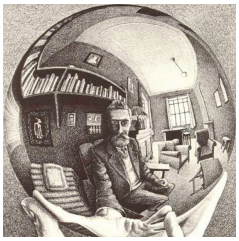
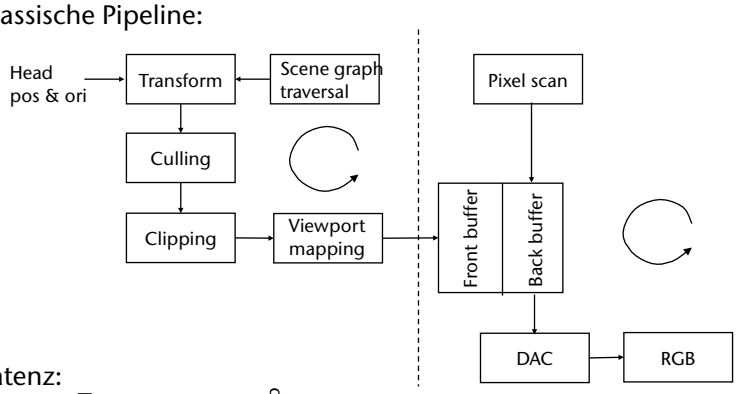
Virtuelle Realität
Real-time Rendering



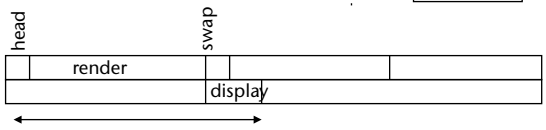
G. Zachmann
Clausthal University, Germany
cg.in.tu-clausthal.de

Latenz beim Rendering

- Klassische Pipeline:



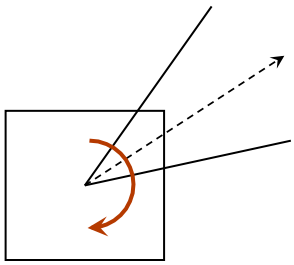
- Latenz:



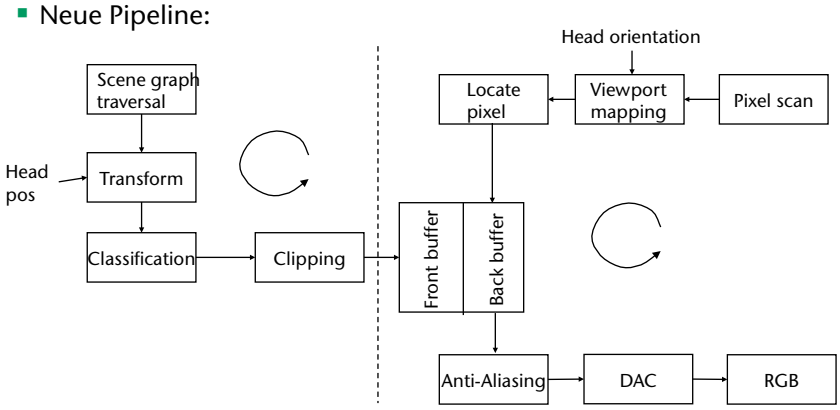
- Idee: rendere mehr als den Viewport

Viewport independent rendering

- Konzeptionelle Idee:
  - Rendere Szene auf Kugel um Betrachter
  - Bei Rotation des Viewpoints: Ausschnitt des Viewports neu wählen
  - Wähle statt Kugel einen Würfel (s.a. Cave)



- Neue Pipeline:



- Latenz:

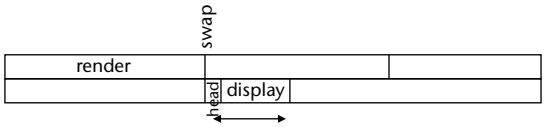
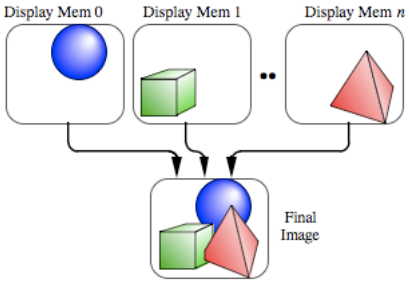
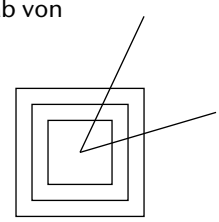


Image composition

- Konzeptionelle Idee:
  - *Video-Hardware* liest *Frame-Buffer* inkl. Z-Buffer
  - Objekte, die sich nicht bewegt haben, müssen nicht neu gerendert werden



- *Prioritized Rendering*:
  - Weit entfernte / langsame Objekte bleiben länger auf dem Bildschirm "gleich"
  - Idee: rendere auf mehrere (gedachte) Schalen
  - Wieviele Schalen neu gerendert werden, hängt ab von
    - Geforderte Framerate
    - Szenenkomplexität
    - Viewpoint-Bewegung
    - Objekt-Bewegung



- Human factors beeinflußen Priorität:
  - Keine Kopfdrehung um 180° → Objekte "hinten" nur selten updaten
  - Manipulierte Objekte haben hohe Priorität
  - Objekte in der Peripherie seltener updaten

Konstante Framerate durch "Weglassen"

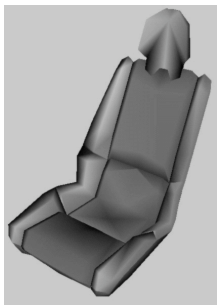
- Gründe für eine konstante Framerate:
  - Vorhersage bei *predictive filtering* funktioniert nur, wenn alle nachfolgenden Stufen der Pipeline immer gleich schnell arbeiten
  - Wahrnehmung von Framerate-Sprüngen (z.B. zwischen 60 und 30 Hz)
- Rendering als "*time-critical computing*":
  - Rendering bekommt bestimmtes Zeitbudget (z.B. 17 msec)
  - Rendering-Algorithmus muß Bild produzieren "so gut wie möglich"
- Techniken des "*Weglassens*":
  - Levels-of-Details (LOD)
  - Unsichtbare Geometrie weglassen (Culling)
  - *Image-based rendering*
  - *Lighting-Modell* reduzieren, Texturen reduzieren,
  - ? ...

