



Parallelisierung



- Einfache (triviale) Parallelisierung:
 - "Grobkörnige" Parallelisierung = Verteilung auf mehrere CPU / Cores
 - → daher auch "*thread-level parallelism*" (TLP)
 - Implementierung:
 - mehrere Threads (\approx Prozesse), shared memory
 - mehrere Prozesse, auf mehrere Rechner verteilt, kopiere Szene auf alle Rechner
 - jeder Prozeß / Thread bekommt eine Kachel des Bildes
 - Vorteil: (fast) keine Synchronisation notwendig (nur ganz zum Schluss)
- *Dynamic Load Balancing*:
 - Teile Bild auf in $k \cdot n$ Kacheln, $n = \# \text{ Procs}$, $k = 10 \dots 100$
 - Jeder Prozessor (Worker) holt sich das nächste Work-Packet (eine Bild-Kachel) aus dem Pool, sobald er mit der alten fertig ist
 - Spruch: "ray tracing is embarrassingly parallel"
- Mehr dazu in VL über Verteilte Systeme o.ä.



- Weitere Parallelisierungsart: *Instruction-Level Parallelism* (ILP)

- Beispiel:

```
int a = x + y;           // process 1
int b = u + v;           // process 2
int c = a + b;           // wait for proc 1 & 2
```

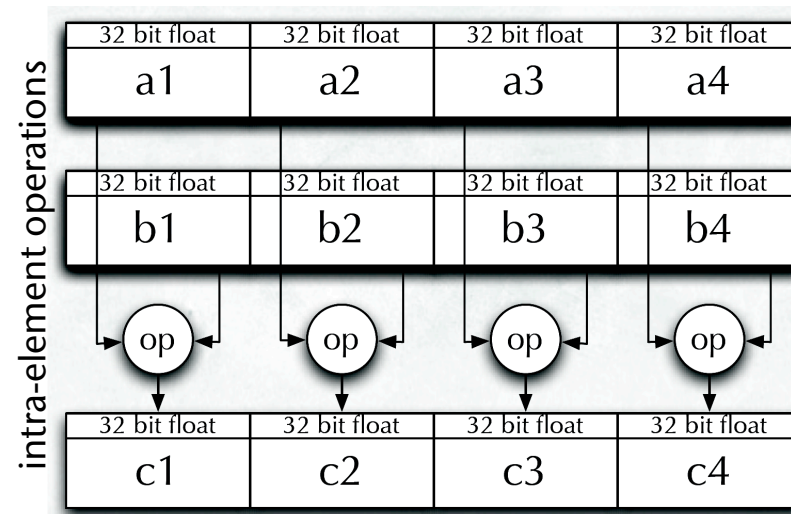
- Bemerkung:
 - das machen CPU & Compiler heutzutage von alleine
- Bringt für kd-Tree (z.B.) gar nichts:
 - Arbeit pro Knoten beim Traversal =
 - Float laden
 - Branch (für Splitting-Achse x, y, z)
 - Div. & Add.
 - Branch (welches Kind zuerst)
 - Branches machen ILP zunichte



- Weitere Parallelisierung: *data parallelism*
 - *SIMD (single instruction multiple data)*
 - Alle Register (Float/Int) einer CPU sind **4-fach** vorhanden → Vektor
 - Eine Operation kann auf alle 4 Komponenten gleichzeitig angewandt werden
 - M.a.W.: alle Rechenoperationen sind **gleich zeitaufwendig**, egal ob auf einzelnen Float, oder 4-fach Vektor

