



Computer-Graphik 2

Visibility Computations II – Culling

G. Zachmann
Clausthal University, Germany
zach@in.tu-clausthal.de



Klassifikation (Erinnerung)

- Problemklassen innerhalb des Bereichs "Visibility Computations":
 1. *Hidden Surface Elimination* (Verdeckungsrechnung): welche Pixel (Teile von Polygonen) werden von anderen verdeckt?
 2. *Culling*: welche Polygone können gar nicht sichtbar sein? (z.B., weil sie sich hinter dem Viewpoint befinden)
- 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

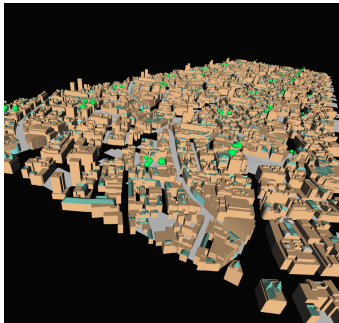
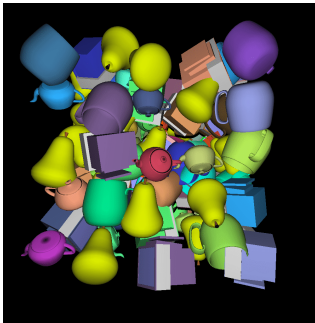
G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 2

Culling

- Sei A = Menge A **aller** Primitive;
sei S = Menge der **sichtbaren** Primitive.
- Alle bisher betrachteten Algorithmen arbeiten auf der gesamten Menge A , d.h., sie haben einen Aufwand mindestens in $O(|A|)$.
- Unproblematisch, wenn $|S| \approx |A|$ ist.
 - Z.B., wenn Anzahl der Primitive im Vergleich zur Pixelanzahl klein ist.
 - Erinnerung: Depth Complexity
- "to cull from" = "sammeln [aus ...] / auslesen"
"to cull flowers" = Blumen pflücken

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 3

- Aber: für komplexe Szenen ist die Anzahl der sichtbaren Primitive in der Regel wesentlich kleiner als die Anzahl der Primitive insgesamt ($|S| \ll |A|$) !

- Culling ist eine wichtige Optimierung (im Gegensatz zu Clipping)

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 4

- Für $|S| \ll |A|$ genügen die bisherigen Algorithmen nicht
- **Culling-Algorithmen** versuchen, die Menge der **nicht-sichtbaren** Primitive $C = A \setminus S$ (oder Teilmenge davon), oder die Menge der **sichtbaren** Primitive S (oder Obermenge davon) zu bestimmen.
- Definition: **Potentially Visible Set (PVS)** = Obermenge $S' \supseteq S$
 - Ziel: möglichst kleines PVS S' mit möglichst geringem Aufwand
 - Triviales PVS (mit trivialstem Aufwand) ist natürlich A

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 5

Culling-Arten

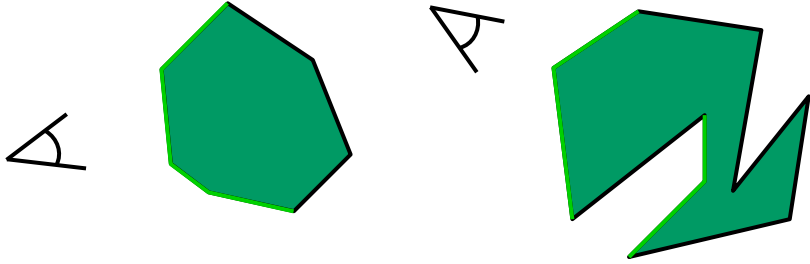
The diagram illustrates several culling techniques:

- view frustum**: A 3D frustum shape representing the camera's field of view.
- backface**: A shaded polygon with a red arrow pointing away from the viewer, indicating a backface culling operation.
- portal**: A rectangular frame containing a red 'X', representing a portal culling technique.
- detail**: A small red square, representing a detail culling technique.
- occlusion**: A red crescent shape, representing an occlusion culling technique.