Die Level-of-Detail-Technik

- Definition:

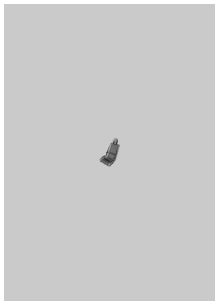
  Ein Level-of-Detail (LOD) eines Objektes ist eine reduzierte Version (d.h., weniger Polygone) einer (hoch-aufgelösten) Geometrie.
- Beispiel:





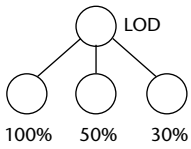
- Idee: verwende den LOD "passend" zur Entfernung vom Viewpoint



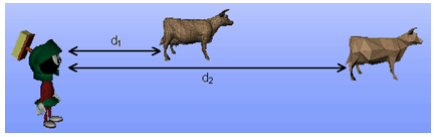


- Zwei Aufgaben:
  1. Preprocessing: Generierung von LODs
  2. Runtime: Auswahl des "richtigen" LODs, und ggf. "Blending"

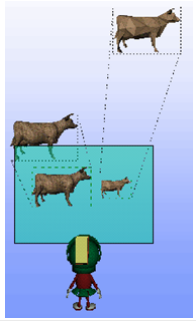
LOD-Selektion



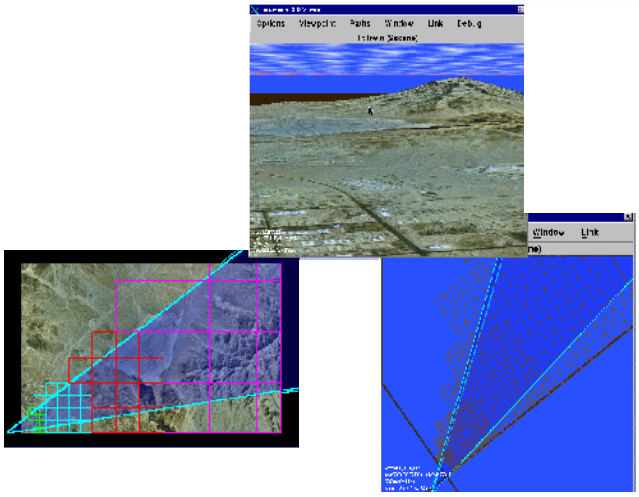
- Visuelle Güte gegen zeitliche Güte
- Wie selektiert man den "richtigen" Level?
- Statisch:
  - Level i für Entfernungsbereich (d_i, d_{i+1})
  - Abhängig von FOV
  - Größe des Obj unberücksichtigt



- Dynamisch:
  - Schätze Größe des Objektes auf dem Bildschirm
  - Unabhängig von Bildschirmauflösung, FOV, Größe des Obj
  - Ist automatisch entfernungsabhängig

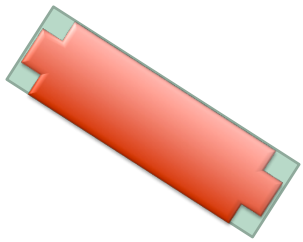


- Für Desktop-Applikationen i.A. schon ausreichend:



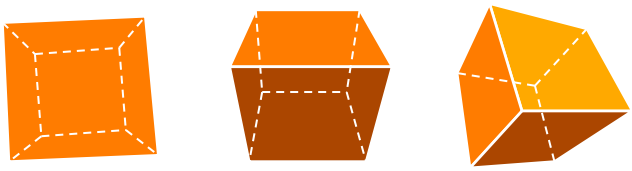
Größenabschätzung des Objektes auf dem Screen

- Naive Methode:
  - Berechne Bounding-Box (bbox) des Objektes in 3D
  - Projiziere Bbox nach 2D → 8 2D-Punkte
  - Bestimme 2D-Bbox (achsenparallel)
- Genauere Methode:
  - Bestimme wahre Fläche auf dem Screen der projizierten 3D-Bbox

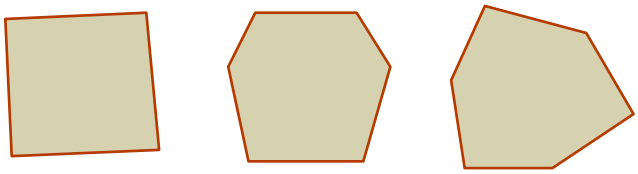


Idee des Algorithmus

- Bestimme die Anzahl der Seiten der Box, die in 2D sichtbar sind:



- Projiziere die Punkte auf der Silhouette (4 oder 6) nach 2D:



- Berechne den Betrag dieser (konvexen!) Fläche

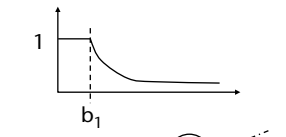
Implementierung

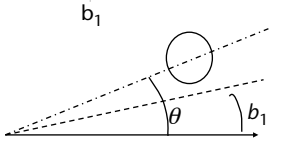
- Für jedes Paar von (parallelen) Seitenflächen (jeden Slab): klassifiziere Viewpoint bzgl. dieses Paares als "darunter", "darüber", oder "dazwischen"
- Ergibt 3x3x3 = 27 Möglichkeiten
  - M.a.W.: die Ebenen der Seitenflächen eines Würfels unterteilen den Raum in 27 Teilräume
- Verwende Bit-Codes (à la Out-Codes) und eine Lookup-Table
  - Ergibt 2^6 theoretische Einträge
- 27-1 Einträge der LUT listen die 4 oder 6 Vertices der Silhouette
- Dann nur noch projizieren, triangulieren, Flächen aufsummieren

Psychophysiologische LOD-Selektion

- Faktoren bzgl. der Sehschärfe:
  - Zentrum/Peripherie:

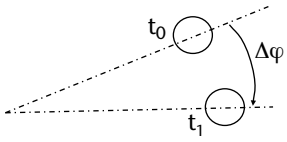
$$k_1 = \begin{cases} e^{-(\theta - b_1)/c_1} & , \theta > b_1 \\ 1 & , \text{sonst} \end{cases}$$





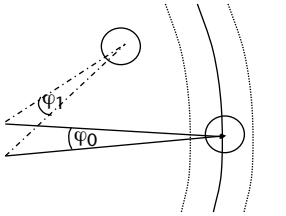
  - Bewegung:

$$k_2 = e^{-\frac{\Delta\varphi - b_2}{c_2}}$$



  - Unschärfe/Tiefe:

$$k_3 = e^{-\frac{|\varphi_0 - \varphi| - b_3}{c_3}}$$



- Bestimmung des LODs:
  1. $k = \min\{k_i\} \cdot k_0$, oder $k = \prod k_i \cdot k_0$
  2. $r_{\min} = 1/k$
  3. Selektiere Level *l* so, daß

