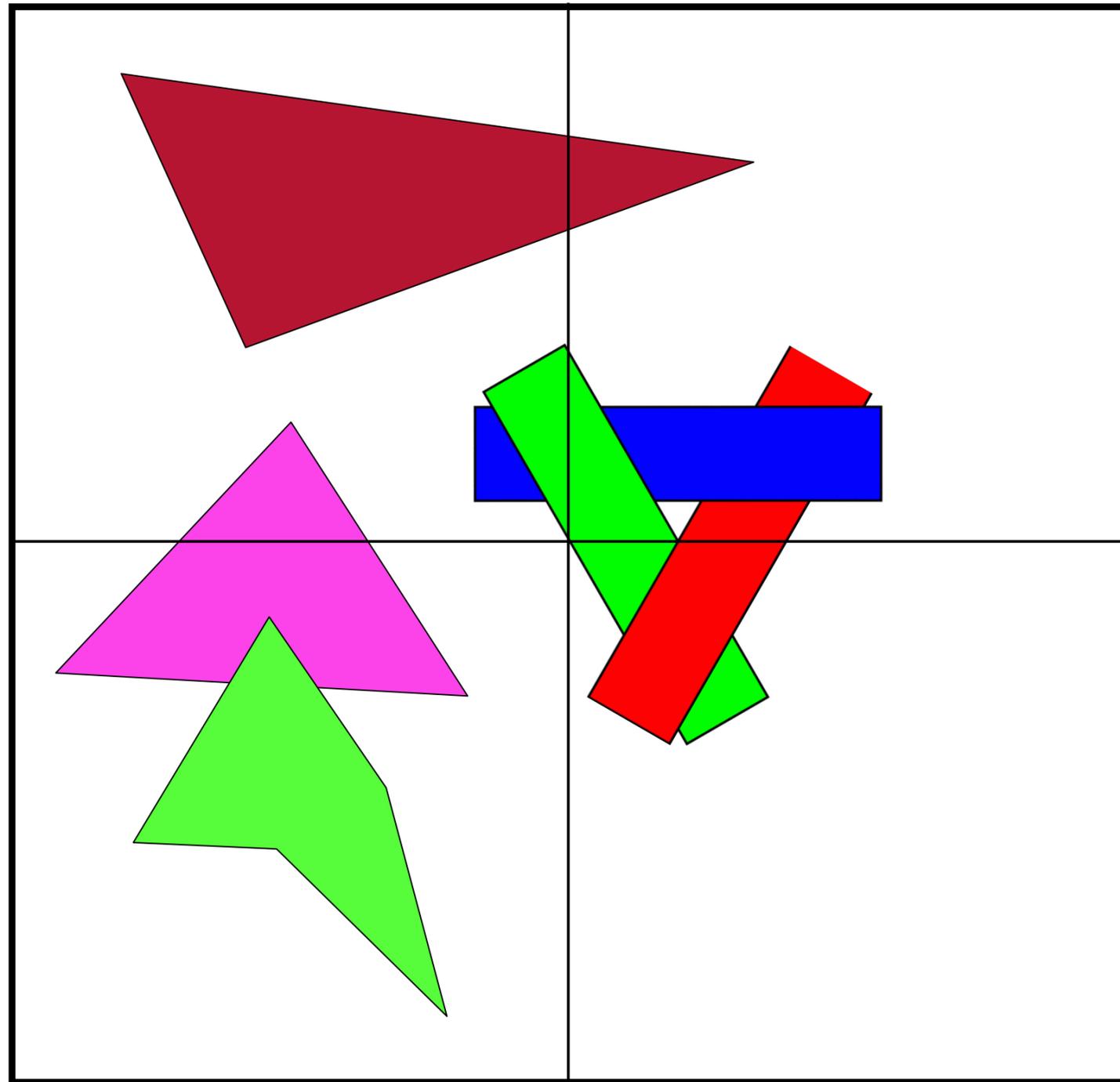
- Beobachtungen:
  - Nicht vom Gebiet geschnittene Polygone beeinflussen das Gebiet nicht
  - Schneidet ein Polygon das Gebiet, so beeinflusst der außerhalb liegende Teil das Gebiet nicht

# Der Algorithmus

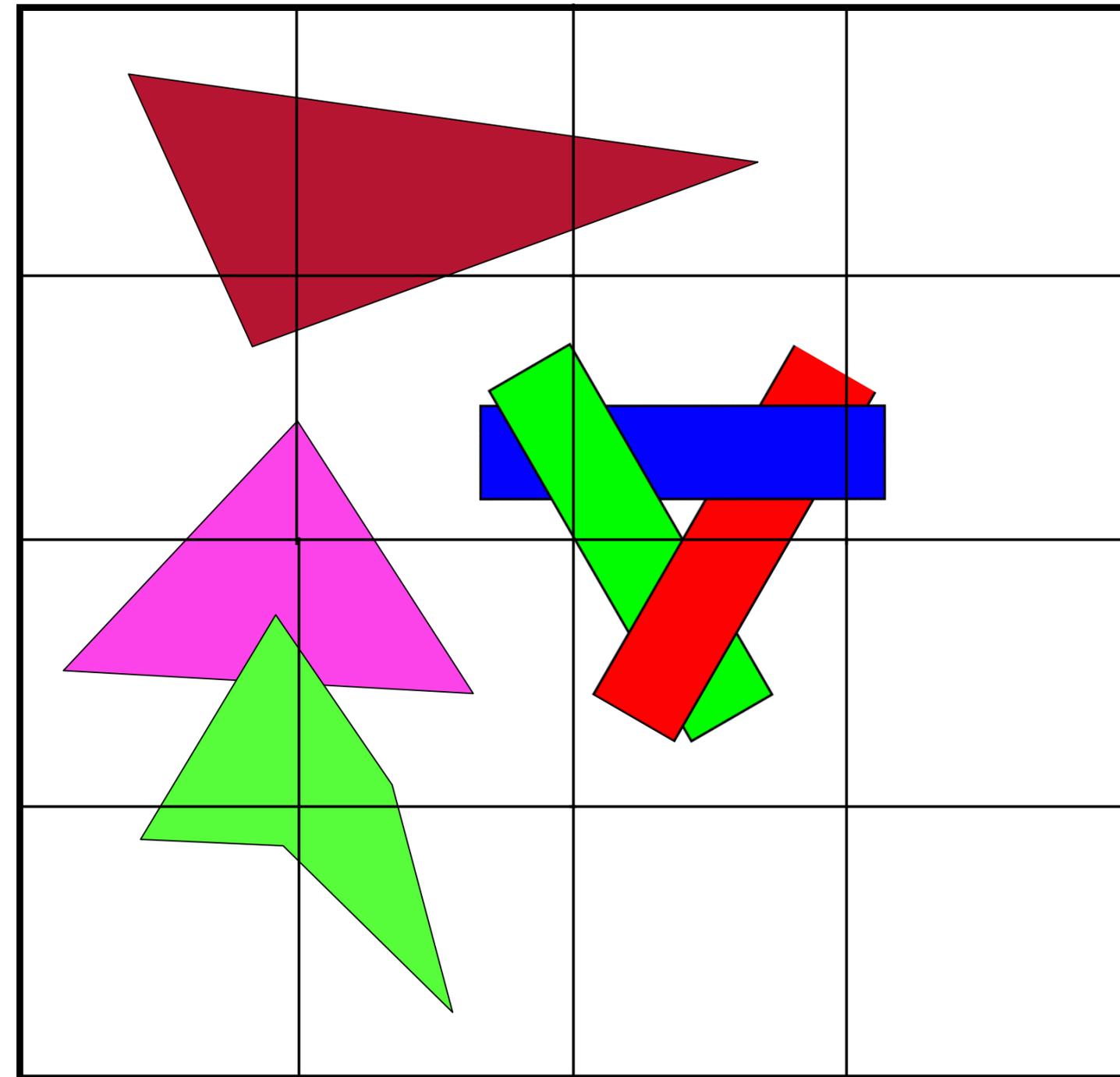
- Unterteile rekursiv den Bildschirm und die Menge der Polygone
- Bei jeder Rekursion wird das Teilgebiet untersucht:
  1. Kein Polygon innerhalb des Gebietes → fülle mit der Hintergrundfarbe
  2. Nur 1 Polygon liegt ganz oder teilweise innerhalb des Gebiets → taste Gebiet pixelweise ab und zeichne mit Hintergrundfarbe/Polygonfarbe, je nach dem ob Pixel außerhalb/innerhalb des Polygons
  3. Wird das Gebiet von genau 1 Polygon umschlossen (kein Schnitt mit einem anderen Polygon) → färbe Gebiet komplett mit der Farbe des Polygons
  4. Wird das Gebiet von mehr als 1 Polygon komplett umschlossen, und ein Polygon liegt vor allen anderen (und es ist leicht zu detektieren) → fülle das Gebiets mit der Farbe dieses Polygons
  5. Anderenfalls: unterteile das Gebiet und fahre mit Rekursion fort
    - Abbruchkriterium: Gebiet = 1 Pixel