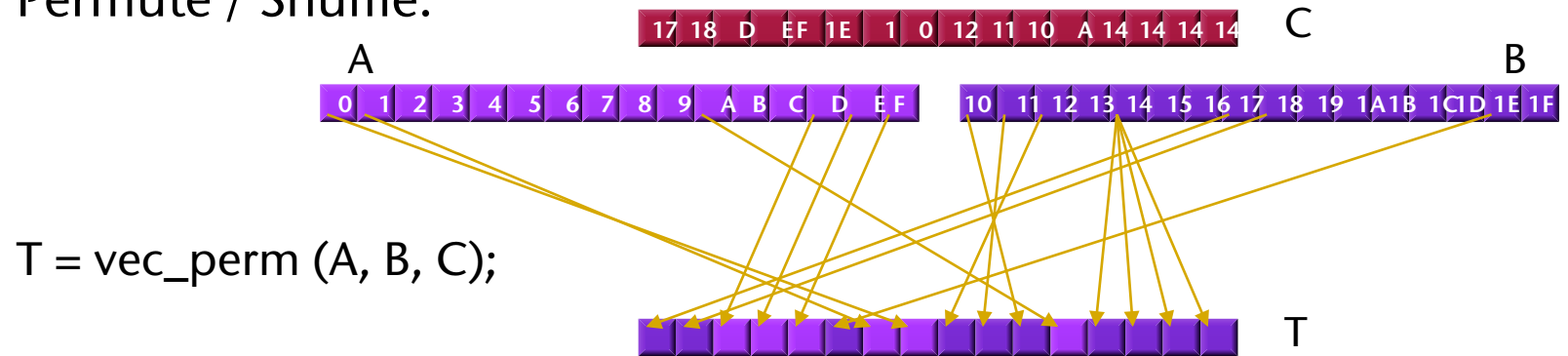


- Typischer SIMD-Befehlssatz (AltiVec, SSSE):
 - Alle Float/Int-Operationen (Add., Mult., Comp., Round., Load/Store, ...) komponentenweise auf ein Paar von Vektoren ("*intra-element op.*")
 - **Inter-element-Operationen** (permute, pack/unpack, merge, splat, ...)
 - "**Horizontale**" Operationen = "**reduce**" (horizontal subtract, add, ...)
 - Komplexere Op.: Dot product (SSE4)

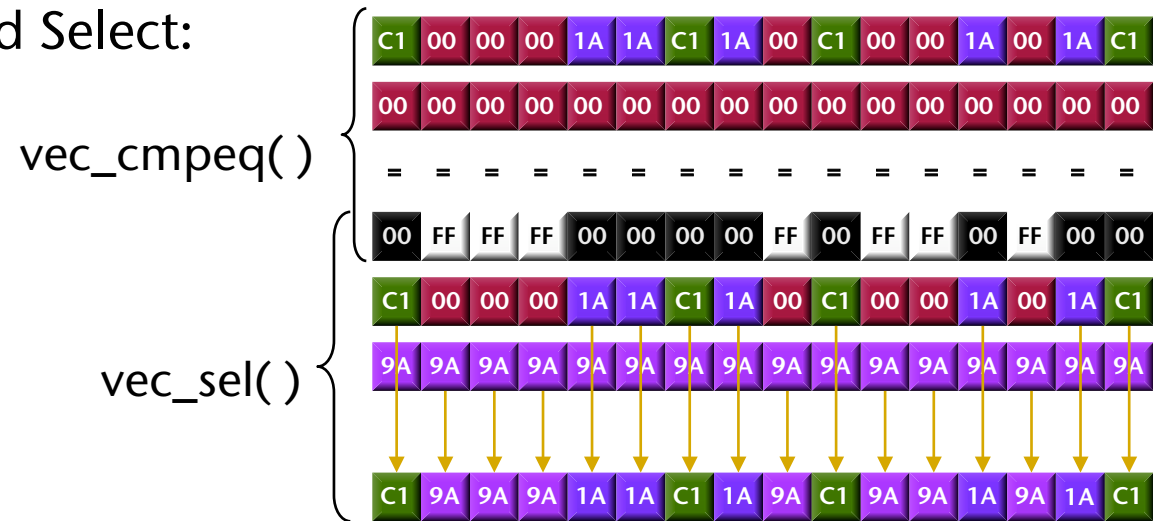




■ Permute / Shuffle:



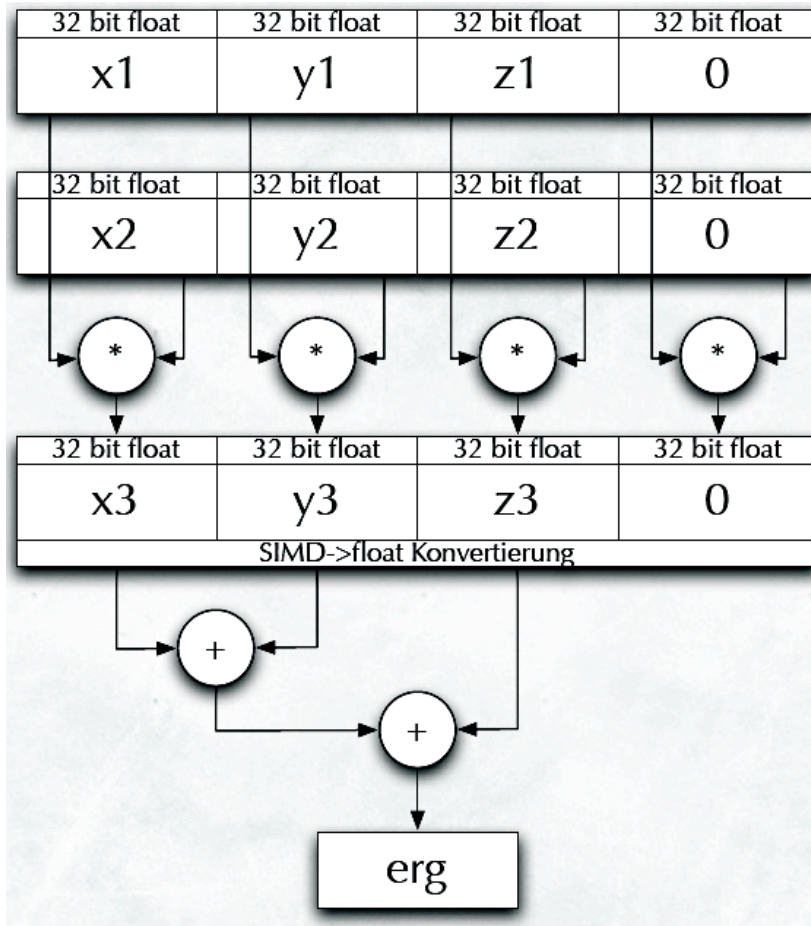
■ Compare and Select:



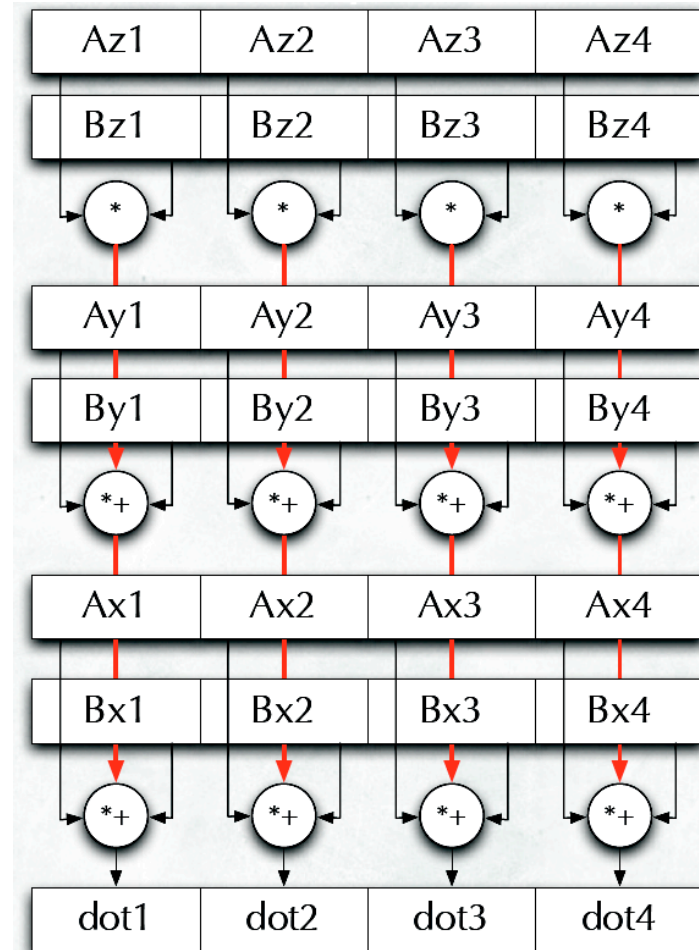


Beispiel 3D-Skalarprodukt

1 Skalarprodukt



4 Skalarprodukte



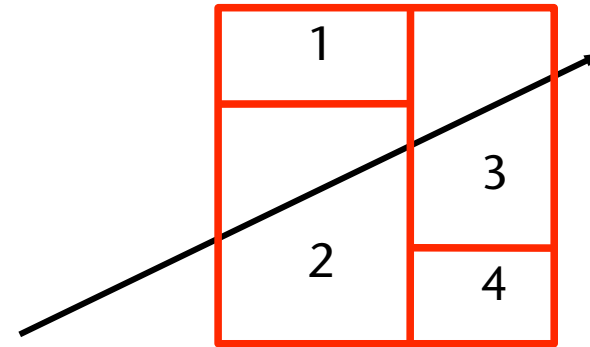


Anwendung auf kd-Tree-Traversal



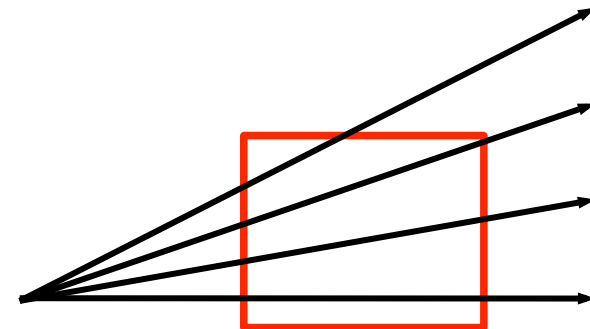
1. Variante: 1 Ray, 4 Objekte

- Problem: Daten-"Objekte" müssen von der gleichen Art sein
- Kontrollfluß muß gleich sein