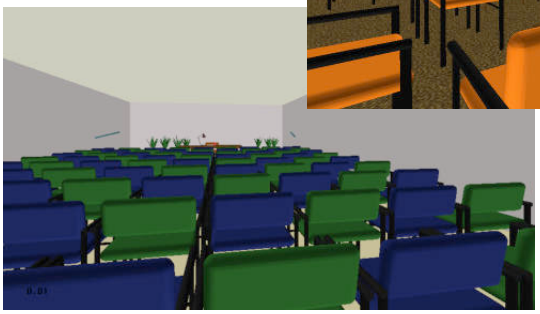
$$\forall p \in P_l : r(p) \geq r_{\min}$$

- Braucht man *Eye-Tracking*?
  - Teuer, ungenau, "*intrusive*"
  - Psychophysiologie: Augen immer < 15° ausgelenkt
  - Treffe die Annahme Kopfrichtung=Augenrichtung, und wähle b_1= 15°

Reaktive vs. Prädiktive LOD-Selektion

- Reaktive LOD-Selektion:
  - Verwalte Historie von Rendering-Zeiten
  - Bestimme daraus die geschätzte Zeit T_r für das kommende Frame
  - Sei T_b = das zur Verfügung stehende Zeit-Budget
  - Falls $T_r > T_b$: erniedrige LODs (gröbere Levels)
  - Falls $T_r < T_b$: wähle feinere Levels
  - Dann rendern und tatsächlich benötigte Zeit in die Historie aufnehmen

- Reaktive LOD-Selektion hat Ausreißer
- Beispiel-Szenen:



Prädiktive LOD-Selektion [Funkhouser und Sequin]

- Definition Objekt-Tupel (O,L,R):
  O = Objekt, L = Level,
  R = Rendering Algo (#Texturen, anti-aliasing, #Lichtquellen)

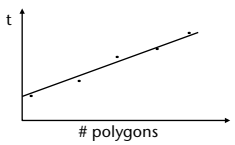
- Bewertungsfunktionen für Objekt-Tupel:
  Cost(O,L,R) = Rendering-Zeit
  Benefit(O,L,R) = "Beitrag zum Bild"

- Optimierungsproblem:
  suche $\max_{S' \subset S} \sum_{(O,L,R) \in S'} \text{benefit}(O, L, R)$
  unter der Bedingung $T_r = \sum_{(O,L,R) \in S'} \text{benefit}(O, L, R) \leq T_b$
  wobei $S = \{$ möglichen Objekt-Tupel in der Szene $\}$

- Cost-Funktion hängt ab von:
  - Anzahl Eckpunkte (~ *# Koord. Trafos + Lighting-Calcs + Clipping*)
  - Setup pro Polygon
  - Anzahl Pixel (*Scanline-Konvertierung, Alpha-Blending, Textur, Anti-Aliasing, Phong*)
  - Theor. Kostenmodell:

$$\text{Cost}(O, L, R) = \max \begin{Bmatrix} C_1 \cdot \text{Poly} + C_2 \cdot \text{Vert} \\ C_3 \cdot \text{Pixels} \end{Bmatrix}$$

- Besser experimentell bestimmen:
  Rendere versch. Objekte mit allen möglichen verschiedenen Parametern



- Benefit-Funktion: in den "Beitrag" zum Bild gehen ein
  - Größe
  - Rendering-Methode: $\text{Rendering}(O, L, R) = \begin{cases} 1 - \frac{c}{\text{pgons}} & \text{, flat} \\ 1 - \frac{c}{\text{vert}} & \text{, Gouraud} \\ 1 - \frac{c}{\text{vert}} & \text{, Phong} \end{cases}$
  - Distanz vom Zentrum (Peripherie, Tiefe)
  - Geschwindigkeit
  - Semantische "Wichtigkeit"
  - Hysterese:
    $$\text{Hysterese}(O, L, R) = \frac{c_1}{1 + |L - L'|} + \frac{c_2}{1 + |R - R'|}$$
  - Zusammen:
    $$\begin{aligned} \text{Benefit}(O, L, R) = &\text{Size}(O) \cdot \text{Rendering}(O, L, R) \cdot \\ &\text{Importance}(O) \cdot \text{OffCenter}(O) \cdot \\ &\text{Vel}(O) \cdot \text{Hysteresis}(O, L, R) \end{aligned}$$

- Optimierungsproblem: "*multiple-choice knapsack problem*"
  → NP-vollständig
- Idee: berechne sub-optimale Lösung :
  - Rückführung auf kontinuierliches Rucksackproblem
  - Dann greedy lösen mit zusätzlichem Constraint
  - Definiere
    $$\text{value}(O, L, R) = \frac{\text{benefit}(O, L, R)}{\text{cost}(O, L, R)}$$
  - Sortiere alle Objekt-Tupel nach Value(*O,L,R*)
  - Wähle die ersten Objekt-Tupel bis Rucksack voll
  - Constraint: keine 2 Objekt-Tupel dürfen dasselbe Objekt darstellen

- Inkrementelle Lösung:
  - Starte mit der Lösung $(O'_1, L'_1, R'_1), \ldots, (O'_n, L'_n, R'_n)$ vom letzten Frame
  - Falls

$$\sum_i \text{cost}(O_i, L_i, R_i) \leq \text{max. Frame-Zeit}$$

dann suche Objekt-Tupel (O_k, L_k, R_k) ,
so daß

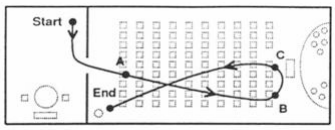
$$\text{value}(O_k, L_k + a, R_k + b) - \text{value}(O_k, L_k, R_k) = \max$$