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 6

Back-Face Culling

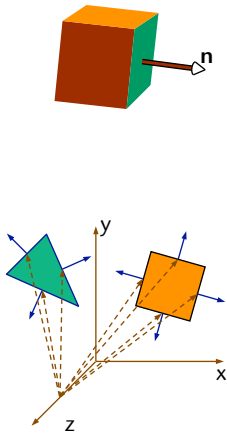
- Definition: **Solid** = geschlossenes, opakes Objekt; also undurchsichtiges Objekt mit nicht-degeneriertem Volumen
- Beobachtungen:
 - Bei Solids sind die Rückseiten (**back-faces**) nie sichtbar
 - Bei konvexen Objekten gibt es genau 1 zusammenhängende Rückseite
 - Bei nicht-konvexen Solids eventuell mehrere



G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 7

- Backface Culling** = Nicht-Zeichnen der dem Viewpoint abgewandten Flächenstücke
 - Klappt nur bei **Solids!**
- Berechne Normale **n** des Polygons
- Berechne Vektoren **v** vom Viewpoint zu allen Punkten **p** des Polygons
 - Orthogonale Projektion: $\mathbf{v} = [0 \ 0 \ 1]^T$
 - Perspektivische Projektion: $\mathbf{v} = \mathbf{p} - \text{eye}$
- Abgewandt (nicht zeichnen) wenn Winkel zwischen **n** und **v** $< 90^\circ$

$$\Leftrightarrow \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} > 0$$



G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 8

Beispiel

$$N_1 \cdot V = (2, 1, 2) \cdot (-1, 0, -1)$$

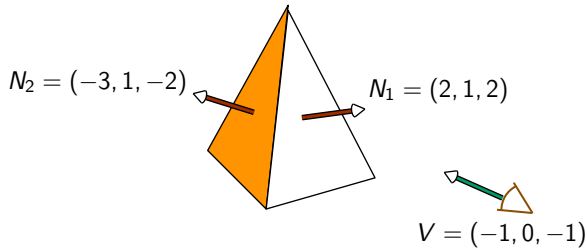
$$= -4 < 0$$

⇒ N_1 front facing

$$N_2 \cdot V = (-3, 1, -2) \cdot (-1, 0, -1)$$

$$= 5 > 0$$

⇒ N_2 back facing



$N_2 = (-3, 1, -2)$ $N_1 = (2, 1, 2)$

$V = (-1, 0, -1)$

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 9

Backface Culling in OpenGL

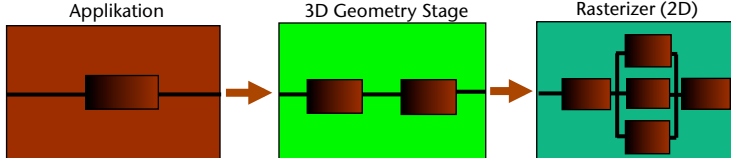
- Muß man nur einschalten:

```
glCullFace( GL_BACK );
glEnable( GL_CULL_FACE );
```

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 10

Wann lohnt sich Backface Culling?

- Erinnerung: Graphik-Pipeline

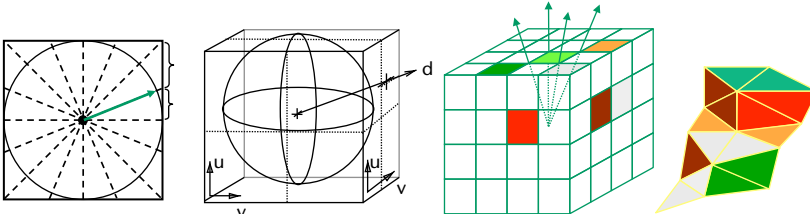


- Eine Pipeline hat immer den Durchsatz wie das langsamste Glied!
- Mögliche Bottlenecks in der Graphik-Pipeline:
 - Im Rasterizer → *"fill limited"*
 - In der Geometry-Stage → *"transform limited"*
 - Auf dem Bus zwischen App. und Graphik-Hardware → *"bus limited"*
 - Falls die Graphikkarte schneller ist als die Applikation Geometrie liefern kann → *"CPU limited"* (erkennt man an 100% CPU-Auslastung)

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 11

Normalenmasken [Zhang & Hoff, 1997]

- Zentrale Idee: Skalarprodukt ersetzen durch Klassifizierung aller Normalen
- Bilde zunächst Klassen über der Menge aller Normalen
 - Umschließe Normalenkugel (Gauß'sche Kugel) mit Würfel (*"Richtungswürfel"* oder *"direction cube"*)



- Ergibt $6 \cdot N^2$ viele Klassen (N = Anzahl Gitterunterteilungen)
- Klassifizierung einer Normalen ist sehr einfach

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 12

- Kodierung einer Normalen (Preprocessing):
 - Der gesamte Normalenwürfel $\hat{=}$ Bitstring der Länge $6 \cdot N^2$
 - Eine Normale $\hat{=}$ nur eine 1, sonst 0-en
 - Kodierung als Offset + Teil des Bitstrings, der die 1 enthält
 - Z.B.: unterteile Bitstring in Bytes, Offset = 1 Byte, ergibt $256 \times 8 = 2048$ Bits

```
typedef struct PolygonNormalMask
{
    Byte offset, bitMask;
};
```