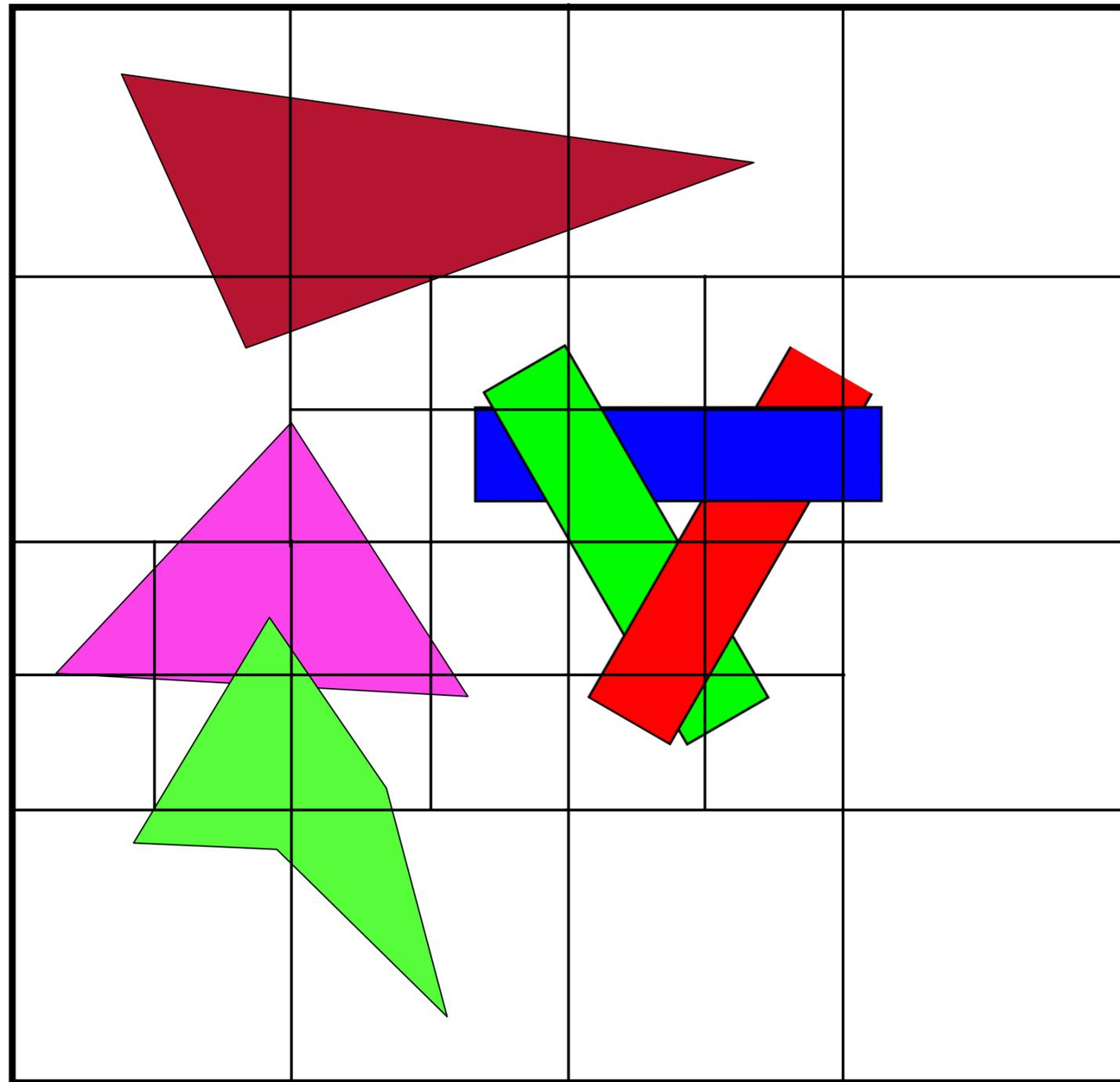
## 1. Unterteilung



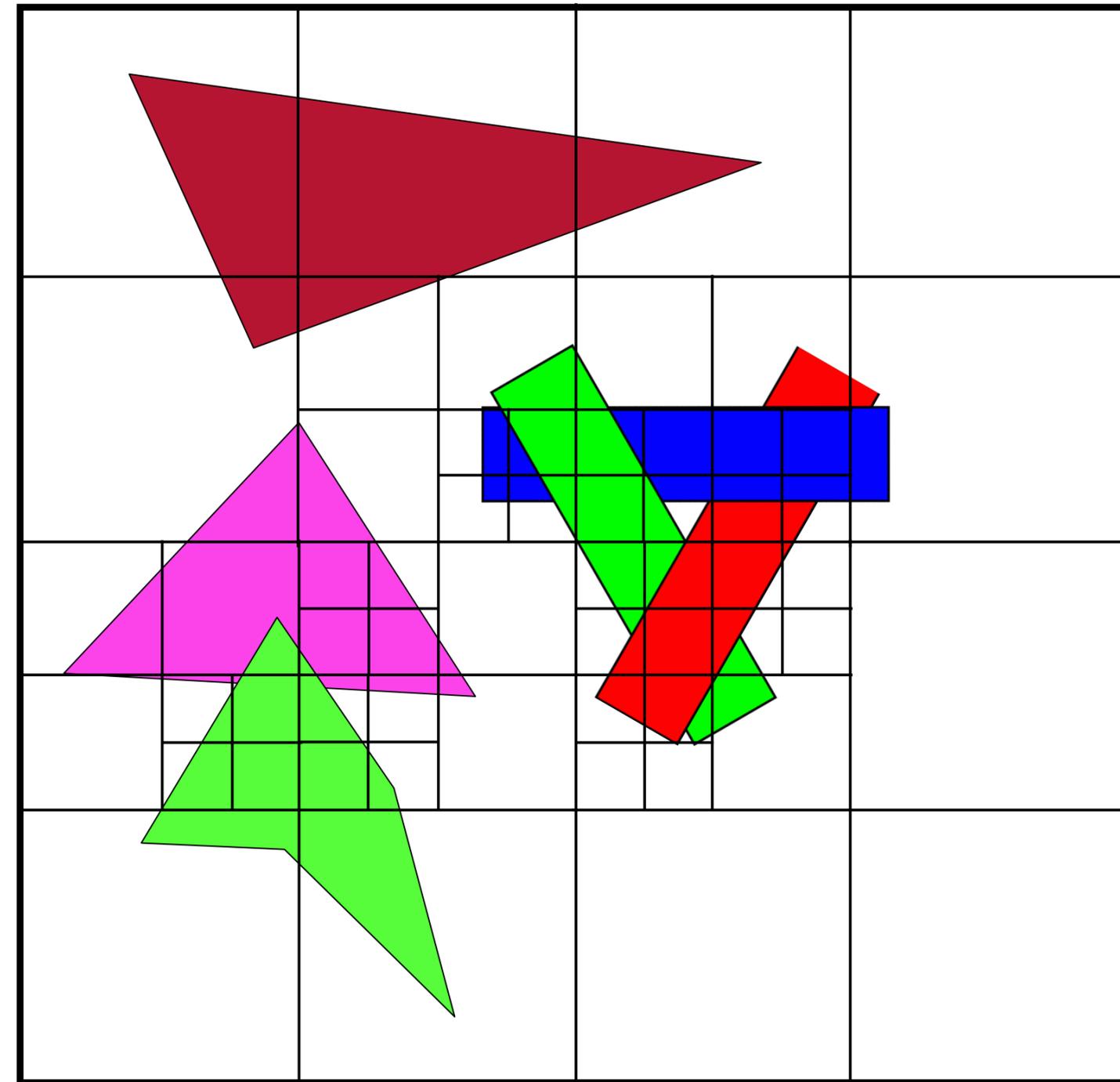
## 2. Unterteilung



### 3. Unterteilung

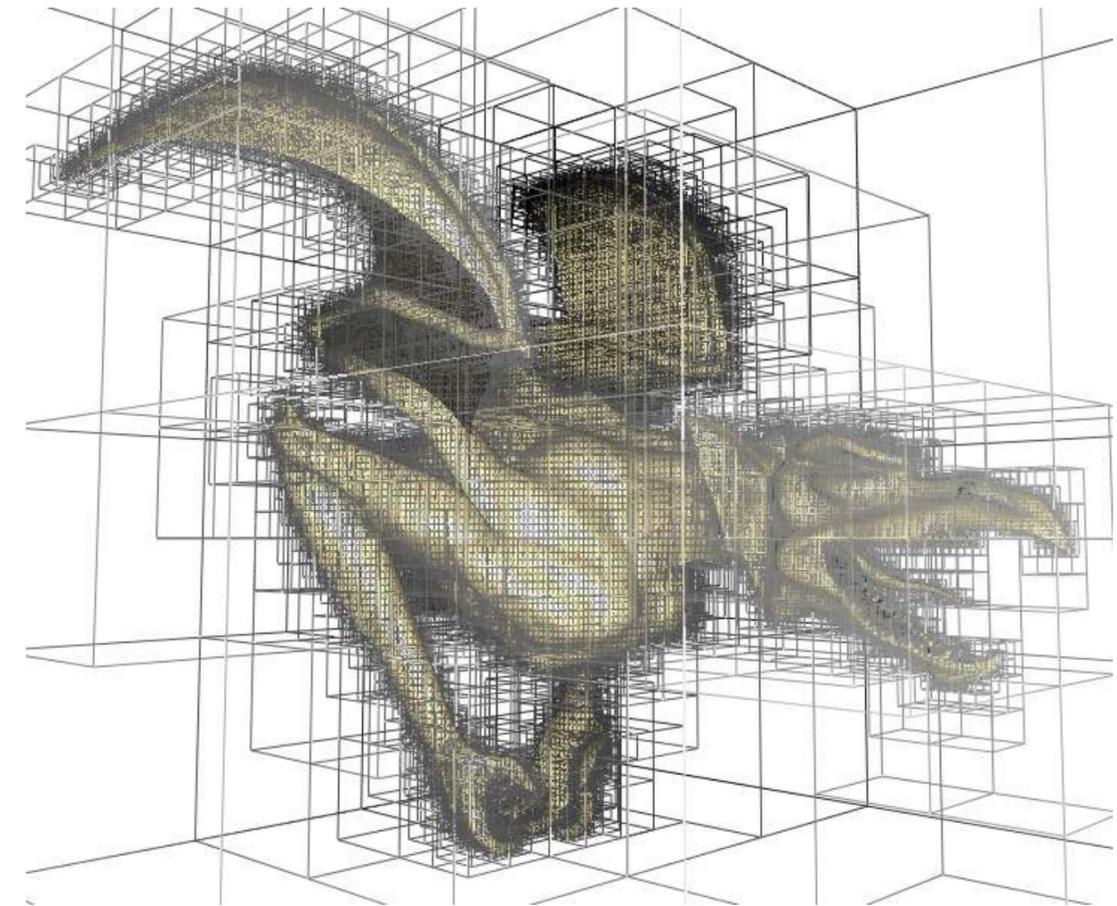


### 4. Unterteilung



# Beispiel-Anwendung: Octree Textures

- **Octree** = 3D-Analgon zu Quadrees
- Anwendung: "Bemalung" eines Meshes
- Problem: Speicherung der Farb-Info
- Konstruktion des Octree: rekursive Unterteilung bis
  1. Blatt leer ist; oder,
  2. maximale Tiefe (Auflösung) erreicht ist
- Nur Blätter vom Typ 2 speichern eine Farbe
- Painting: User "sprüht" Farbe auf Geometrie → Farb-Info der Blätter des Octree wird aktualisiert



- Rendering zur Laufzeit mit Texturierung ("Bemalung") (naïve Version):
  - Rasterisiere Polygone wie bisher
  - Interpoliere nicht Vertex-Farben, sondern die  $(x,y,z)$ -Koordinaten der Vertices im *Object-Space* (erledigt der Rasterizer für uns)
  - Im Fragment-Shader: Traversiere Octree bis zu dem Blatt, das  $(x,y,z)$  des aktuellen Fragments enthält; verwende die in diesem Blatt gespeicherte Farbe
  - Zum Anti-Aliasing: interpoliere zwischen Nachbar-Zellen des Octrees
- Vorteil: keine Textur-Koordinaten nötig! (später)
  - Die 3D-Koordinaten des Punktes (Fragments) im Object-Space reichen
  - Weiterer Vorteil: keine Verzerrungen
- Nachteile: ...

- Ausgelassene Details: MIP-Mapping, Interpolation der Farben in der Octree-Textur, Objekte mit sehr dünner Wand, ...
- Nachteile:
  - Laufzeit zur Texturierung eines Pixels ist sehr verschieden
  - Speicherung ist ineffizient (?)

Master- oder  
Bachelor-Arbeit!