2. Variante: 4 Rays (*Ray Packet*), 1 Objekt

- Daten-"Objekte" sind alle gleich
- Genug Strahlen sind vorhanden
- Damit Kontrollfluß gleich ist, müssen Strahlen möglichst dicht beieinander liegen





SIMD-Algo für Schnittest Ray-Packet / Box



- Erinnerung: schneide Strahl sukzessive gegen Slabs

```
// A/B = linke/rechte Seite der Bbox
// d = Richtungsvektor, O = Aufpunkt des Strahls
// d'_a = 1 / d_a
// alle Operationen, auch min/max, sind komponentenweise!

t_min = -∞
t_max = ∞
loop a = x, y, z:

    t_1 = (Ā_a ⊖ O_a) ⊙ d'_a
    t_2 = (B̄_a ⊖ O_a) ⊙ d'_a
    t_min = max( min(t_1, t_2), t_min )
    t_max = min( max(t_1, t_2), t_max )

return ! all_ge(t_min, t_max) && all_le(t_max, 0)
```

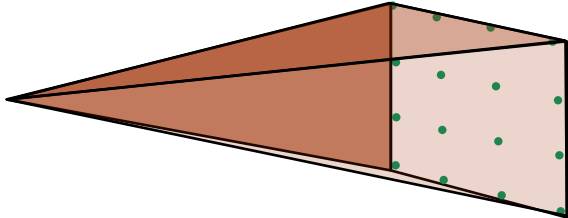
liefert 1, wenn alle 4 Komponenten von t_{\min} größer der jew. Komponente in t_{\max} ist



Frustum-Tracing im kd-Tree

[2005]



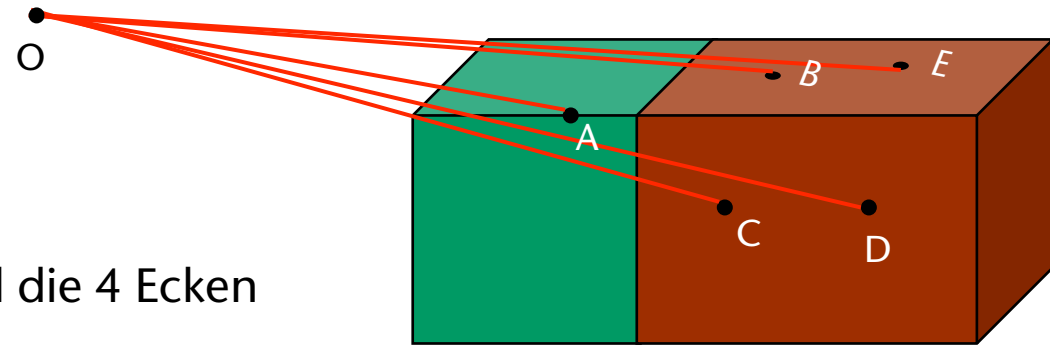
- Ziel: mehr als nur 4 Strahlen auf einmal
 - Verfolge also ganzes Strahlbündel durch kd-Baum
 - Idee: repräsentiere Strahlenbündel als Frustum
- 
- Bisher: beim Traversieren wurde Entscheidung immer für 1 Strahl getroffen
 - Z.B.: "nur linker Teilbaum" / "nur rechter Teilbaum"
 - Beim Packet / Frustum Tracing: treffe "Oder"-Entscheidung für **alle** Strahlen
 - Z.B.: falls 1 Strahl den linken Teilbaum trifft → trace das ganze Paket durch den linken Teilbaum ; dito für rechten Teilbaum



- Erste (problematische) Idee:, checke nur die Eckstrahlen

- Gegenbeispiel:

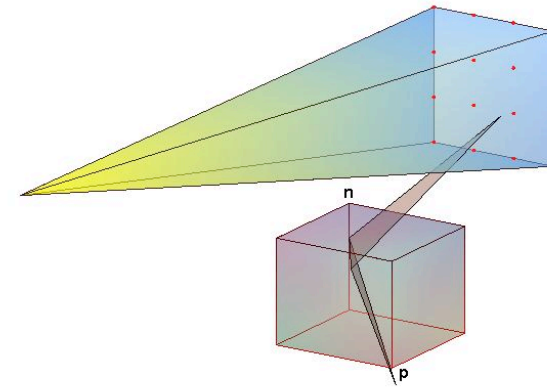
- Strahlen B, C, D, E sind die 4 Ecken des Strahlbündels
- Strahl A liegt in der Ebene von B und C
- Alle 4 Eckstrahlen schneiden nur die rechte Zelle; aber Strahl A schneidet die linke!