- Speichere diese 2 Bytes zu jedem Polygon
- Unterteile die Normalenkugel in $6 \cdot 16 \cdot 16 = 1536$ Klassen

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 13

- Culling (Initialisierung):
 - Identifiziere alle diejenigen **Normalenklassen**, deren Normalen alle backfacing sind
 - Orthographische Projektion:
 - Perspektivische Projektion:

welche Normalen backfacing sind hängt von Normalenrichtung **und Position** des Polygons ab!
 - Deswegen: berechne "konservative" Menge von Klassen, die – unabhängig vom Ort des Polygons – backfacing sind:

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 14

■ In der Praxis:

- Teste jede Klasse in allen vier Ecken des View-Frustums
- Test einer Klasse = Test der 4 Normalen, die in die Ecken des Quadrats zeigen

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 15

- Stelle diese Menge als Bitstring (z.B. 2048 Bits = 256 Bytes) in einem Bytearray dar:



```
Byte BackMask[256];
```
- Culling (zur Laufzeit): teste für jedes Polygon


```
BackMask[byteOffset] & bitMask
```
- Beschleunigung: rendere die Szene "sektorenweise"
 - damit ist der Winkel $\alpha/2$ in jedem Sektor kleiner;
 - für jeden Sektor eine eigene **BackMask** [].
- Resultat: die Autoren berichten Faktor 1.5 Speedup gegenüber OpenGL-Backface-Culling

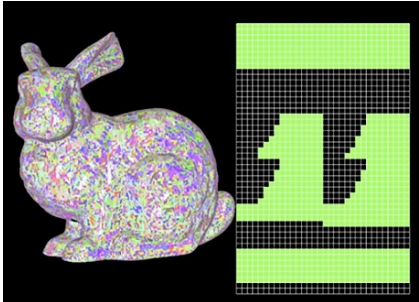
G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 16

Beispiel

216 Klassen (cluster)



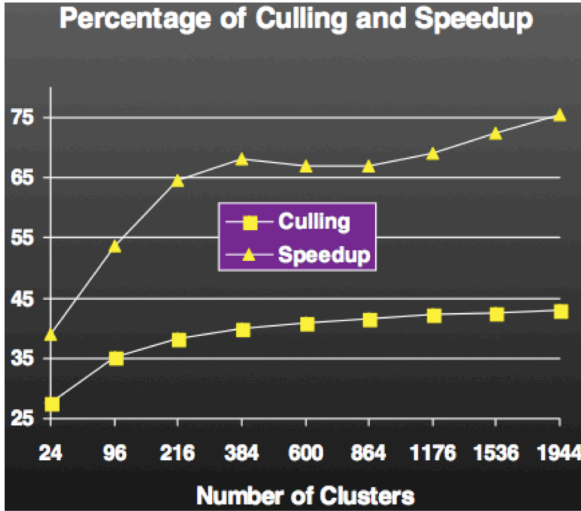
1536 Klassen (cluster)



BackMask für den aktuellen Viewpoint
(grün = backfacing)

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 17

Speedup



Number of Clusters	Culling (%)	Speedup (%)
24	28	38
96	35	52
216	38	62
384	40	65
600	41	64
864	42	64
1176	43	66
1536	44	70
1944	45	75

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 18

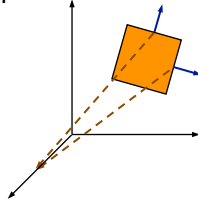
Clustered Backface Culling [1998]

- Erinnerung: einfache Rechenregeln zu min/max:

$$\max(x + y) \leq \max(x) + \max(y)$$

$$\max(x - y) \leq \max(x) - \min(y)$$

$$\max(kx, ky) = \begin{cases} k \max(x, y) & , k \geq 0 \\ k \min(x, y) & , k < 0 \end{cases}$$
- Im folgenden seien \mathbf{n}^i und \mathbf{p}^i die Normale bzw. ein Vertex eines Polygons aus einem Cluster (einer Menge) von Polygonen. Sei \mathbf{e} der Viewpoint.
- Achtung: wir verwenden im folgenden die "umgekehrte" Definition für Backfacing!