# Ein "Stencil" im echten Leben

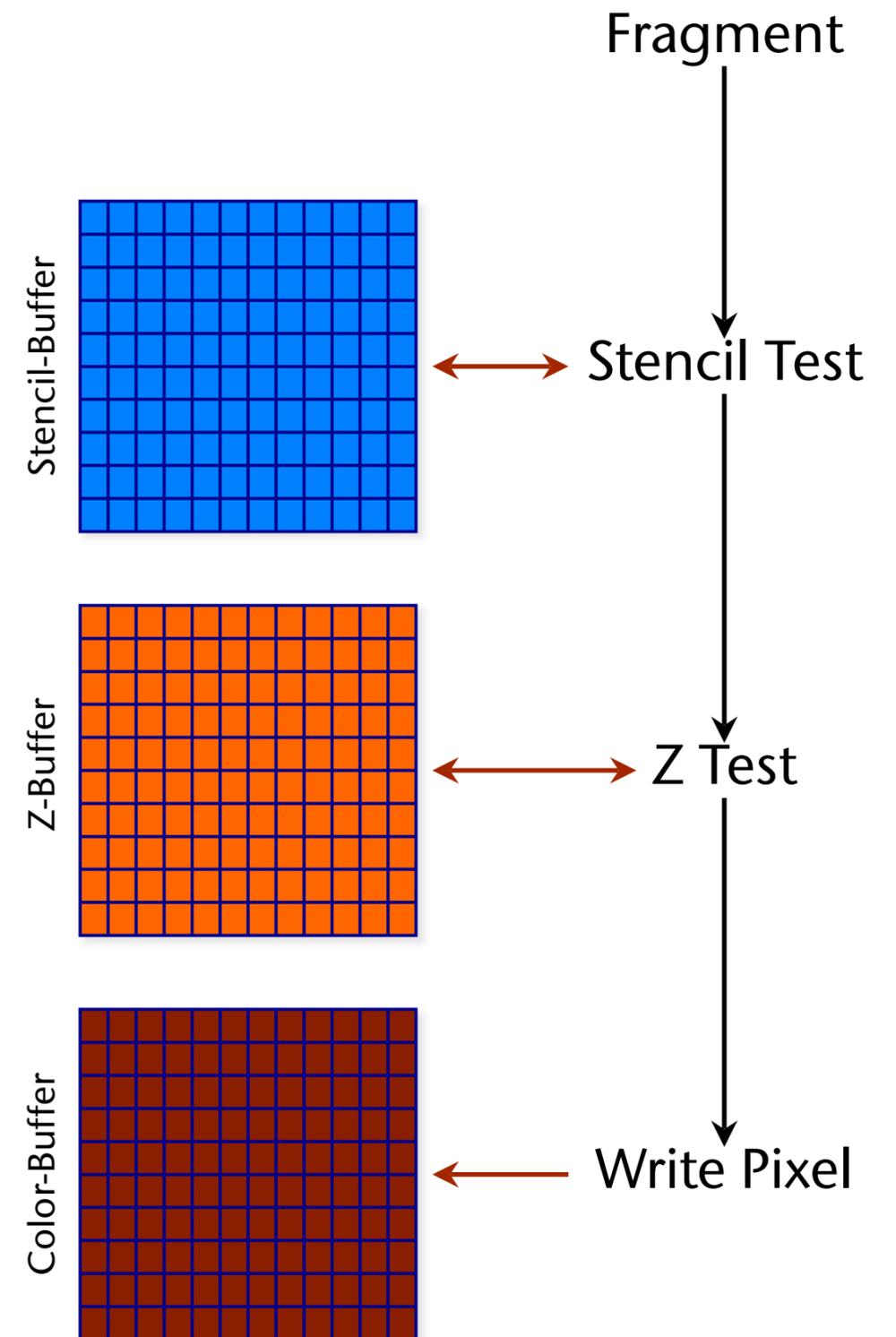


# Der Stencil Buffer

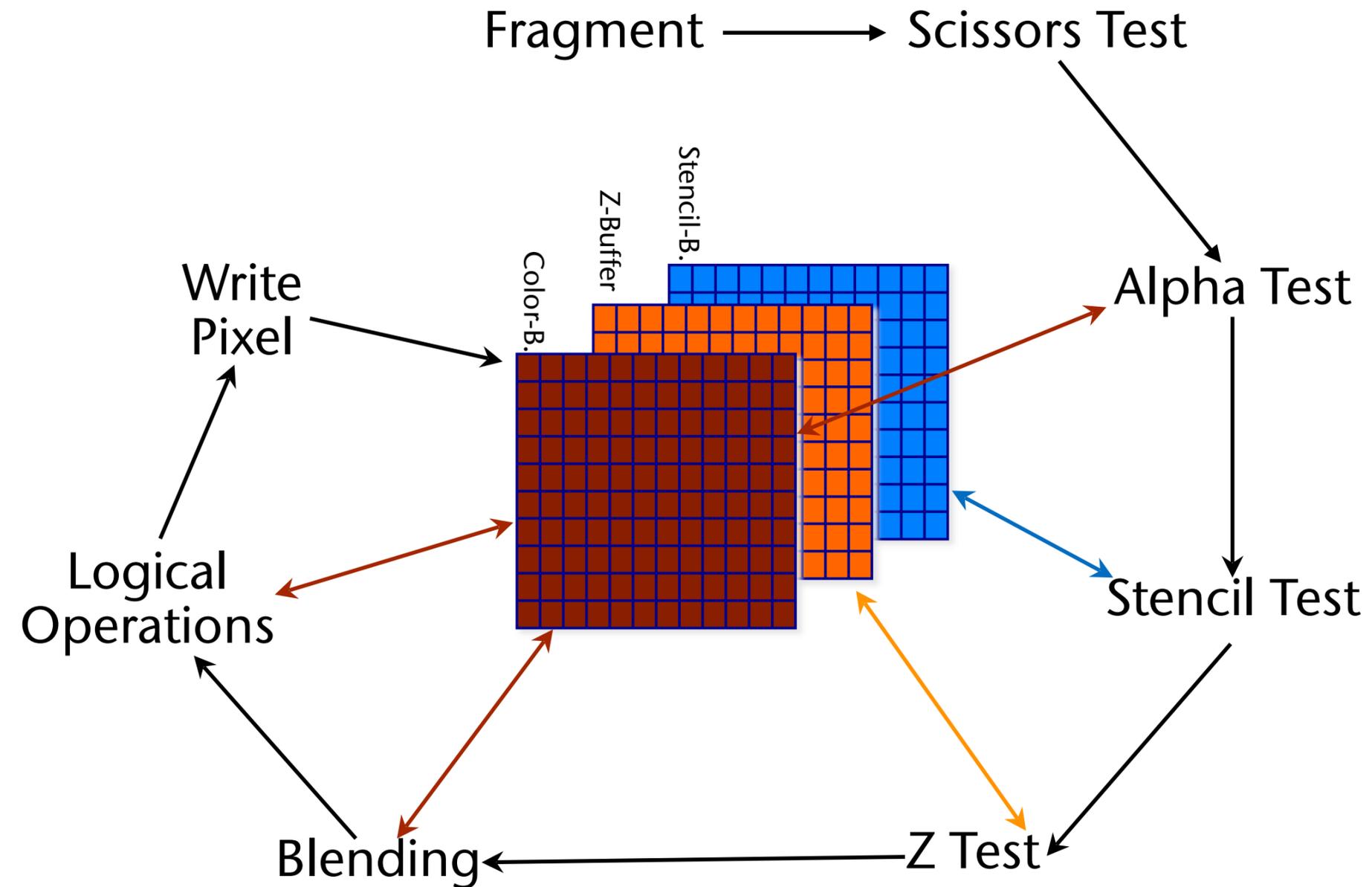
- Der Stencil-Buffer ist eine Art "Vergleichs-Buffer"
  - Ähnlich zu Z-Buffer (*test & pass/kill*), aber mit anderen Features
- Die zwei Operationen bei eingeschaltetem Stencil-Buffer:
  1. **glStencilFunc** (**GLenum func**, **GLint ref**, **GLuint mask**): der *Stencil-Test*, legt fest, ob in den *Color-Buffer* geschrieben wird
    - Form des Tests:  $s \quad \mathit{func} \quad \mathit{ref} \quad \mathit{mask}$
    - $s$  = aktueller Wert im Stencil-Buffer an der Pixelstelle,  $ref$  = ein Referenzwert,  $mask$  = Bit-Maske
    - Mögliche Operationen für  $\mathit{func}$ : `GL_LESS`, `GL_GREATER`, `GL_EQUAL`, etc.
  2. **glStencilOp** (**GLenum sfail**, **GLenum zfail**, **GLenum zpass**): die *Stencil-Operation*, legt für jeden der 3 Fälle fest, welche Operation auf den Wert im *Stencil-Buffer* ausgeführt wird
    - Mögliche Operationen: `GL_ZERO` = Stencil löschen, `GL_INCR` = gespeicherten Stencil-Wert erhöhen, `GL_DECR` = gespeicherten Stencil-Wert erniedrigen, u.a. ...

# Die Reihenfolge der Tests

```
doStencilAndZTest( int x, int y, int z, color f ):
  // stencil test
  check stencilbuf[x,y] against reference value
  if stencil test failed:
    perform sfail operation on stencilbuf[x,y]
  else:
    // z-test
    if z > zbuffer[x,y]:
      perform zfail operation on stencilbuf[x,y]
    else:
      colorbuf[x,y] = f
      perform zpass operation on stencilbuf[x,y]
```

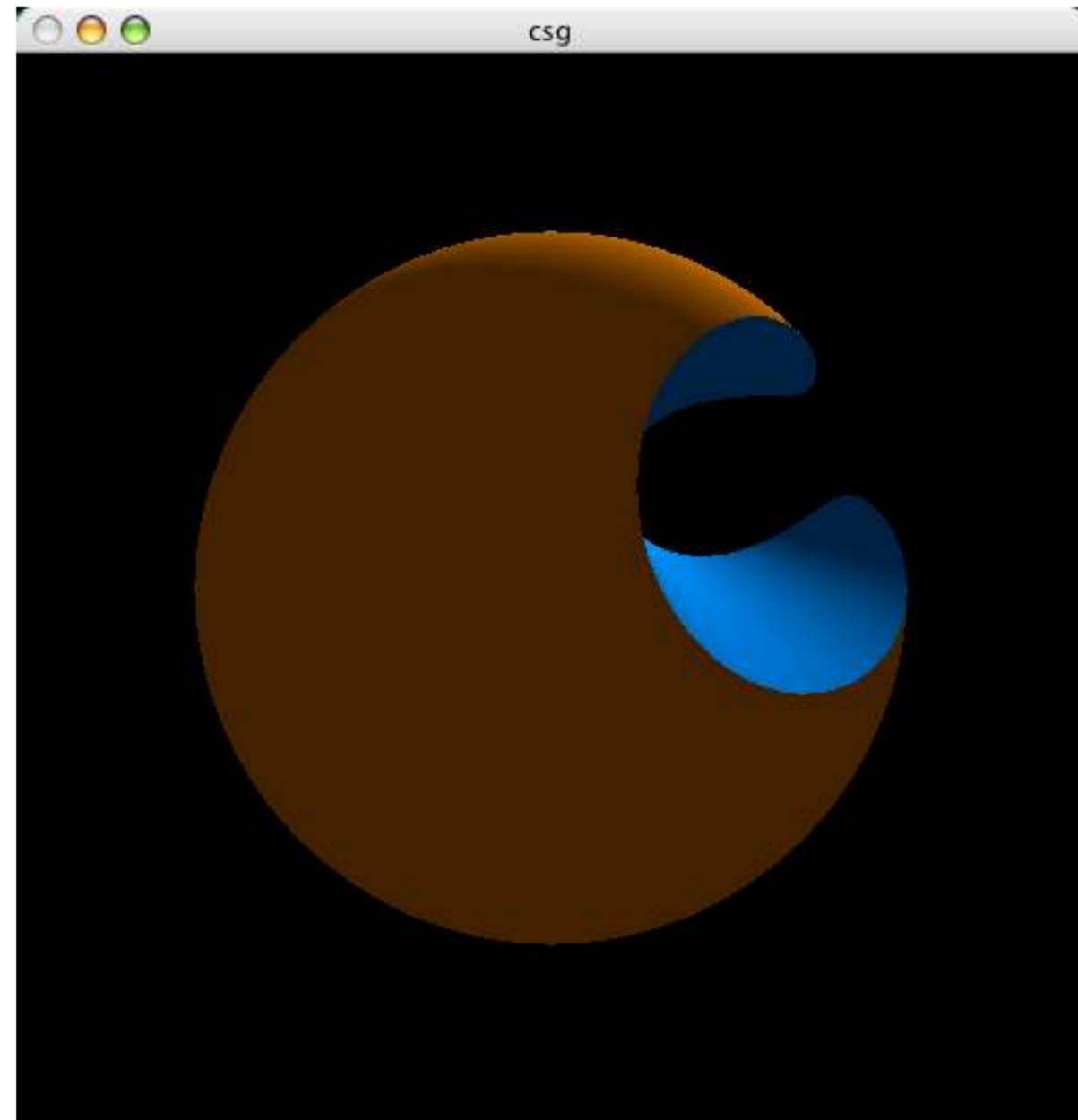


# Die volle Abfolge von Tests und Operationen in der GPU

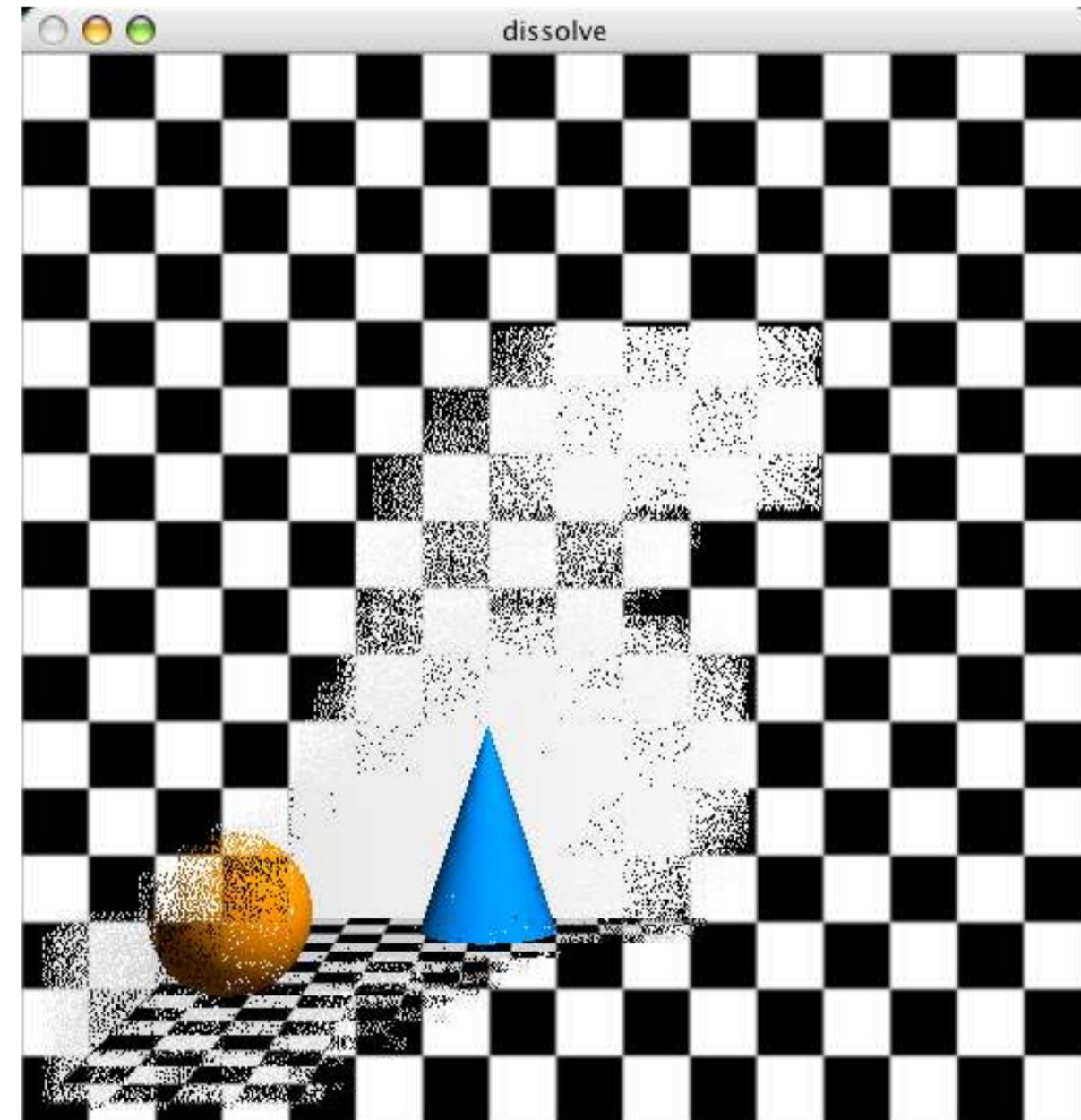


# Beispiele für komplexere Operationen/Effekte mittels Stencil-Buffer

CSG-Operationen (Schnitt, Differenz, ...)



"Dissolve"



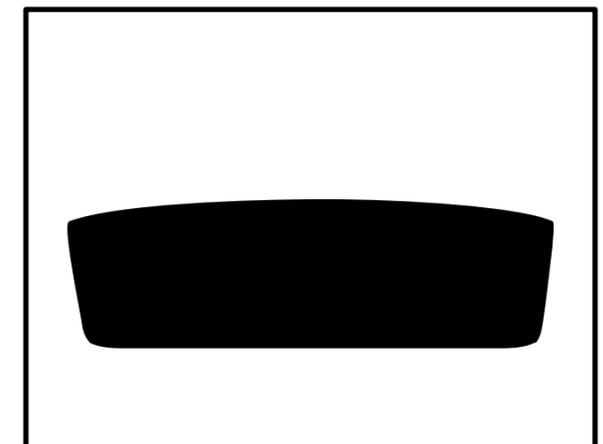
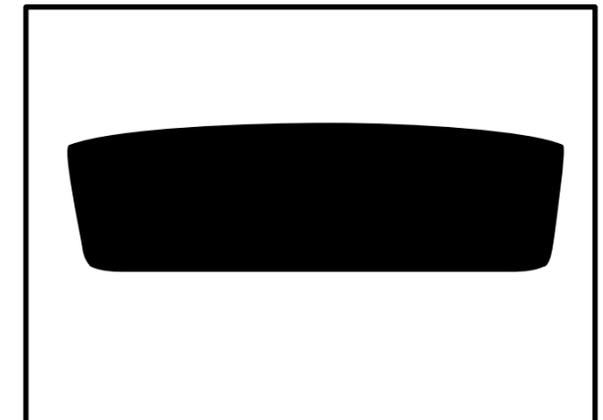
# Typisches, einfaches Anwendungsbeispiel

- Szene durch ein Objekt maskieren:
  1. Alle Buffer inkl. Stencil-Buffer löschen
  2. Maske rendern, dabei Stencil-Buffer überall dort auf 1 setzen, aber Color-Buffer unverändert lassen(!)
  3. Szene zeichnen, aber nur dort, wo Stencil-Wert = 1