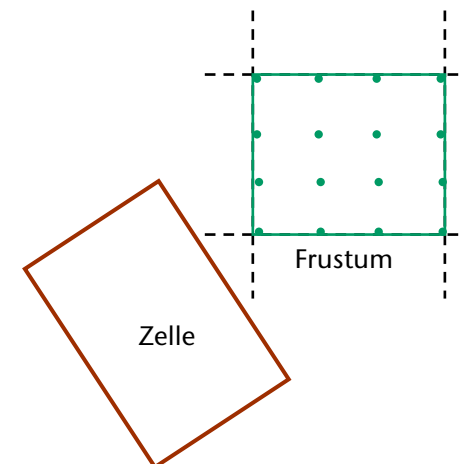
■ Bessere Idee:

- Verwende die Technik vom View-Frustum-Culling
- Test: Box (= kd-Tree-Zelle) schneidet Frustum (= BV des Strahlbündels)?
- Möglicher Algorithmus: wie beim View-Frustum-Culling [Möller]



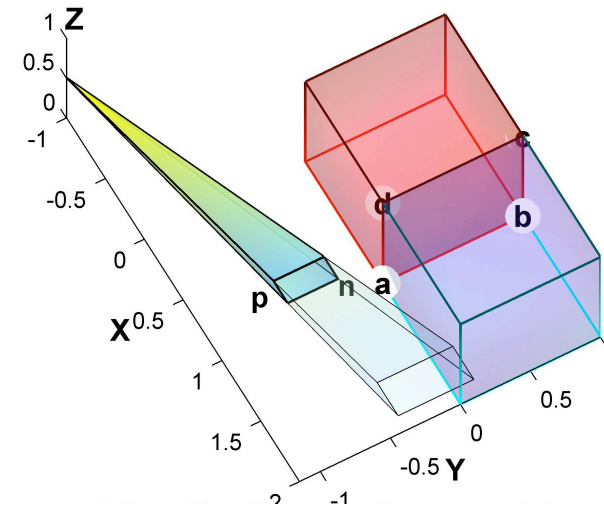
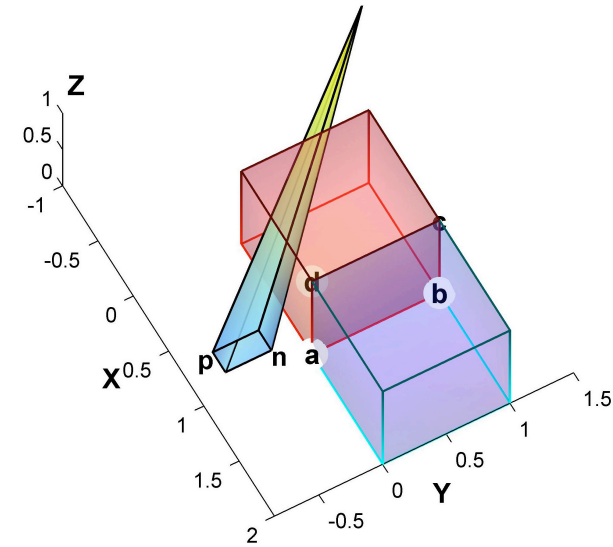
■ Probleme:

- Frustum hier ist lang & schmal → viele "false positives"
- Wir machen zu viel Arbeit:
 - Wir wissen schon, daß das Frustum die Vater-Zelle schneidet!



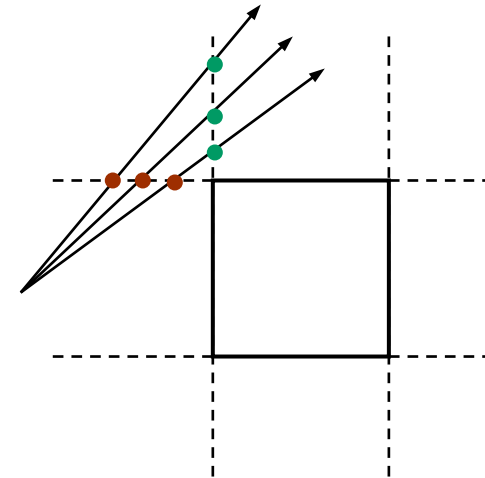


- Idee: teste Frustum gegen Splitting-Plane ("*inverse frustum culling*")
- Beispiel:
 - \mathbf{d}^i = Richtung der Strahlen
 - $\forall i : \mathbf{d}_x^i > 0$
 - Frustum schneidet Vater
 - Splitting-Plane sei $x=1$
 - Seien die y -Koord. aller Schnittpunkte aller Strahlen $<$ y -Koord. der Zelle (*)
 - Fallunterscheidung:
 - $\forall i : \mathbf{d}_y^i < 0 \rightarrow$ nur die rote Kind-Zelle
 - $\forall i : \mathbf{d}_y^i > 0 \rightarrow$ nur die blaue Kind-Zelle
- Bemerkung: hier genügen wirklich nur die 4 Eckstrahlen!