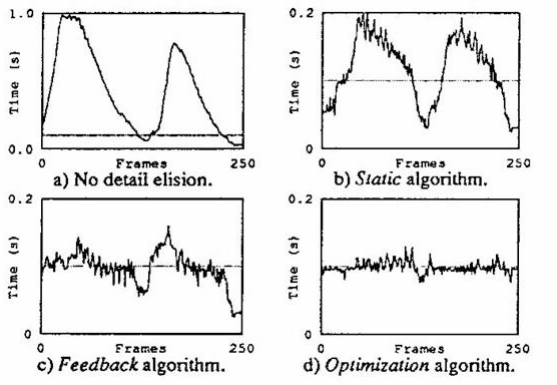
und

$$\sum_{i \neq k} \text{cost}(O_i, L_i, R_i) + \text{cost}(O_k, L_k + a, R_k + b) \leq \text{max. Frame-Zeit}$$

- Analog, falls $\sum_i \text{cost}(O_i, L_i, R_i) > \text{max. Frame-Zeit}$

- Performance in der Beispielszene:





Screenshots aus der Beispielszene

No detail elision, 19,821 polygons

Optimization, 1,389 polys,
0.1 sec/frame target frame time

Level of detail: darker
gray means more detail

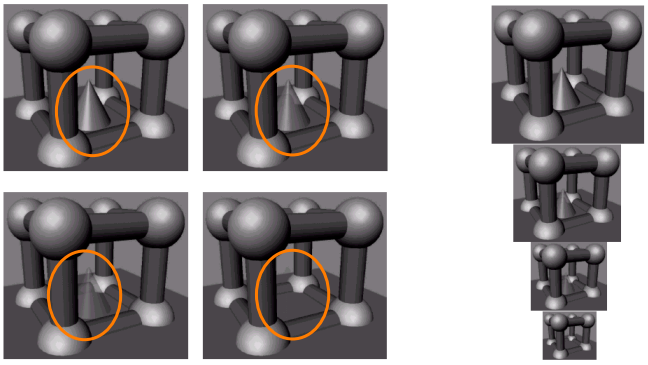
Probleme von diskreten LODs

- "Popping" beim Umschalten zwischen Levels
- Maßnahmen gegen "Popping":
  - Hysterese
  - Alpha-Blending der beiden benachbarten LOD-Stufen
    - Man kommt vom Regen in die Traufe ;-)
  - Kontinuierliche, view-dependent LODs
- Wie funktioniert der Funkhouser-Sequin-Algo mit kontinuierlichen LODs?

Diplomarbeit ...

Alpha-LODs

- Einfache Idee:
  when beyond a certain range, fade out object until gone

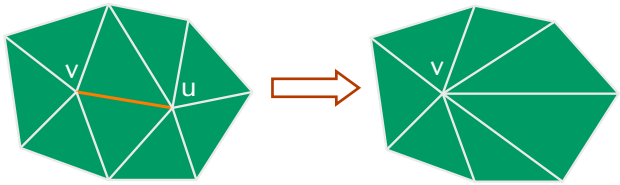


Progressive Meshes

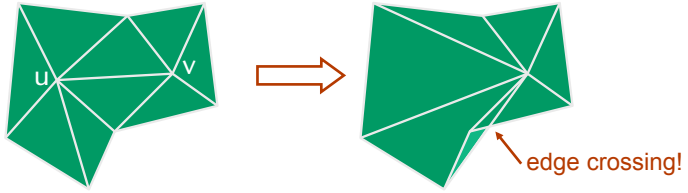
- A.k.a. Geomorph LODs
- Idee:
  - Gegeben zwei Meshes (LODs desselben Objektes) M_i und M_{i+1}
  - Erzeuge ein Mesh M' "zwischen" diesen beiden
- Definition: Progressive Mesh = Repräsentation eines Objektes, ausgehend von einem hoch-aufgelösten Mesh M_0, mit Hilfe derer man (fast) stufenlos zwischen 1 Polygon und M_0 "Zwischen-Meshes" generieren kann (möglichst schnell).

Erzeugung von Progressive Meshes

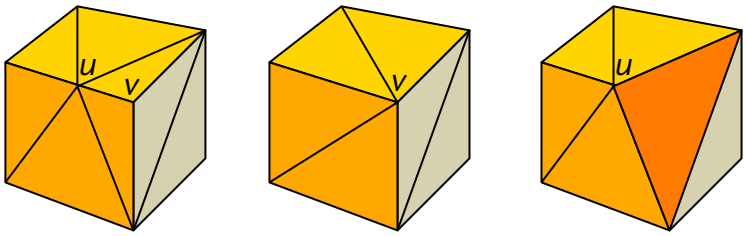
- Simplifizierung (*simplification*)
- Grundlegende Operation: *edge collapse*



- Bad Edge Collapses:

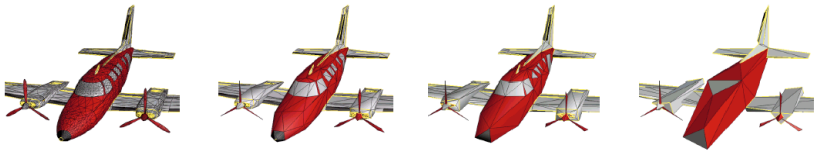


- Reihenfolge der Edge Collapses:
  - Führe Bewertung eines Edge-Collapses ein, die visuellen Effekt "misst"



  - Führe zunächst Edge Collapses mit kleinster Auswirkung aus
  - Nach jedem Schritt müssen im Prinzip alle Kanten neu bewertet werden

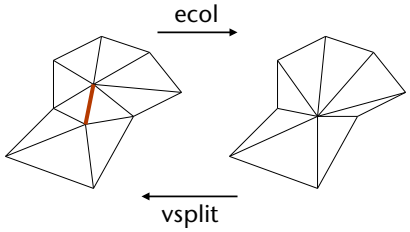
- Bewertungsfunktion für Edge-Collapses ist nicht trivial und, vor allem, wahrnehmungsbasiert!
- Beeinflussende Faktoren:
  - Krümmung der Kanten / Fläche
  - Beleuchtung, Texturierung, Viewpoint (Highlights!)
  - Bedeutung der Geometrie (Augen & Mund sind besonders wichtig)
- Beispiel eines Progressive Mesh:



- Repräsentation eines Progressive Meshes:

$$M = M^n \underset{\text{vsplit}_{n-1}}{\overset{\text{ecol}_{n-1}}{\longleftrightarrow}} \cdots \underset{\text{vsplit}_1}{\overset{\text{ecol}_1}{\longleftrightarrow}} M^1 \underset{\text{vsplit}_0}{\overset{\text{ecol}_0}{\longleftrightarrow}} M^0$$