Color Buffer



Stencil Buffer

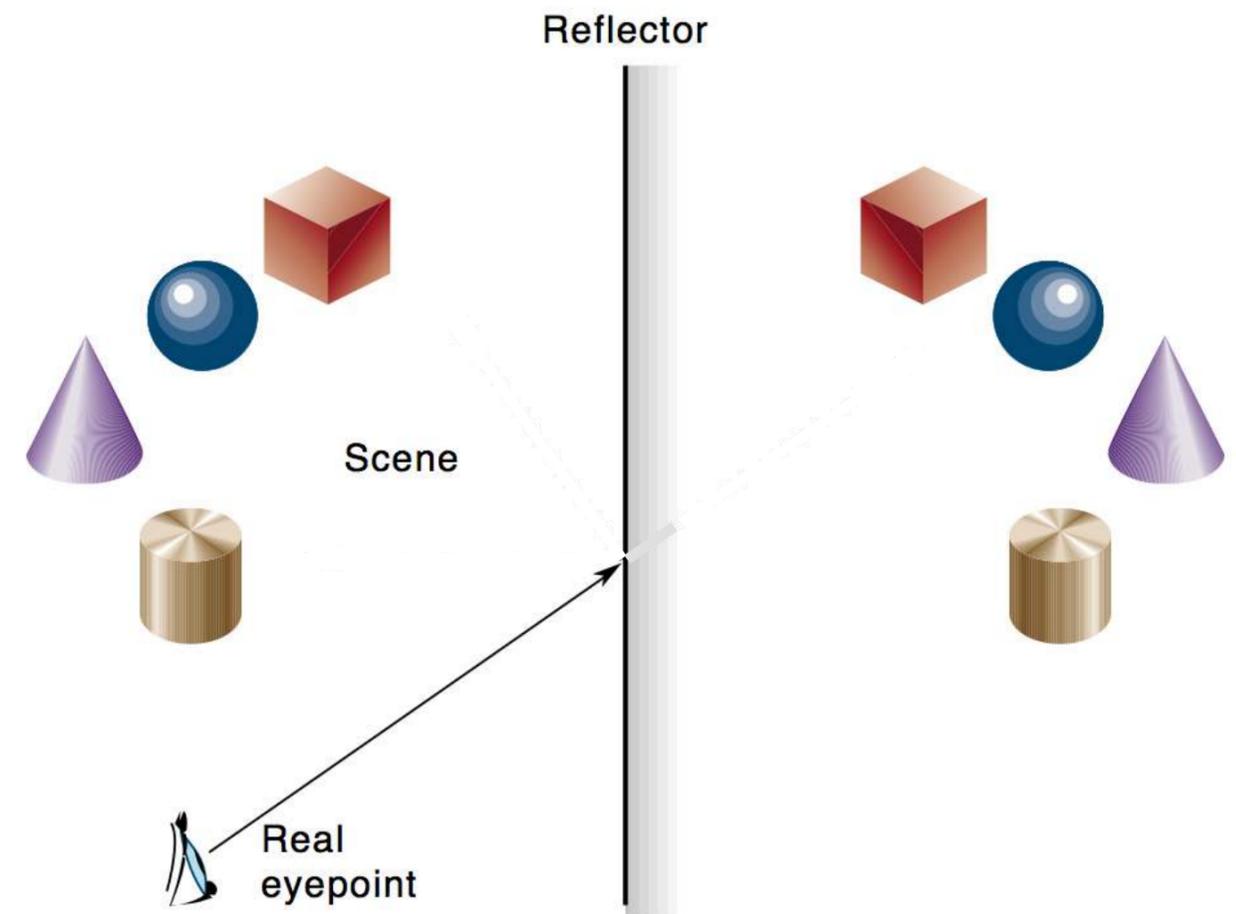


# Anwendung des Stencil-Buffer zum Rendering planarer Spiegel



# Rendering *Planar Reflections* Using the Stencil Buffer

- Grundlegende Idee:
  - Erzeuge für jedes Objekt ein "virtuelles" gespiegeltes Objekt
  - Betrachte Spezialfall, daß die Spiegelebene die Ebene  $z=0$  ist ( $xy$ -Ebene)
  - Setze Viewpoint
    1. Rendere alle Polygone mit  $z' = -z$
    2. Rendere die Szene normal
- Dies ist ein Beispiel für einen **multi-pass** Rendering-Algo
- Achtung: rendere in Pass 1 nur Polygone, wenn sie nach der Spiegelung wirklich *hinters* der Spiegelebene liegen! (Clipping-Plane in Spiegelebene)



- Problem:
  - Normale Spiegel (Wandspiegel, Autospiegel) haben nur eine begrenzte Ausdehnung
  - Der simple Algorithmus zeigt gespiegelte Objekte, wo gar kein Spiegel ist!
- Lösung: der Stencil-Buffer
  - Erzeuge im Stencil-Buffer eine Maske mit genau der Form des Spiegels



# Der 2-Pass Algorithmus im Detail

- Clear color & z buffer; set up viewpoint, etc.
- 1. Pass: render objs that could potentially be seen in mirror
  - Set up clipping plane such that *only* objects *behind* mirror are rendered
  - Compute transformation for reflection and apply to all polygons
  - Render scene (without geometry of mirror itself)

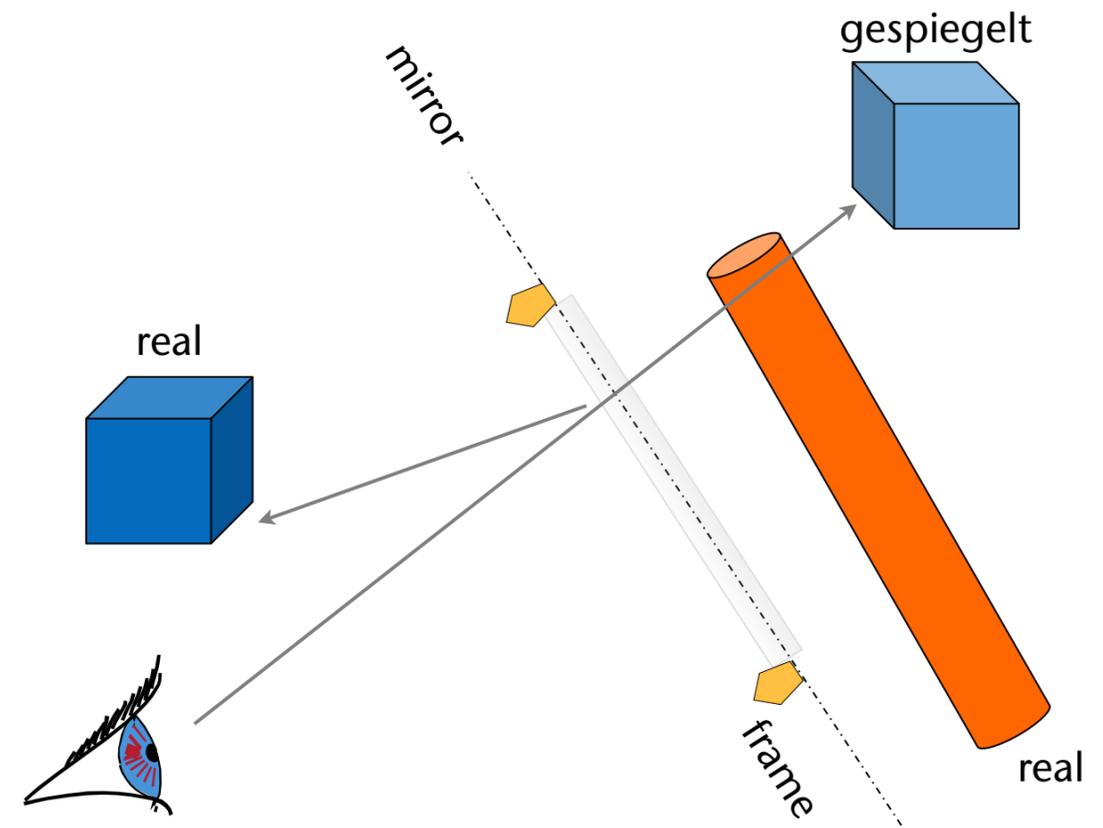


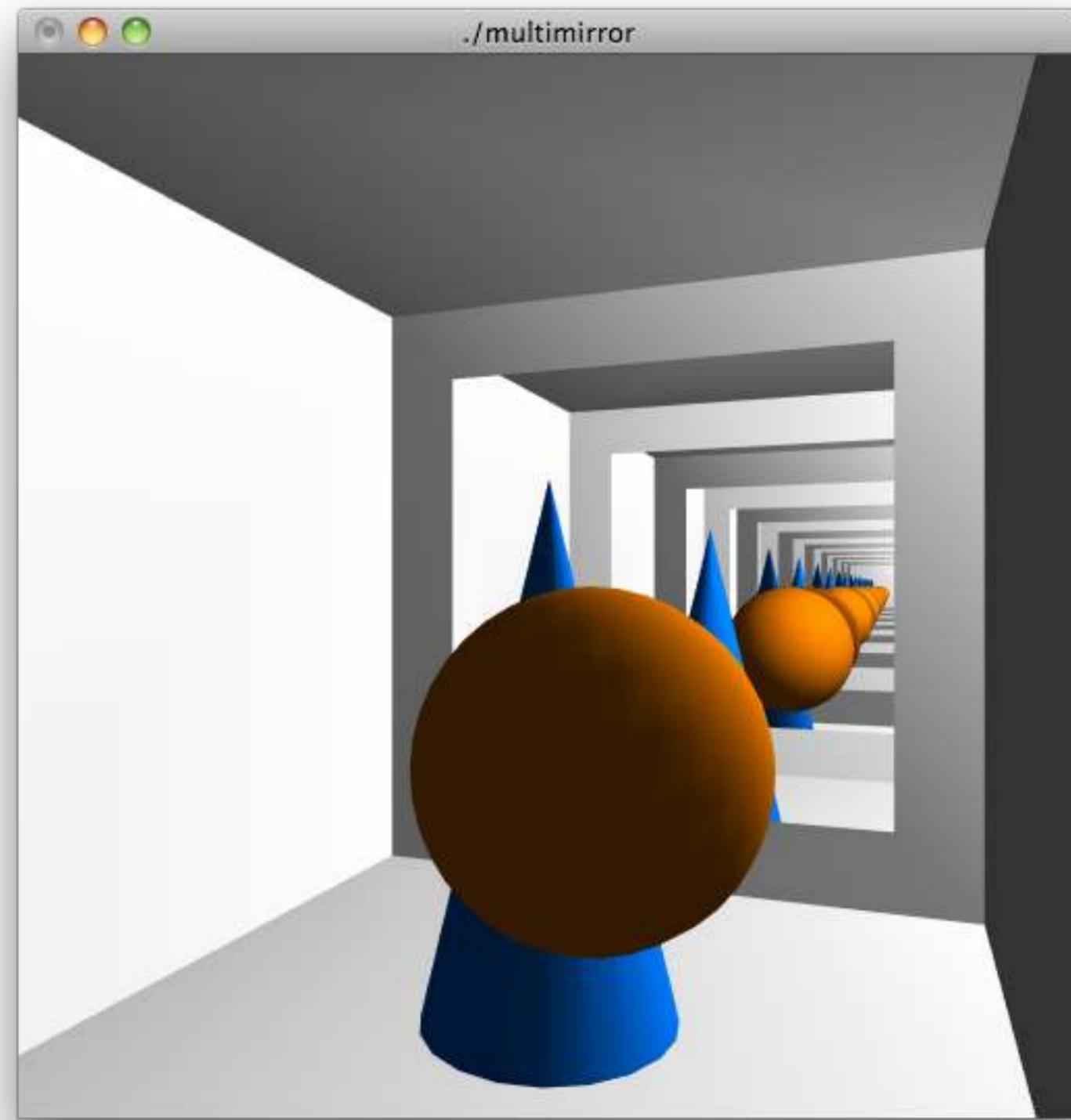
## 2. Pass: draw mirror (not its frame), and mask out everything outside mirror

- Clear stencil and z buffer, *but leave color buffer intact*
  - `glClear( GL_STENCIL_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT )`
- Configure stencil buffer such that 1 will be stored at each pixel touched by a polygon (of mirror)
  - `glStencilOp( GL_REPLACE, GL_REPLACE, GL_REPLACE );`  
`glStencilFunc( GL_ALWAYS, 1, 1 );`  
`glEnable( GL_STENCIL_TEST );`
- Draw the geometry of the mirror
  - This sets stencil bits & fills z buffer with depth values of mirror geometry
  - Enable blending for color buffer to see mirror surface
- Clear color buffer outside mirror geometry:
  - Configure the stencil test to pass *outside* the mirror polygon:  
`glStencilFunc( GL_NOTEQUAL, 1, 1 );`  
`glStencilOp( GL_KEEP, GL_KEEP, GL_KEEP );`
  - Clear color buffer, so that pixels outside the mirror return to the background color:  
`glClear( GL_COLOR_BUFFER_BIT )`