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{e} - \mathbf{p}) \leq 0$$


G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 19

- Annahme: Cluster (= Menge) von Polygonen ist gegeben
- Alle Polygone sind backfacing gdw.

$$\forall i : \mathbf{n}^i (\mathbf{e} - \mathbf{p}^i) \leq 0 \Leftrightarrow \max \{ \mathbf{n}^i (\mathbf{e} - \mathbf{p}^i) \} \leq 0 \quad (1)$$
- Obere Schranke für (1) ist

$$\max \{ \mathbf{n}^i (\mathbf{e} - \mathbf{p}^i) \} \leq \max \{ \mathbf{e} \mathbf{n}^i \} - \min \{ \mathbf{n}^i \mathbf{p}^i \} \quad (2)$$
- Setze $d := \min \{ \mathbf{n}^i \mathbf{p}^i \}$ (precomputation)
- Schreibe (2) als

$$\max \{ \mathbf{n}^i (\mathbf{e} - \mathbf{p}^i) \} \leq \max \{ e_x n_x^i + e_y n_y^i + e_z n_z^i \} - d \leq \max \{ e_x n_x^i \} + \max \{ e_y n_y^i \} + \max \{ e_z n_z^i \} - d \quad (3)$$

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 20

- Annahme: \mathbf{e} liegt im pos. Oktanten, d.h., $e_x, e_y, e_z \geq 0$;
dann können wir eine obere Schranke von (3) angeben:

$$\begin{aligned} & \max \{ \mathbf{n}^i (\mathbf{e} - \mathbf{p}^i) \} \\ & \leq e_x \max \{ n_x^i \} + e_y \max \{ n_y^i \} + e_z \max \{ n_z^i \} - d \\ & \leq \mathbf{m} \cdot \mathbf{e} - d, \quad \text{mit } \mathbf{m} = \begin{pmatrix} \max \{ n_x^i \} \\ \max \{ n_y^i \} \\ \max \{ n_z^i \} \end{pmatrix} \end{aligned}$$
- Analog gilt für $e_x, e_y, e_z \leq 0$:

$$\max \{ \mathbf{n}^i (\mathbf{e} - \mathbf{p}^i) \} \leq \mathbf{n} \cdot \mathbf{e} - d, \quad \text{mit } \mathbf{n} = \begin{pmatrix} \min \{ n_x^i \} \\ \min \{ n_y^i \} \\ \min \{ n_z^i \} \end{pmatrix}$$

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 21

- Für alle anderen Oktanten hat man die entsprechenden Kombinationen aus min & max
- Schreibweise: definiere eine Art „If“-Operator auf Vektoren

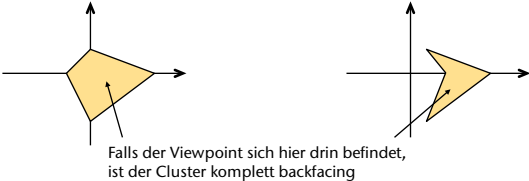
$$\text{if}(\mathbf{e}; \mathbf{u}, \mathbf{v}) := \begin{cases} u_\alpha & , e_\alpha \leq 0 \\ v_\alpha & , e_\alpha > 0 \end{cases} \quad \text{mit } \alpha \in \{x, y, z\}$$
- Damit kann man den (konservativen) Test dann so schreiben:

$$\text{if}(\mathbf{e}; \mathbf{n}, \mathbf{m}) \cdot \mathbf{e} - d \leq 0 \quad \Rightarrow \quad \text{cluster is backfacing} \quad (4)$$
- Precomputation: pro Cluster \mathbf{n} , \mathbf{m} und d bestimmen
- Speicherbedarf pro Cluster: 28 Bytes (2 Vektoren + 1 Skalar)

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 22

Geometrische Interpretation

- Ungleichung (4) definiert 8 Ebenen (pro Oktant eine)
- Je 4 Ebenen (in angrenzenden Oktanten) schneiden sich in **einem** Punkt auf der dazwischenliegenden Koord.achse
 - Beispiel: betrachte die 4 Ebenen in den Oktanten mit $e_x \geq 0$
 - Alle 4 Ebenen haben Normale der Form $\mathbf{n} = (m_x, \cdot, \cdot) \rightarrow$
 - sie schneiden alle die X-Achse im Punkt $(\frac{d}{m_x}, 0, 0)$.
- Die 8 Ebenen bilden ein **geschlossenes Volumen**, das sog. "Culling-Volumen"