- Problem: gibt immer noch *"false positives"*
- Ziel: genauere Box-Frustum-Test, der für SIMD geeignet ist
- Erste Idee: erweitere Test Box-Strahl auf 4 Strahlen
 - Erinnerung: teste Strahl gegen Folge von Slabs
 - Pro Strahl erhält man ein *"t entry"* und ein *"t exit"*
- Problem: könnte zu *"false negatives"* führen!!
 - Beispiel: siehe 3 Folien früher
 - Hier *"false negative"* =
Test sagt "Frustum schneidet **nicht**",
aber in Wahrheit schneidet es **doch**!

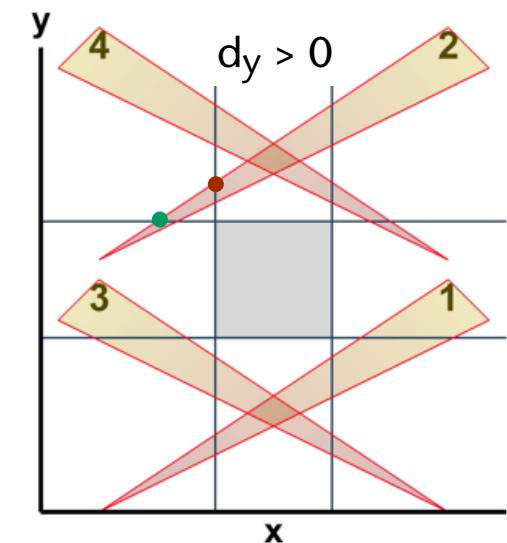
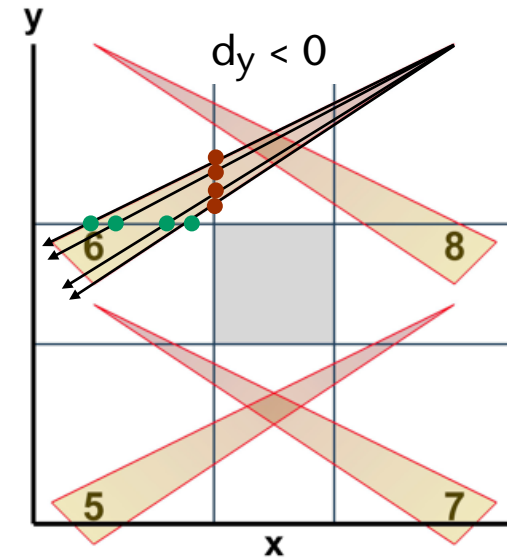




- Idee: projiziere Frustum auf xy-Ebene und teste dort
 - Man muß nicht die "Randstrahlen" im 2D identifizieren; führe Berechnungen einfach mit allen 4 (projizierten) Eckstrahlen durch (ist gleich teuer, da SIMD)
 - Seien y_i^{entry} die y-Koord. der "Enter"-Schnittpunkte der Strahlen (im 2D) mit den Ebenen der Begrenzungsseiten $y=\text{const}$ der AABB
 - Dito y_i^{exit}
 - Dito für $x \rightarrow x_i^{\text{entry}}, x_i^{\text{exit}}$
 - Es gibt 8 Fälle, 2 Tests genügen:

$$\min\{y_i^{\text{entry}}\} > \max\{x_i^{\text{exit}}\} \quad \vee \quad (1,3,6,8)$$