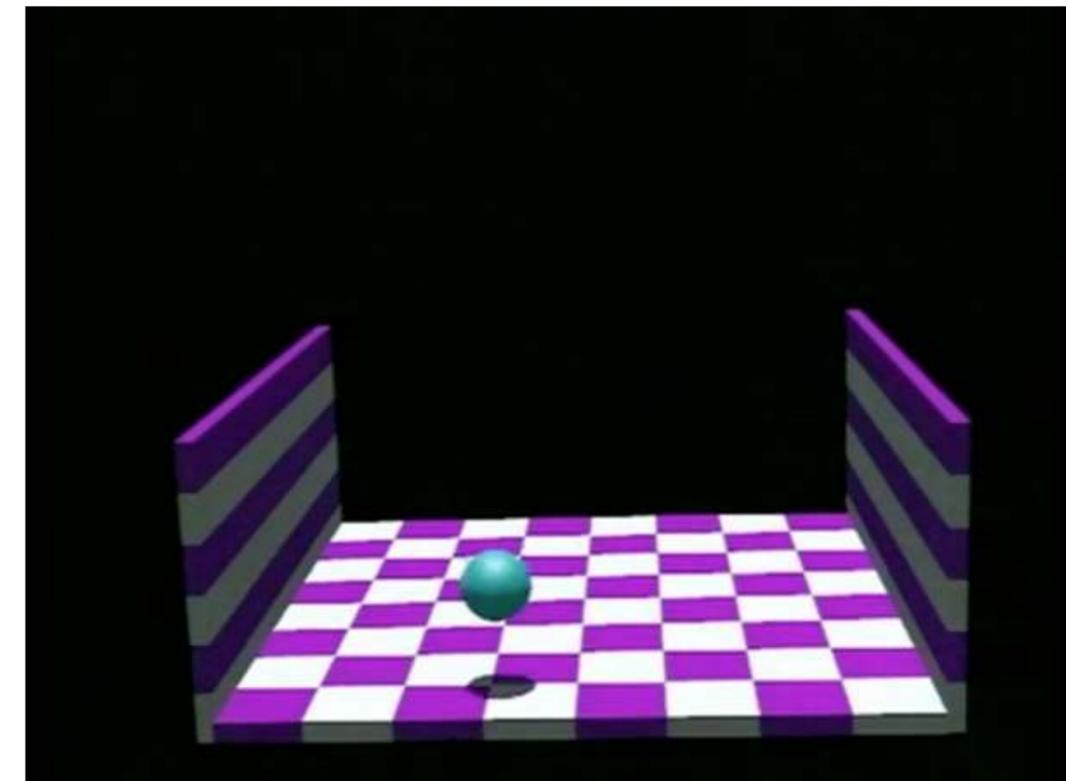
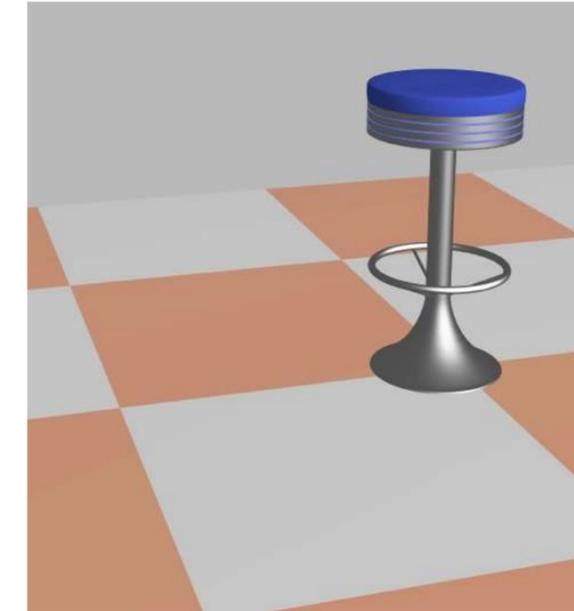
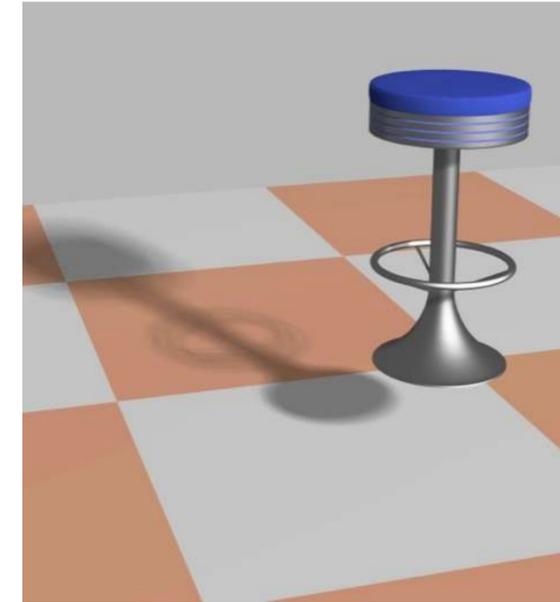
- Pass 3:
  - Disable stencil test
  - Disable clipping plane
  - Render scene as usual
    - Including frame of mirror





Iterative Anwendung  
des Verfahrens auf  
mehrere hintereinander  
liegende Spiegel →  
Hack, der nur für diesen  
speziellen Fall die  
Illusion von "Spiegel im  
Spiegel" schafft!

- Warum ist Schatten so wichtig?
  - Bessere "Verankerung" der Objekte in der Szene:
    - Mehr Information über die relative Lage der Objekte im Raum
    - Ein wichtiger Depth Cue (Tiefeninformation)
  - Hervorhebung der Beleuchtungsrichtung
  - Erhöhung des Realismus einer Szene



Die Trajektorie des Balls **im Bildraum** ist in beiden Fällen genau dieselbe!

# Eine optische Täuschung mit Schatten



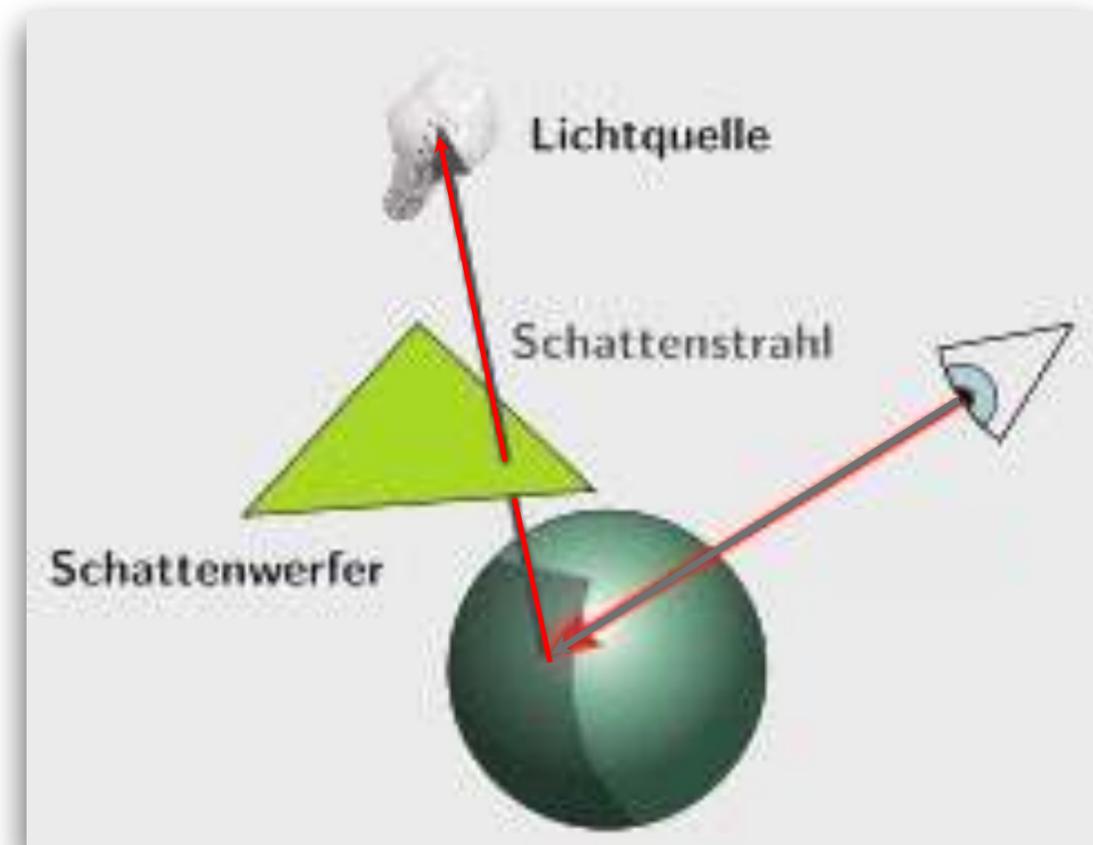
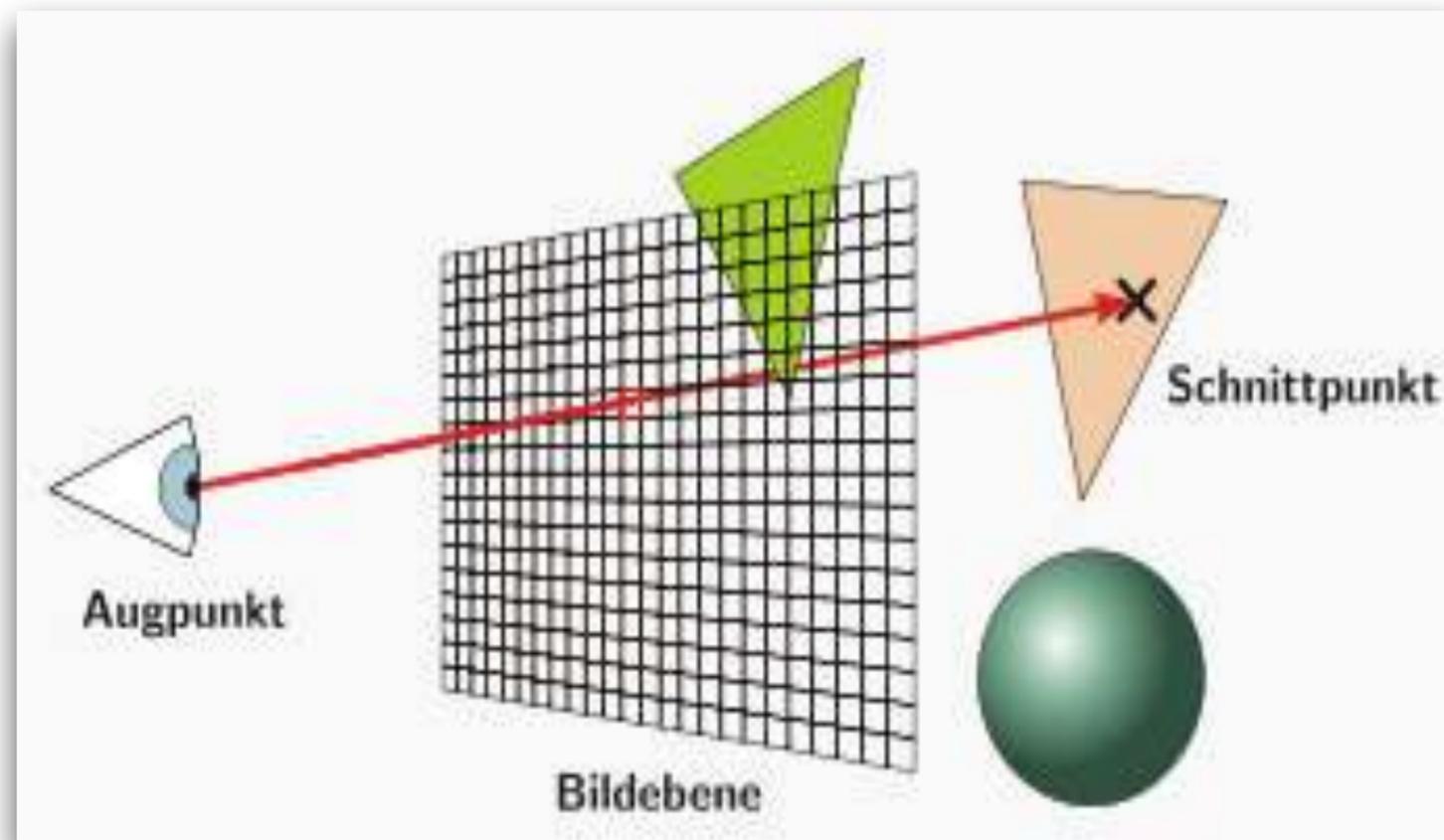
# Wrong Shadows Reveal Poorly Done Foto Faking



Pro 7, Galileo, Fake Fotos, 30. 5. 2013

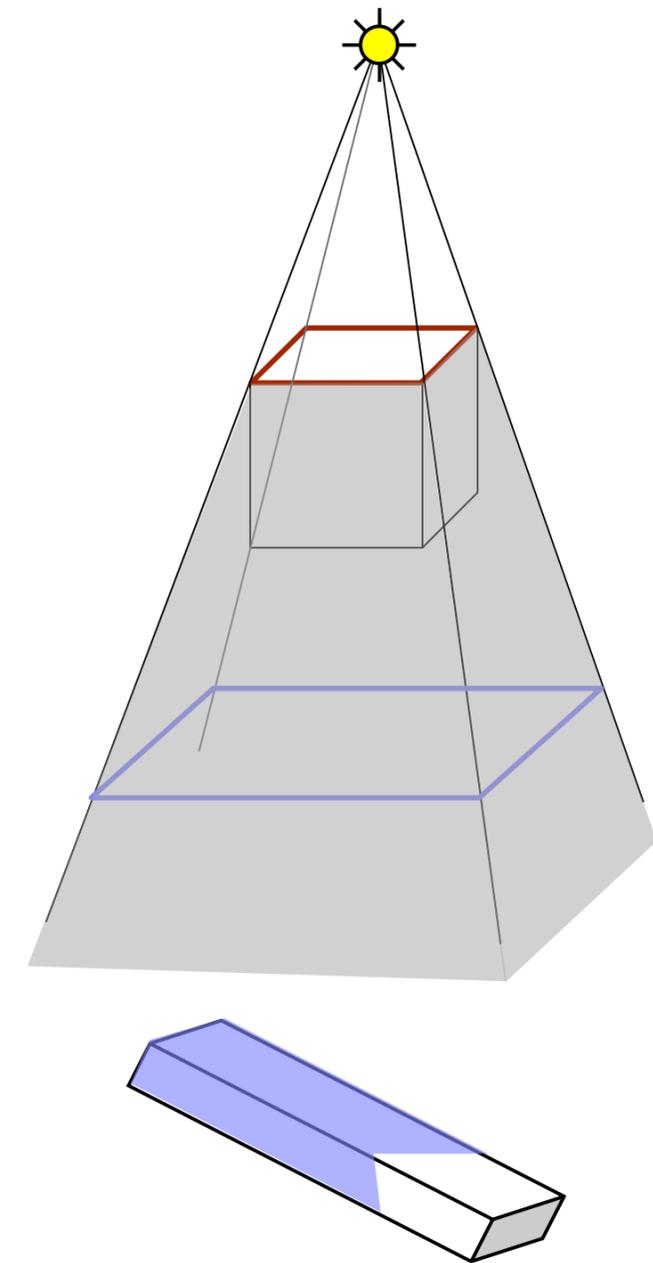
# Rendering Shadows using Shadow Volumes

- Zusammenhang zwischen Visibility und Shadows:
  - Visibilitätsberechnung = welche Objekte sind vom **Betrachter** aus sichtbar
  - Schattenberechnung = welche Objekte sind von der **Lichtquelle** aus sichtbar