Falls der Viewpoint sich hier drin befindet,
ist der Cluster komplett backfacing

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 23

Hierarchical Clustered Backface Culling

- Zwei Cluster kann man zusammenfassen zu einem großen:

$$\hat{\mathbf{n}} = \begin{pmatrix} \min(n_x^1, n_x^2) \\ \min(n_y^1, n_y^2) \\ \min(n_z^1, n_z^2) \end{pmatrix} \quad \hat{\mathbf{m}} = \begin{pmatrix} \max(m_x^1, m_x^2) \\ \max(m_y^1, m_y^2) \\ \max(m_z^1, m_z^2) \end{pmatrix}$$

$$\hat{d} = \min(d_1, d_2)$$
- Falls eine Hierarchie von Clustern aufgebaut wird, definiere analog folgenden Frontface-Test:
 - Höre auf zu testen, falls kompletter Cluster front- oder backfacing
 - Sonst: teste die Kinder auf komplett front- oder back-facing

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 24

Weitere Optimierung: Lokale Test Koordinaten

- Problem: wenn die Polygone weit vom Ursprung entfernt liegen, und der Ursprung auf der positiven Seite der Normalen liegt, dann wird d sehr groß negativ \rightarrow der Test fällt nie positiv aus
- Abhilfe: führe den Test in einem lokalen Koordinatensystem durch
- Verschiebe den lokalen Ursprung \mathbf{c} so, daß

$$d = \min \left\{ \mathbf{n}^i \cdot (\mathbf{p}^i - \mathbf{c}) \right\}$$
 möglichst groß positiv wird. Gesucht ist das optimale \mathbf{c} .
 - Frage: wird Rotation noch etwas bringen?
 - In praxi: probiere Mittelpunkt und Ecken der BBox der Polygone als \mathbf{c} .
- Speichere \mathbf{c} zusätzlich zum Cluster; teste dann

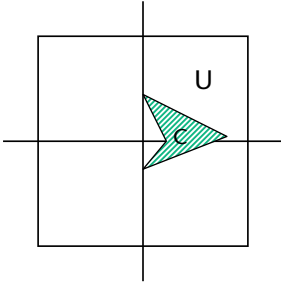
$$\text{if } (\mathbf{e} - \mathbf{c}; \mathbf{N}, \mathbf{M}) \cdot (\mathbf{e} - \mathbf{c}) - d \leq 0$$

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 25

Erzeugung der Cluster

- Zur Bewertung von Cluster-Kandidaten in einem Algo benötigen wir ein Maß für die "Güte" eines Clusters
- Hier: Wahrscheinlichkeit, daß Cluster gecullt wird
- Heuristik:

$$\frac{\text{Volumen aller möglicher Viewpoint-Standort}}{\text{Volumen des Culling-Volumens}} = \frac{\text{Vol}(U)}{\text{Vol}(C)}$$
 - $\text{Vol}(C)$ kann man exakt bestimmen
 - Wähle als U die BBox der gesamten Szene
- Falls lokale Culling-Koordinaten verwendet werden:
 - wähle als $U = \mathbf{c} \cdot \text{BBox}(\text{Cluster})$
 - („Nahfeld-Culling-Wahrscheinlichkeit“)



G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 26

- Frage: gegeben zwei Cluster A,B:
ist es schneller A und B getrennt zu testen und zu rendern,
oder als ein Cluster $C := A \cup B$?
- Sei $T(A)$ die erwartete(!) Zeit, den Cluster A zu testen und ggf. zu rendern. Dann ist

$$T(A) = t_C + (1 - P(A)) R(A)$$
 wobei $P(A)$ = Wahrscheinlichkeit, daß Cluster A gecullt wird,
und $R(A)$ = Zeit zum Rendern von A ohne weitere Tests, und
 t_C = Zeit zum Backface-Test eines Clusters

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 27

- A und B zusammenfassen lohnt sich gdw.

$$T(C) < T(A) + T(B) \quad \Leftrightarrow$$

$$t_C + (1 - P(C)) R(C) < 2t_C + (1 - P(A)) R(A) + (1 - P(B)) R(B) \quad \Leftrightarrow$$

$$(1 - P(C))(R(A) + R(B)) < t_C + \dots \quad \Leftrightarrow$$

$$P(C) > \frac{t_C + P(A)R(A) + P(B)R(B)}{R(A) + R(B)} \quad \Leftrightarrow$$

$$P(C) > \frac{t_C/r + P(A)n_A + P(B)n_B}{n_A + n_B}$$

Ann.:
 $R(A) = n_A r$,
 r = konstanter Aufwand für 1 Polygon
- Verhältnis t_C/r ist maschinenabhängig; kann aber leicht vorab experimentell und automatisch bestimmt werden (Hängt ab von Graphikkarte, Anzahl Lichtquellen, Texturen, ...)

G. Zachmann Computer-Graphik 2 - SS 08 Culling 28