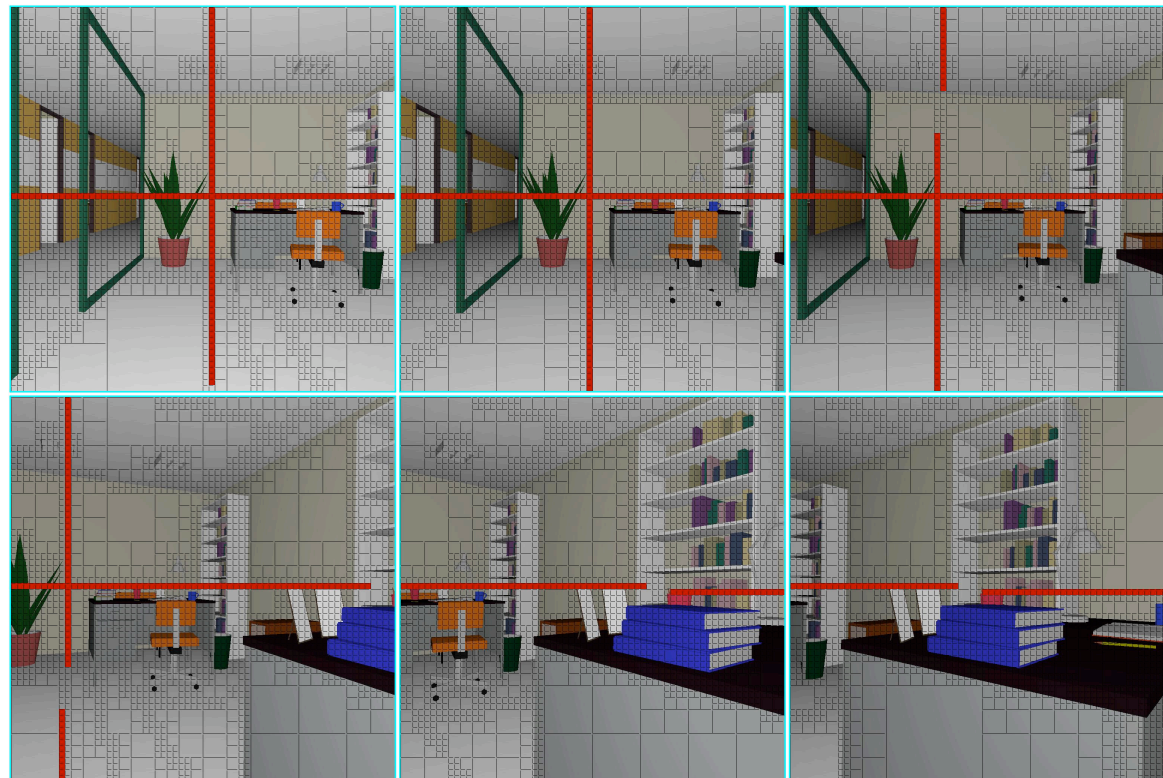
$$\min\{x_i^{\text{entry}}\} > \max\{y_i^{\text{exit}}\} \quad (2,4,5,7)$$





Adaptive Tile / Frustum Splitting

- Starte mit "großen" Strahlenbündeln (= Frusta) als "Primärstrahlen"
- Versuche, damit den kd-Tree zu traversieren
- Spalte Frustum auf, wenn die Bedingungen (*) für den Frustum-Zellen-Test nicht (mehr) gegeben sind

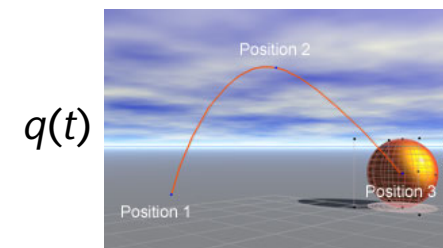
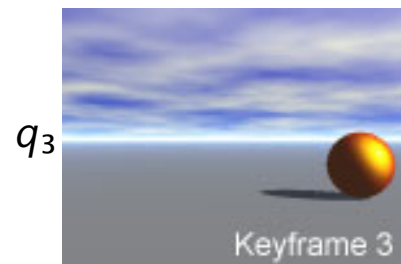
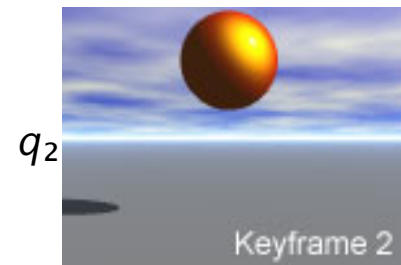
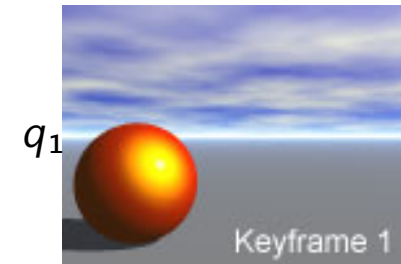


(Courtesy Reshetov et al.)