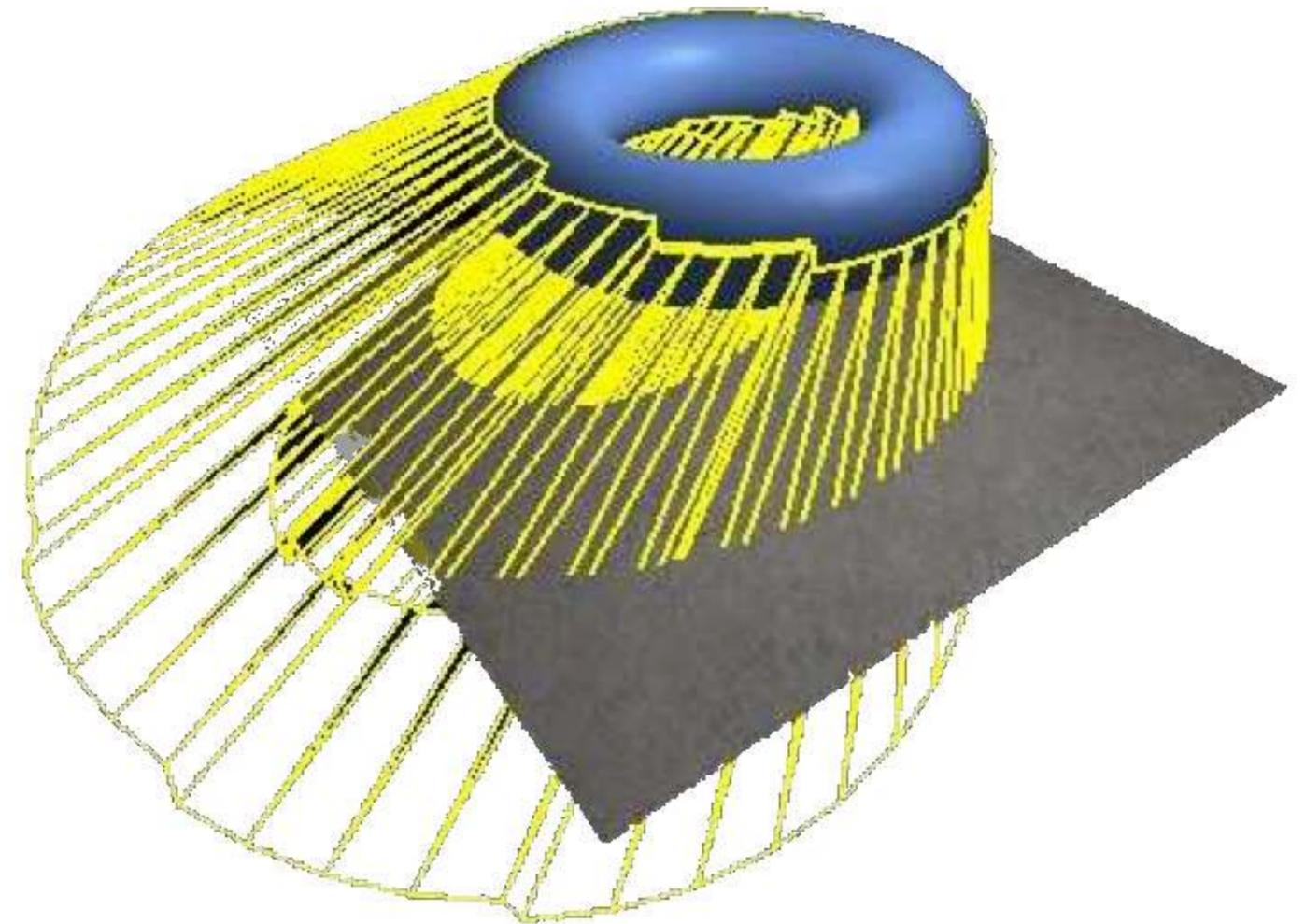


# Das Schattenvolumen

- Ansatz im Folgenden: modelliere die (Teil-)Volumina des Universums, die *kein* Licht von einer gegebenen Lichtquelle erhalten
- Das **Schattenvolumen** (*shadow volume*):
  - Ein Kegelstumpf, mit der Lichtquelle als Spitze
  - Erzeugt durch einen "*shadow caster*"
  - Jede **Silhouettenkante** (*silhouette edge*) des Casters, von der Lichtquelle aus gesehen(!), erzeugt genau ein Quad im Shadow Volume
  - Das Shadow Volume ist (im Prinzip) unendlich
- Liegt ein Objekt (teilweise) im Inneren des Schattenvolumens, so heißt dieses "*shadow receiver*"

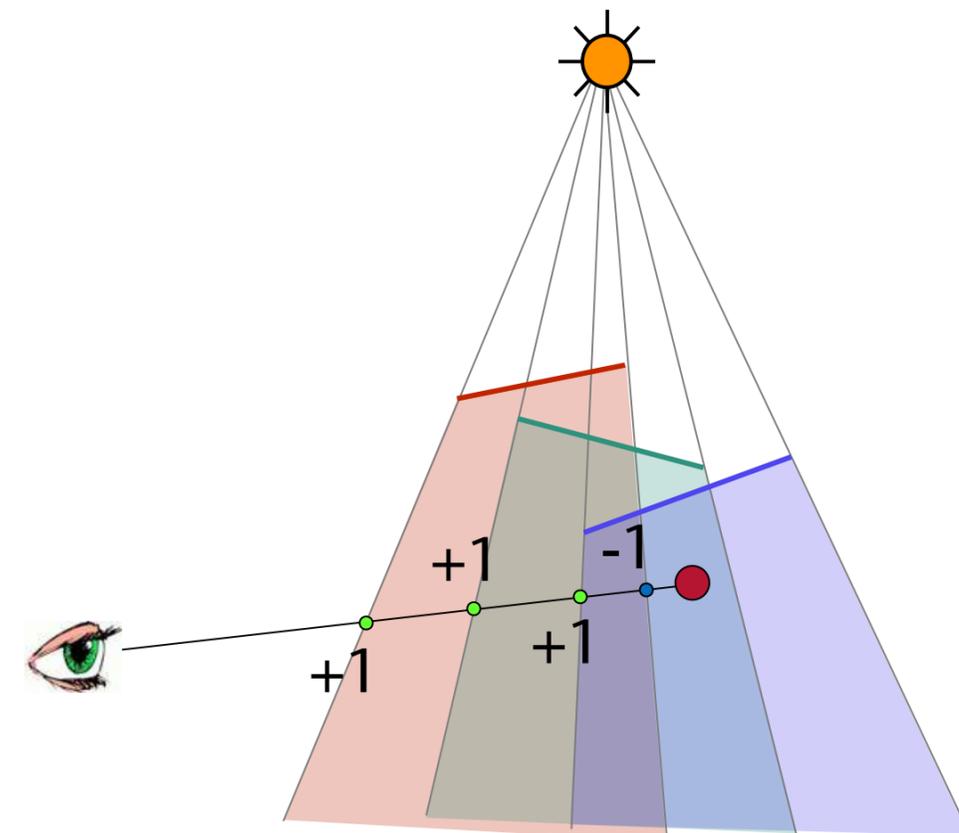
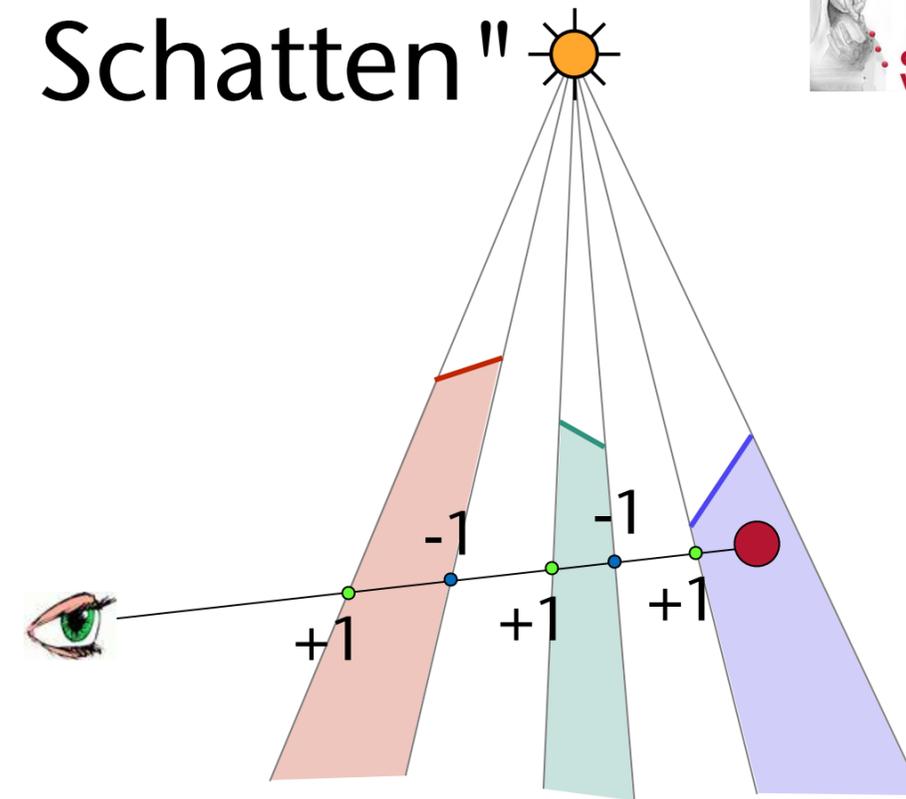


- Beispiel für ein komplexeres Shadow Volume
- Beachte: die Silhouettenkanten liegen nicht notwendigerweise alle in einer Ebene!



# Ein geometrisches Prädikat für "Pkt liegt im Schatten"

- Die prinzipielle Idee (ähnlich zu Inside-/Outside-Test bei der Rasterisierung von allgemeinen Polygonen):
  - Zähle Schnitte zwischen Sehstrahl und Schattenvolumen
  - Initialisierung mit 0, +1 bei Eintritt in Schattenvolumen, -1 bei Verlassen
  - Zähler zeigt an, in "wievielen Schatten" sich ein Punkt zugleich befindet
- Spezialfall: Beobachter ist selbst im Schatten!
- Bezeichnung: front- / back-facing polygons



# Der Algorithmus im Detail (Variante "Z-Pass-Algo")

- Hier oBdA: nur 1 Lichtquelle
  - Sonst: pro Lichtquelle 2 weitere Passes
- Pre-processing: berechne alle Shadow Volumes
  - In echter Implementierung: während des Renderns der Szene generieren

## 1. Pass: rendere Szene mit normaler Beleuchtung durch die Lichtquelle

```
glClearStencil(0); // init stencil to 0
glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT | GL_STENCIL_BUFFER_BIT);
glEnable(GL_LIGHTING);
glEnable(GL_LIGHT0); // enable light source that casts shadow
glEnable(GL_DEPTH_TEST); // standard depth testing ..
glDepthFunc(GL_LEQUAL); // .. with <=
glDepthMask(1); // update depth buffer
glDisable(GL_STENCIL_TEST); // no stencil testing in this pass
glColorMask(1,1,1,1); // update color buffer
renderScene();
```

(Old OpenGL Syntax)

2. Pass: render Shadow Volumes; zähle im Stencil-Buffer die Anzahl Eintritte und Austritte für das Pixel, das an der jeweiligen Stelle im Framebuffer sichtbar ist

```
glDepthMask (0) ; // don't modify depth buffer!  
glColorMask (0,0,0,0) ; // .. nor color buffer  
glDisable (GL_LIGHTING) ; // no need to compute lighting  
glEnable (GL_DEPTH_TEST) ; // only pgons of shadow vol. truly  
glDepthFunc (GL_LESS) ; // in front of visible pixel count  
glEnable (GL_STENCIL_TEST) ; // use stencil testing  
glStencilMask (~0u) ; // use all bits of stencil buffer  
glEnable (GL_CULL_FACE) ; // we need one pass for back/front  
glCullFace (GL_BACK) ; // for all front-facing pgons ..  
glStencilOp (GL_KEEP, GL_KEEP, GL_INCR) ; // .. passing the depth test  
renderShadowVolumePolygons ( light0 ) ; // .. increase stencil value  
glCullFace (GL_FRONT) ; // for all back-facing pgons ..  
glStencilOp (GL_KEEP, GL_KEEP, GL_DECR) ; // .. passing the depth test  
renderShadowVolumePolygons ( light0 ) ; // .. decrease stencil value
```

3. Pass: rendere die Szene ohne Lichtquelle (= Schatten); schreibe Pixel nur dann in den Color-Buffer, wenn sie im Schatten der Lichtquelle sind ("Licht ausknipsen")

```
glEnable(GL_LIGHTING);           // switch off light source 0
glDisable(GL_LIGHT0);           // but keep all others
glEnable(GL_DEPTH_TEST);        // use z-test as usual
glDepthFunc(GL_EQUAL);          // must match from 1st step
glDepthMask(0);                 // no need to update z buffer
glEnable(GL_STENCIL_TEST);       // only render pixels that are
glStencilFunc(GL_GEQUAL, 1, ~0u); // inside the shadow
glStencilOp(GL_KEEP, GL_KEEP, GL_KEEP); // no need to update stencil
glColorMask(1,1,1,1);           // do modify the color buffer
renderScene();
```