  - M^{i+1} = i-te Verfeinerung (*refinement*) = 1 Vertex mehr als M^i



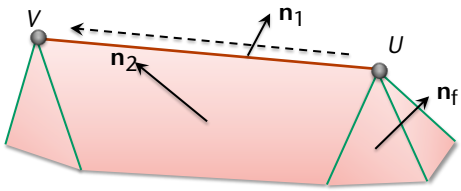
- Repräsentation eines Edge Collapse / Vertex Split:
  - Betroffenes Paar von Vertices (Kante)
  - Position des "neuen" Vertex
  - Dreiecke, die gelöscht / eingesetzt werden

Eine einfache Bewertungsfunktion

- Heuristik:
  - Kleine Kanten zuerst entfernen
  - Einen Vertex *U* auf einen Vertex *V* ziehen, falls die Fläche um *U* eine geringe (diskrete) Krümmung hat
- Ein einfaches Kostenmaß für einen Edge-Collapse von *U* auf *V*:

$$\text{cost}(U, V) = \|U - V\| \cdot \text{curv}(U)$$

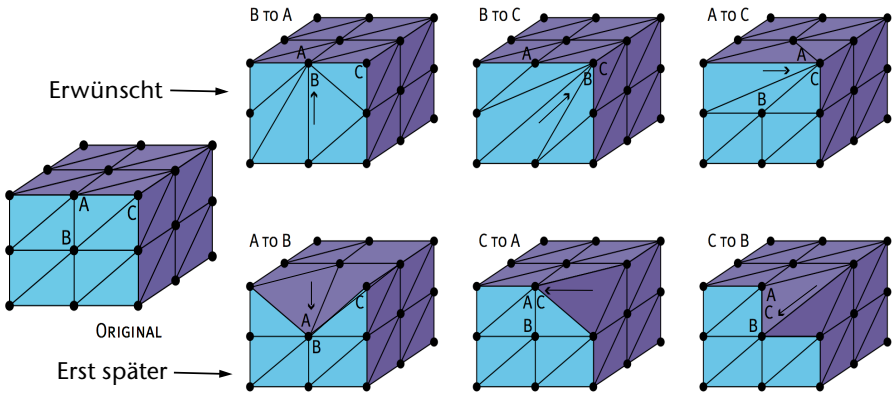
$$\text{curv}(U) = \frac{1}{2}\Big(1 - \min_{f \in T(U) \setminus T(V)} \max_{i=1,2} \mathbf{n}_f \mathbf{n}_i\Big)$$



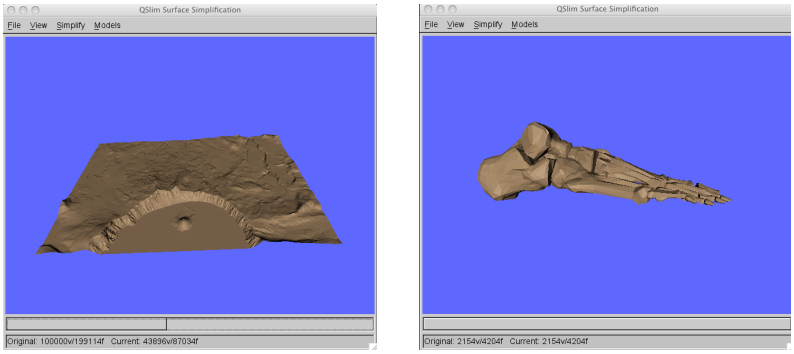
- Bemerkung:

$$\text{cost}(U, V) \neq \text{cost}(V, U)$$

- Beispiel:



Demo



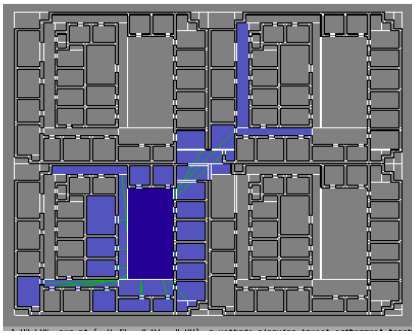
[Michael Garland: Qslim]

Exkurs: andere LODs

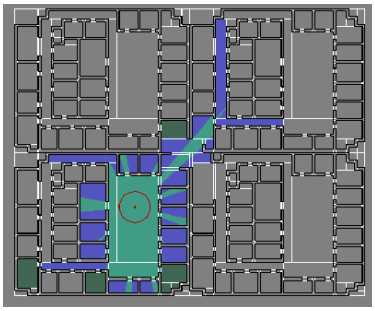
- Idee: LOD-Technik auf nicht-geometrische Inhalte anwenden
- Z.B. "*Behavioral LOD*":
  - Simuliere Verhalten eines Objektes exakt, wenn im Fokus, sonst nur "grob"

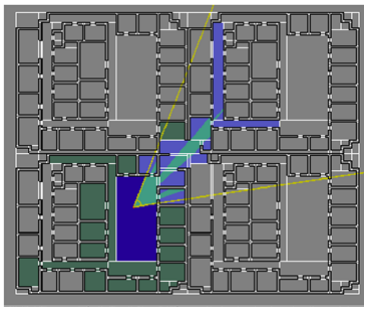
Culling in Gebäuden (portal culling)

- Beobachtung: viele Räume innerhalb des Viewing-Frustums sind nicht sichtbar
- Idee:
  - Unterteile Raum in "Zellen"
  - Berechne *Cell-to-Cell-Visibility* im voraus



- Von bestimmtem Viewpoint aus ist innerhalb der Zelle noch weniger sichtbar:





State Sorting

- State = Zustand =

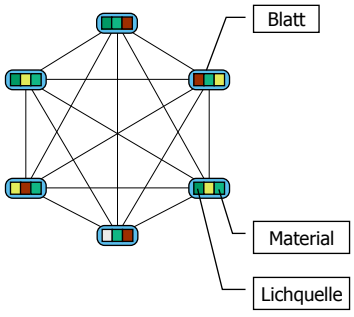
  - Zusammenfassung aller Attribute
  - Beispiele für Attribute: Farbe, Material, Lighting-Param., Textur, Blend-Fkt., Shader-Programm, etc.
  - Jedes Attribut hat zu jedem Zeitpunkt genau 1 Wert aus einer endlichen Menge
- State-Wechsel sind einer der Performance-Killer
- Kosten:

Matrix-Stack-Modifikation | Lighting-Modifikation | Textur-Modifikation | Shader-Programm-Modifikation

- Ziel: kompletten Szenengraphen mit minimaler Anzahl State-Wechsel rendern
- "Lösung": Pre-Sorting

- Problem: die optimale Lösung ist NP-vollständig
- Denn:
  - Jedes Blatt ist ein Knoten in einem vollständigen Graphen,
  - Kosten einer Kante = Kosten der State-Wechsel (verschiedene State-Wechsel kosten verschieden viel, z.B. sind neue Trafos relativ billig),
  - Gesucht: kürzester Weg

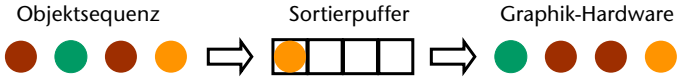
  →*Traveling Salesman Problem*



- Weiteres Problem: klappt nicht bei dynamischen Szenen und Occlusion Culling

Der Sorting-Buffer

- Idee & Abstraktion:
  - Betrachte nur ein Attribut ("Farbe")
  - Schalte Buffer zwischen App. und Graphikkarte
  - Buffer enthält Elemente mit verschiedenen Farben
  - Pro Schritt eine von drei Operationen:
    - Element direkt an Graphikkarte weiterreichen
    - Element lesen und in Buffer schreiben
    - Teilmenge aus Buffer löschen und an Graphikkarte schicken



- Zwei Algorithmen-Klassen:
  - "Online"-Algorithmen: Algo kennt *nicht* zukünftige Elemente!
  - "Offline"-Algorithmen: Algo kennt *alle* Elemente, muß aber trotzdem Buffer verwenden
- Betrachte nur "lazy" online-Strategie:
  - Elemente werden nur bei Buffer-Overflow aus Buffer entfernt
  - Jede nicht-lazy Online-Strategie läßt sich in eine lazy Strategie mit gleichen Kosten umwandeln
- Frage: welche Elemente muß man bei Buffer-Overflow auswählen, damit minimale Anzahl Farbwechsel auftritt?

Competitive Analysis

- Definition *c-competitive* :
  Sei $C_{off}(k)$ die Kosten (Anzahl Farbwechsel) der optimalen Offline-Strategie, k = Buffer-Größe.
  Sei $C_{on}(k)$ die Kosten der Online-Strategie.
  Dann heißt diese Strategie "c-competitive" gdw.
  $$C_{on}(k) = c \cdot C_{off}(k) + a$$
  wobei a von k unabhängig ist.
- Gesucht: Online-Strategie mit möglichst kleinem c
  (im worst-case, und — wichtiger noch — im average case)

Beispiel: LRU (least-recently used)

- Strategie:
  - Pro Farbe ein Timestamp (nicht pro Element!)
  - Element wird in Buffer geschrieben →
    Timestamp seiner Farbe wird auf aktuelle Zeit gesetzt
    - Achtung: dabei können die Timestamps anderer Elemente im Buffer auch aktualisiert werden
  - Buffer-Overflow: entferne Elemente, deren Farbe ältesten Timestamp hat
- Untere Schranke für die Competitive-Ratio: $\Omega(\sqrt{k})$
- Beweis durch Beispiel:
  - Setze $m = \sqrt{k-1}$, oBdA m gerade
  - Wähle die Eingabe $\left(c_1 \cdots c_m x^k c_1 \cdots c_m y^k\right)^{\frac{m}{2}}$
  - Kosten der Online-LRU-Strategie: $(m+1) \cdot 2 \cdot m/2 > k$ Farbwechsel
  - Kosten der Offline-Strategie: Ausgabe $\left(x^k y^k\right)^{\frac{m}{2}} c_1^m \cdots c_m^m$
    → $2m$ Farbwechsel

Bounded-Waste- & Random-Choice-Strategie

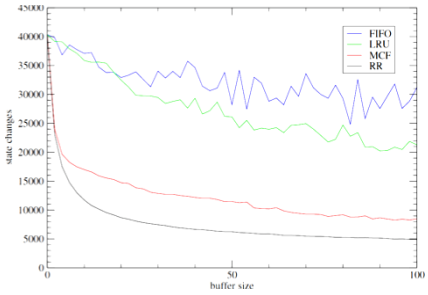
- Idee: zähle Platzbedarf jeder Farbe im Buffer über die gesamte bisherige Zeit aufsummiert
- Führe Waste-Zähler W(c) ein:
  - Bei Farbwechsel: erhöhe W(c) um Anzahl Elemente im Buffer mit Farbe c
- Bounded-Waste-Strategie:
  - Bei Buffer-Overflow entferne alle Elemente mit Farbe c', mit W(c') maximal
- Competitive Ratio (o.Bew.): $O \log^2 k$
- Random-Choice-Strategie:
  - Randomisierte Version von Bounded-Waste
  - Wähle uniform zufälliges Element aus Buffer, entferne alle Elemente mit derselben Farbe
  - Damit: häufige Farbe wird häufiger ausgewählt, über die Zeit ergibt sich gerade W(c)

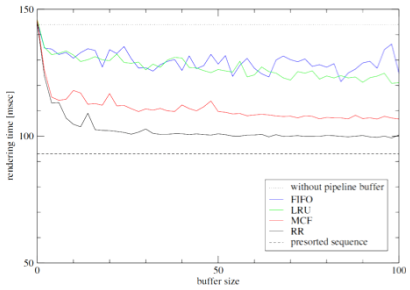
Round-Robin-Strategie

- Problem: Generierung guter Zufallszahlen dauert rel. lange
- RR-Strategie:
  - Variante von Random-Choice
  - Wähle nicht zufälligen Slot im Buffer, sondern den gemäß eines Pointers
  - Pointer wird in Round-Robin-Manier weitergeschaltet

Vergleich

- Fazit:
  - Round-Robin ist sehr gut (obwohl sehr einfach)
  - Worst-Case sagt sehr wenig über prakt. Perf.