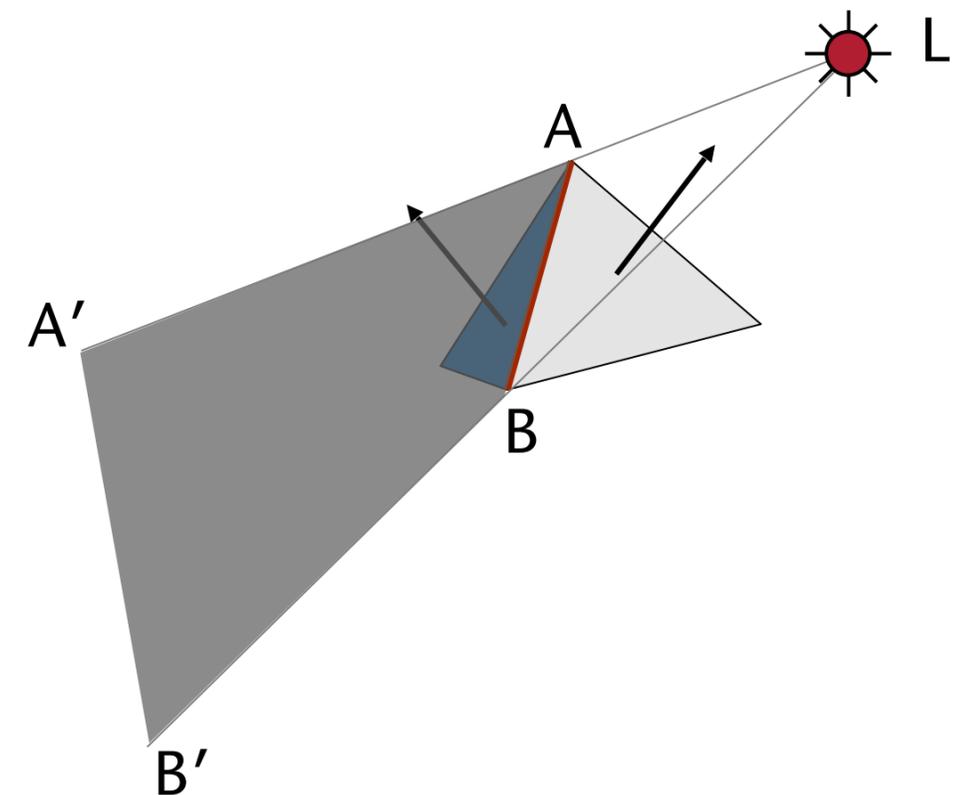
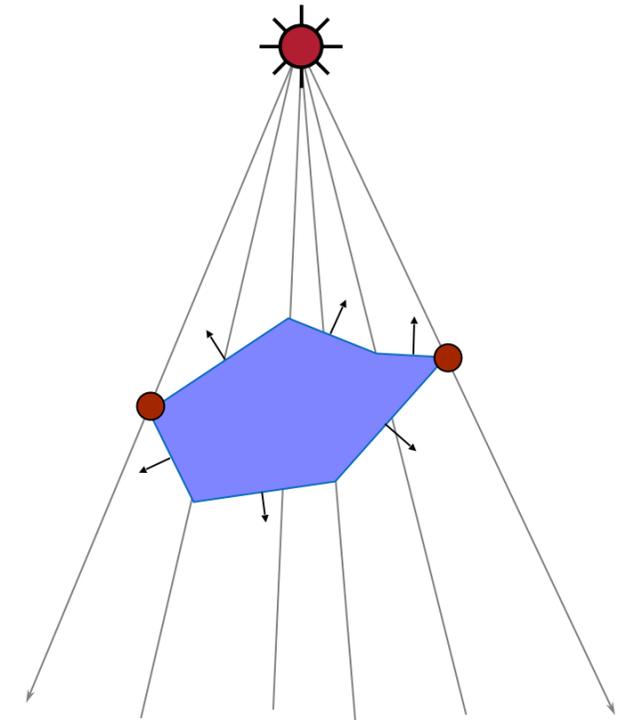
- Dieser Algorithmus heißt "z-pass algorithm", weil in Pass 2 nur diejenigen Fragmente der Shadow-Volumes den Stencil-Buffer verändern, die den Z-Test passieren (= **vor** der eigtl Geometrie sind)

# Varianten des Algorithmus'

- Es gibt eine GL-Extension, so daß man eine Stencil-Operation für front-facing, und *gleichzeitig* eine andere Stencil-Operation für back-facing Polygone angeben kann
  - Ist aber nicht auf allen Graphikkarten / Plattformen verfügbar
- Es gibt Probleme, falls die Schattenvolumengeometrie durch Clipping abgeschnitten wird
  - Eine Variante des Algos (der "*z-fail algo*") kommt damit zurecht
- Für mehrere Lichtquellen:
  - Rendere in Pass 1 die Szene ohne alle Lichtquellen (nur *ambient light*)
  - Für jede Lichtquelle:
    - Führe Pass 2 und Pass 3 durch
    - In Pass 3: akkumuliere Pixel-Farbwerte auf den bestehenden Wert im Color Buffer (also nicht ersetzen; geht mit passender sog. Blending-Funktion)

# Bemerkungen zu Details

- Berechnung der Silhouettenkanten der *shadow caster*:
  - Eine Kante (hat genau 2 inzidente Polygone) ist Silhouettenkante  $\Leftrightarrow$ 
    - ein Polygon zeigt zur Lichtquelle und ein Polygon zeigt weg von der Lichtquelle (Skalarprodukt)
- Berechnung der Seitenflächen eines Shadow Volumes (eines *shadow caster's*):
  - Verlängere die Eckpunkte der Silhouettenkante
  - Kann man mit speziellen Shadern während des Renders der Szene erledigen (CG2)



# Beispiele

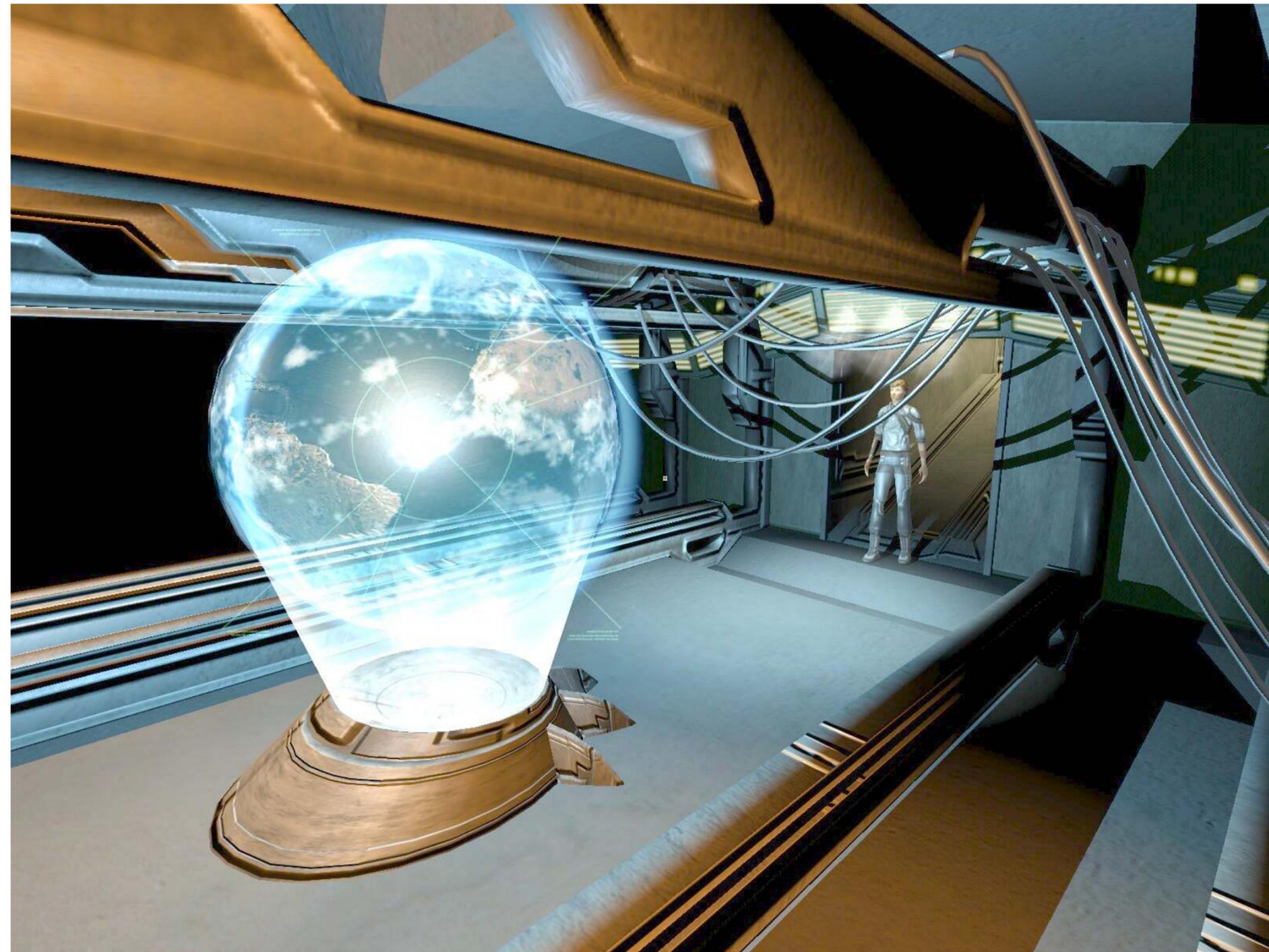
Shadowed scene



Stencil buffer contents

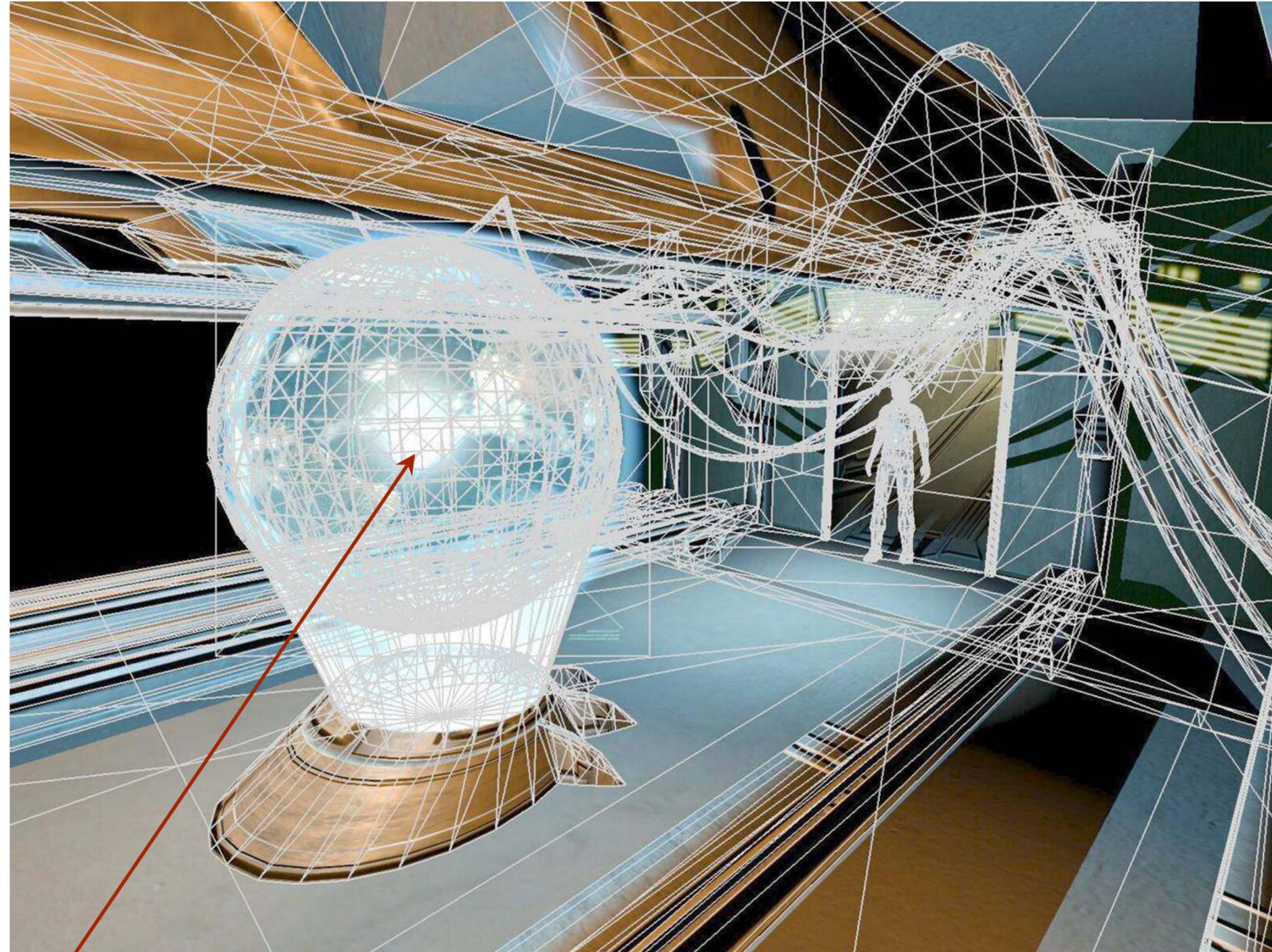


green = stencil value of 0 , red = stencil value of 1 , darker reds = stencil value > 1



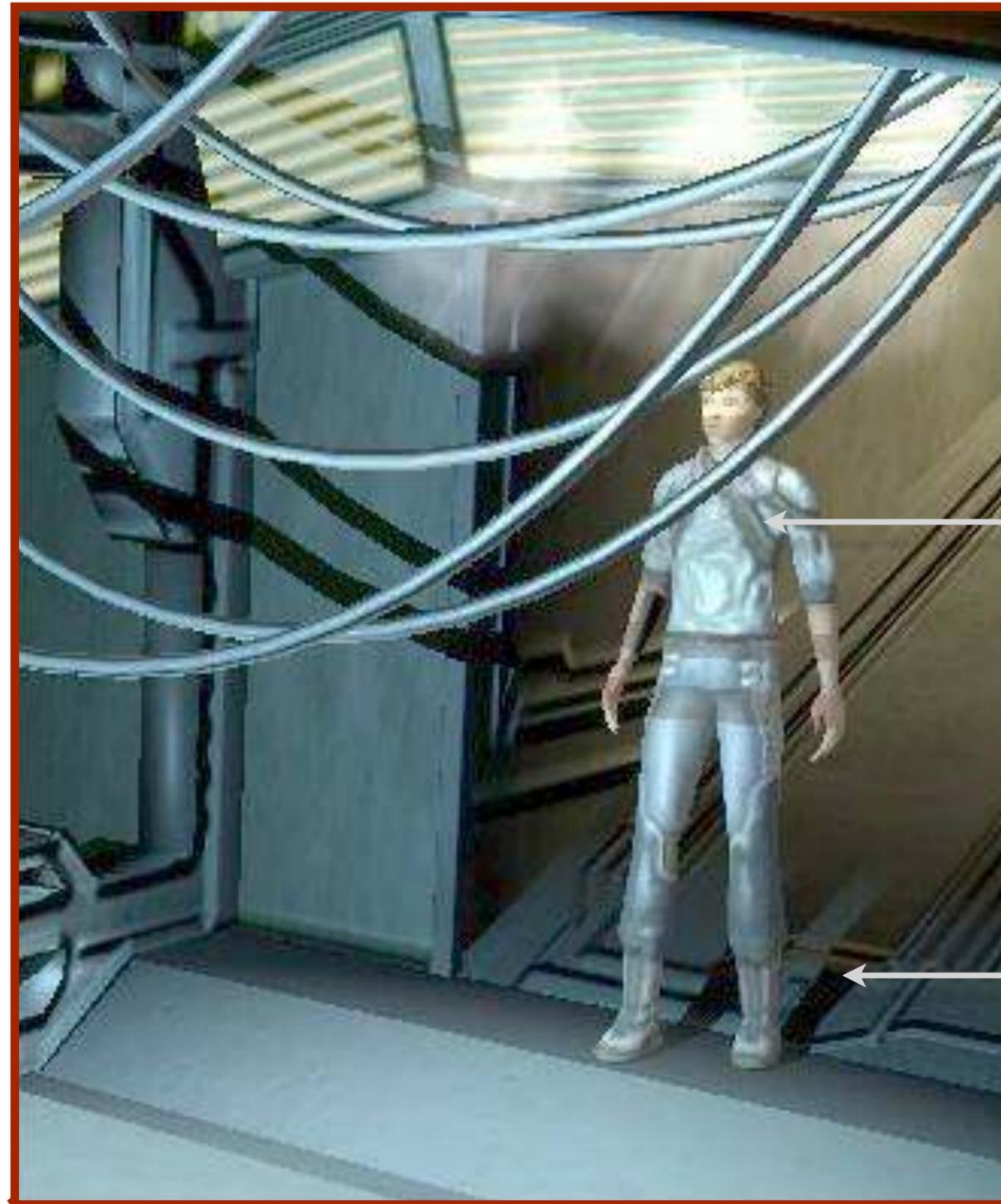
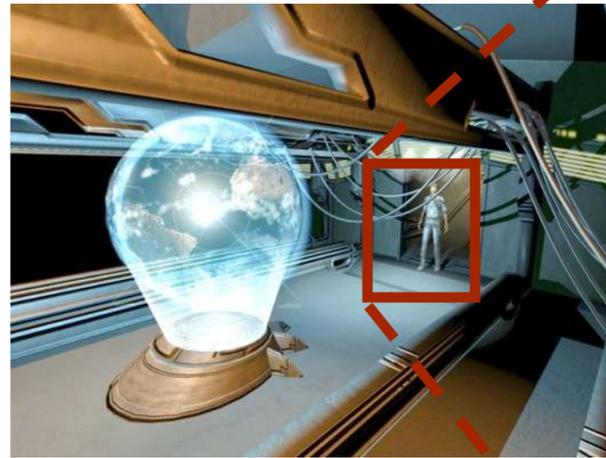
*Abducted* game images courtesy Joe Riedel at Contraband Entertainment





Primary light source location

Wireframe shows geometric complexity of visible geometry

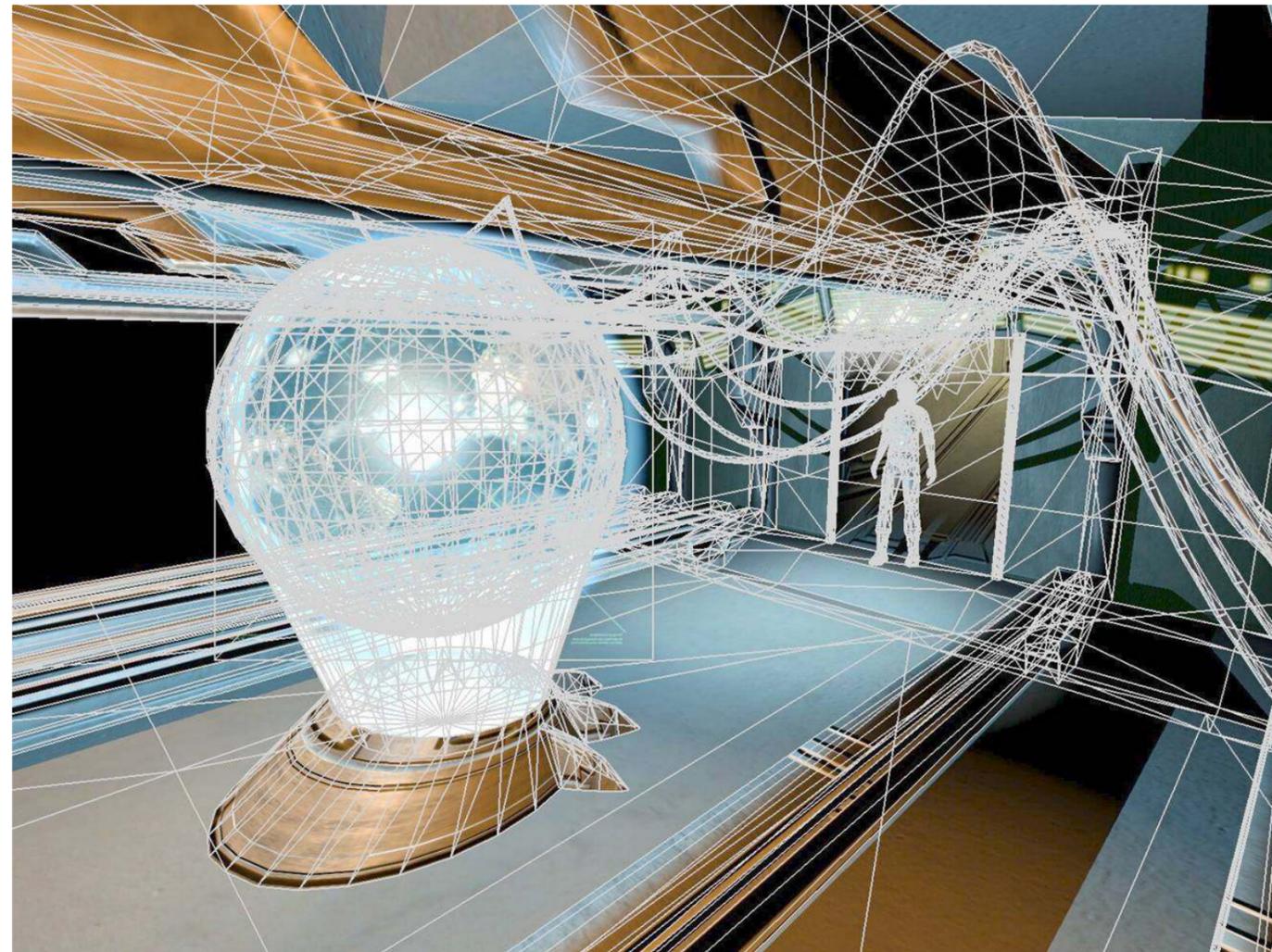


Notice cable shadows on player model

Notice player's own shadow on floor



Wireframe shows geometric *complexity of shadow volume geometry*



Visible geometry

&gt;

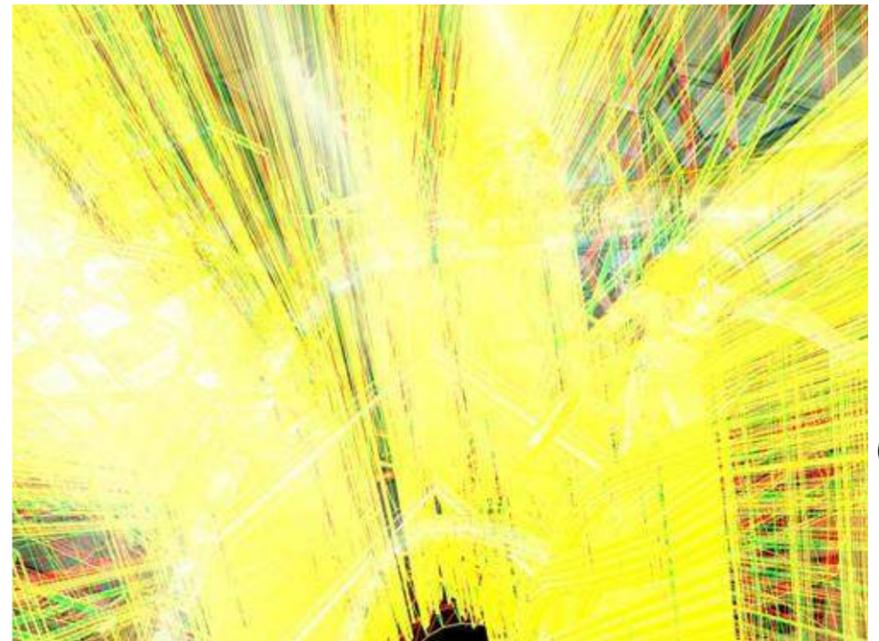


Shadow volume geometry

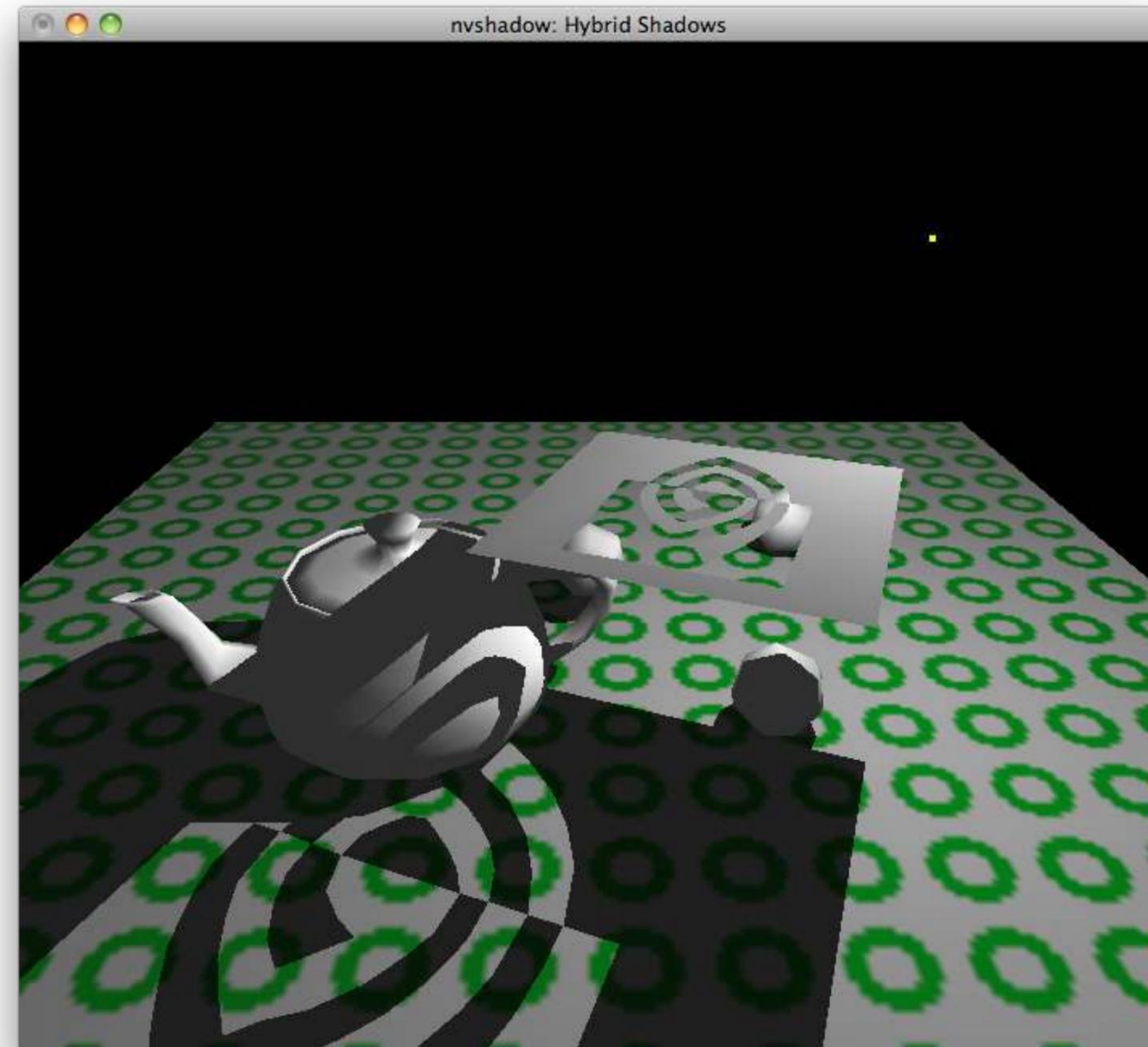
Typically, shadow volumes generate considerably more pixel updates than visible geometry



Visible geometry



Shadow volume geometry



<http://www.opengl.org/resources/features/StencilTalk/>

# Situations When Shadow Volumes Are Too Expensive



Chain-link fence is shadow volume nightmare!

Chain-link fence's shadow appears on truck & ground with shadow maps

Fuel game image courtesy Nathan d'Obrenan at Firetoad Software

# Sichtbare Schattenvolumen in der Realität