Stereo ohne 2x rendern (einfaches Image-Warping)

- Beobachtung: linkes und rechtes Bild unterscheiden sich wenig
- Idee: 1x für rechts rendern, dann Pixel verschieben
- Algo: betrachte alle Pixel auf jeder Scanline *von rechts nach links*, zeichne Pixel *k* an neuer x-Pos.

$$x'_k = x_k + \frac{i}{\Delta}\frac{z_k}{z_k + z_0}, \quad \Delta = \text{Pixelbreite}$$

- Probleme:
  - Löcher!
  - Up-Vektor muß senkrecht sein
  - Reflexionen und specular highlights sind an falscher Pos
  - Aliasing

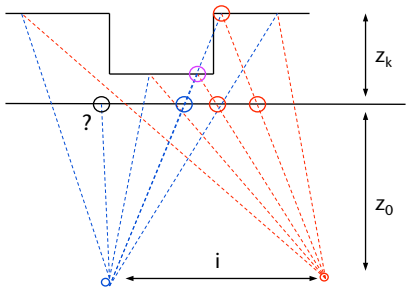
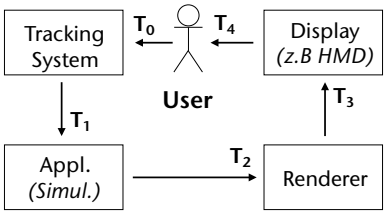
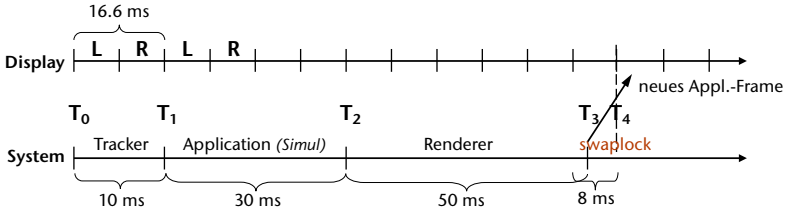


Image Warping

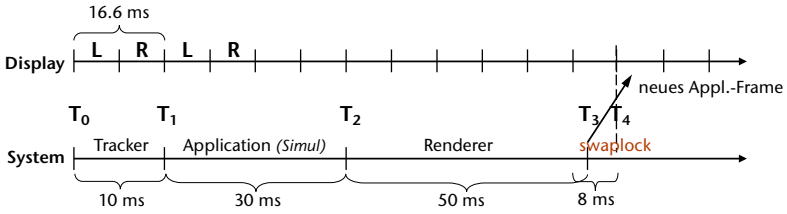
- Ein naives VR-System:



- Latenz in diesem System (Stereo mit 60 Hz → Display-Refresh = 120 Hz):

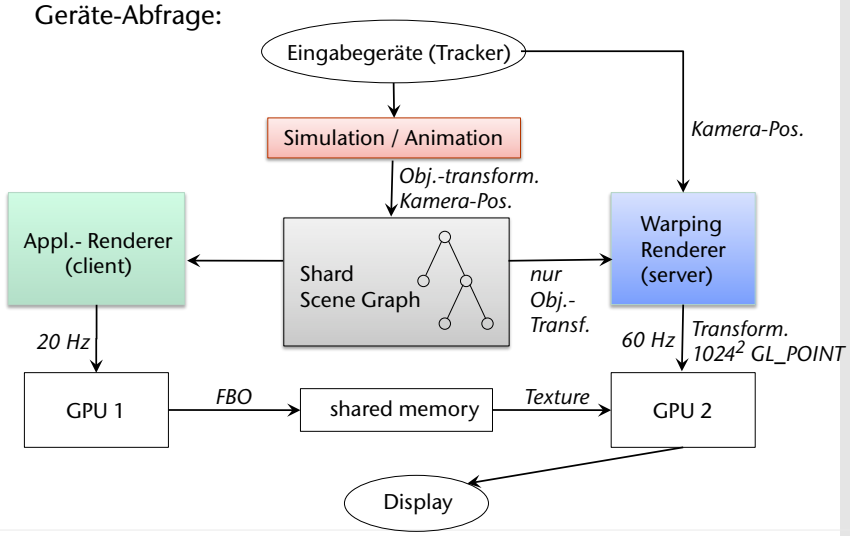


- Probleme / Beobachtungen:
  - Die Appl.-Framerate (inkl. Rendering) ist typischerweise viel langsamer als die Display-Refresh-Rate
  - Die Tracking-Werte, die zu einem bestimmten Bild geführt haben, liegen sehr weit in der Vergangenheit
  - Der Tracker könnte wesentlich öfter aktuelle Werte liefern
  - Die Frames unterscheiden sich (normalerweise) rel. wenig voneinander (temporal coherence)



Lösungsidee [2009]

- Entkopple Simulation / Animation, Rendering, und Geräte-Abfrage:



Ein Application-Frame (client)

- Der App.-Renderer rendert zu einem Zeitpunkt t_1 ein ganz normales Frame
  - Color-Buffer und Z-Buffer
- ... und speichert zusätzlich einige Informationen:
  - zu jedem Pixel eine Obj-ID, das dort sichtbar ist
  - die Kamera-Transformationen zum Zeitpunkt t_1

$$T_{t_1,cam \leftarrow img} \quad , \quad T_{t_1,wld \leftarrow cam}$$

  - zu jedem Obj i die Tansformation

$$T^i_{t_1,obj \leftarrow wld}$$

Warping eines Frames (server)

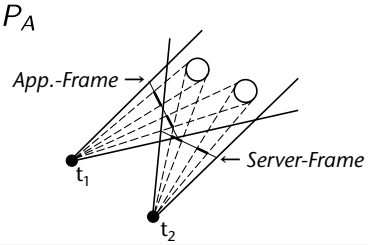
- Zu einem späteren Zeitpunkt t_2 generiert der Server ein Bild aus dem Application-Frame mittels Warping
- Transformationen zu diesem Zeitpunkt:

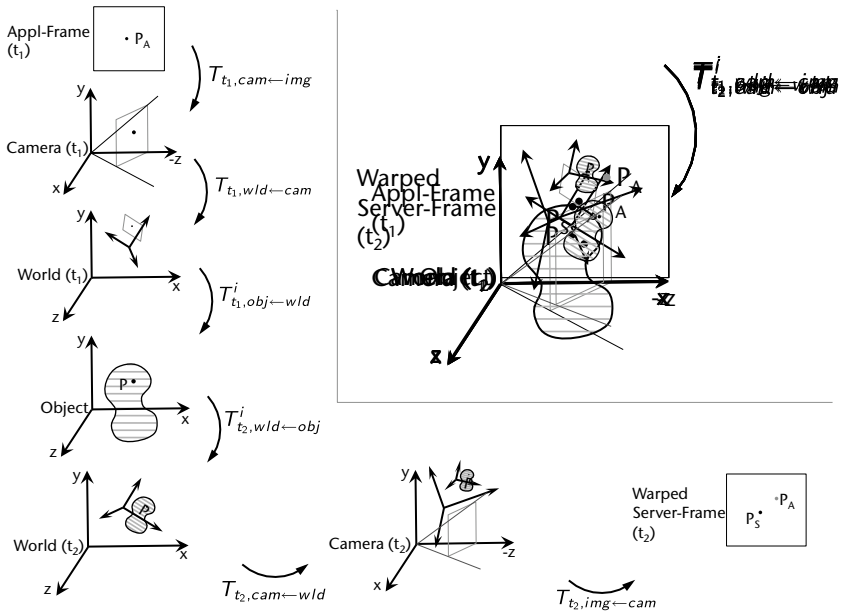
$$T^{i}_{t_2,wld\leftarrow obj} \qquad T_{t_2,img\leftarrow cam} \qquad T_{t_2,cam\leftarrow wld}$$

- Ein Pixel $P_A = (x, y, z)$ aus dem App.-Frame wird damit an die richtige Stelle im Server-Frame "gewarped":

$$P_S = T_{t_2,img\leftarrow cam} \cdot T_{t_2,cam\leftarrow wld} \cdot T^{i}_{t_2,wld\leftarrow obj} \cdot T^{i}_{t_1,obj\leftarrow wld} \cdot T_{t_1,wld\leftarrow cam} \cdot T_{t_1,cam\leftarrow img} \cdot P_A$$

- Diese Transf.-Matrix kann man zu Beginn eines Server-Frames für jedes Objekt vorberechnen

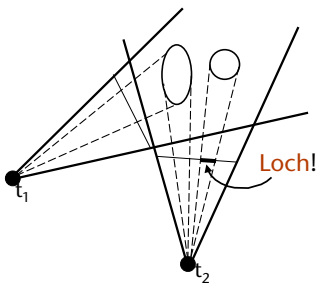




Bewertung

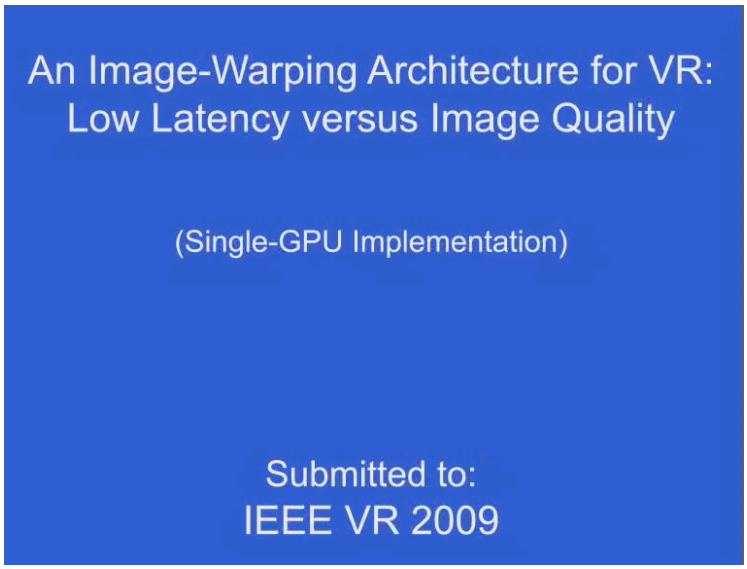
- Implementierung des Warpings:
  - Im Vertex-Shader
    - Geht nicht im Fragment-Shader, da dort Output-Pos. festgelegt ist !
  - Warping Renderer lädt FBO des App.-Frames in Textur, dito alle Ti's
  - Rendere 1024x1024 viele GL_POINTs (sog. Point-Splats)
- Vorteile:
  - Die Frames sind wesentlich aktueller (Kamera und Obj-Pos.!)
  - Server-Framerate ist unabhängig von Anzahl Polygone

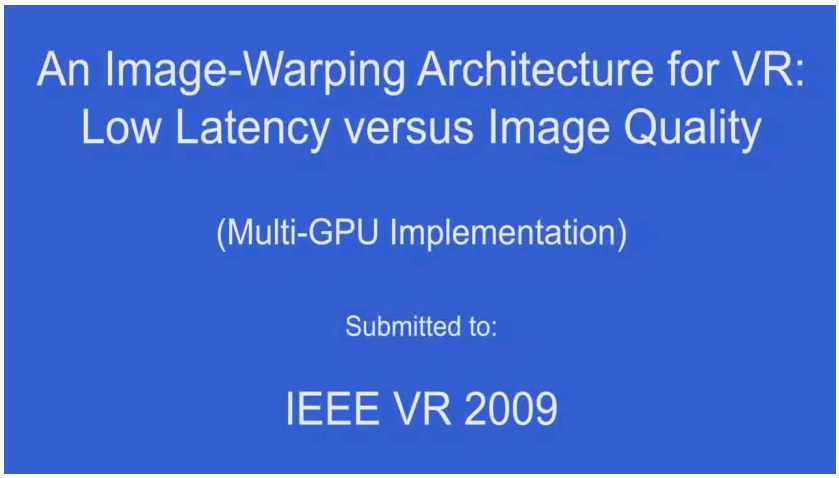
- Probleme:
  - Löscher im Server-Frame
  - Server-Frames sehen unscharf aus (wg. Point-Splats)
  - Wie groß sollen die Point-Splats sein? (kann man zwar abschätzen, aber ...)
  - Wann die App.-Renderer-Framerate zu langsam, dann werden die Server-Frames doch zu schlecht
  - Leere Stellen an den Rändern des Servers-Frames (evtl. View-Frustum im Client vergrößern)



- Performance-Gewinn:
  - 12 Mio Polygone, 800 x 600
  - ca.(!) Faktor 20 schneller

Videos


An Image-Warping Architecture for VR:
Low Latency versus Image Quality
(Single-GPU Implementation)
Submitted to:
IEEE VR 2009


An Image-Warping Architecture for VR:
Low Latency versus Image Quality
(Multi-GPU Implementation)
Submitted to:
IEEE VR 2009