Keyframe Animationen

- Wie beschreibt man eine stetigen Pfad eines Objektes?
- Wie beschreibt man eine stetige Deformation?
- Prinzipielle Idee:
 - Spezifiziere die Position des Objektes zu verschiedenen Zeitpunkten → **Keyframes**
 - Das System interpoliert alle Frames dazwischen:
 - Interpolation der definierenden Parameter, z.B. Translation / Rotation, Gelenkwinkel, Vertex-Positionen
 - Interpolation mittels Splines





Dynamische Szenen

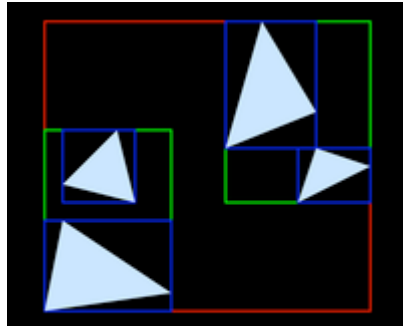
- Problem:
 - Alle Vertices bewegen sich (Animation / Simulation)
 - kd-Tree / Gitter / BVH wird ungültig (und viele andere DS ebenso)
- Naïve Idee:
 - In jedem Frame Beschleunigungsdatenstruktur neu aufbauen (nachdem neue Position der Vertices berechnet ist)
 - Kann man beim Gitter machen, aber zu teuer für alle anderen DSen



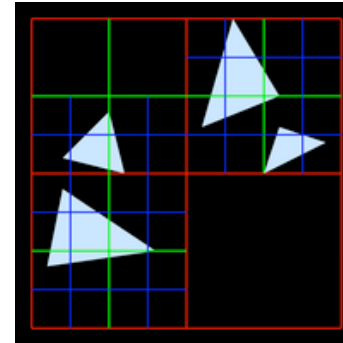


Was ist an Gittern so speziell?

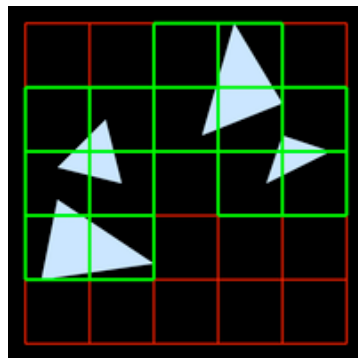
- Seit den 70-ern: viele *acceleration data structures*



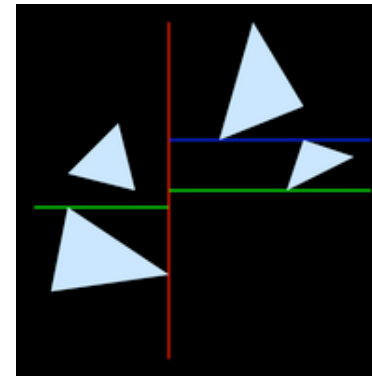
BVH



Octree



Grid

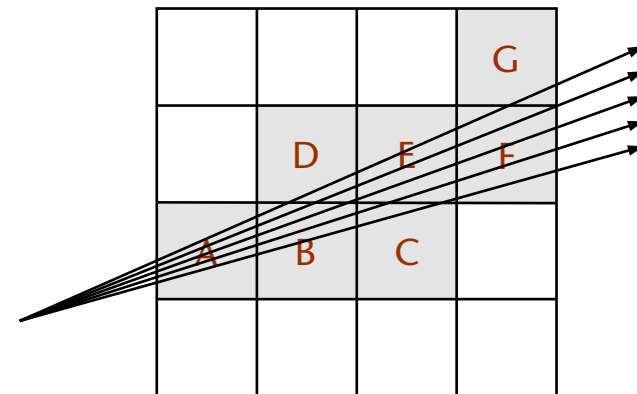


Kd-tree

- Von allen ist nur das Gitter nicht-hierarchisch!

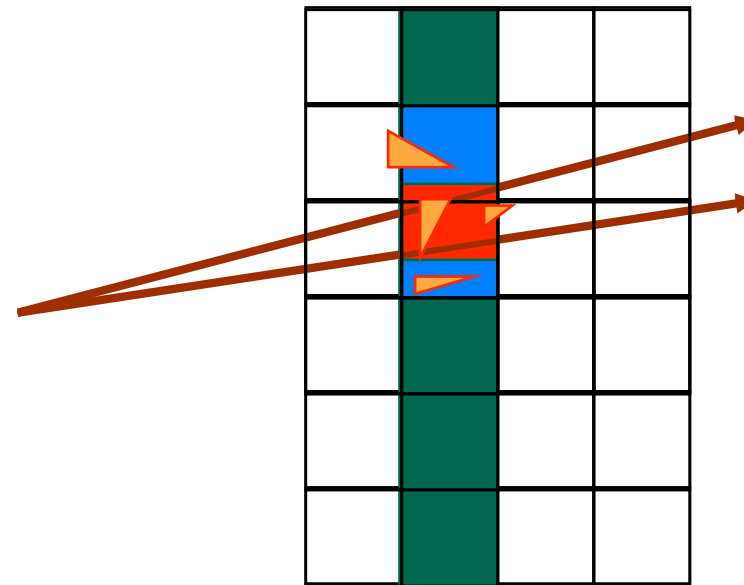


- Ziel: Strahlen-Pakete durchs Gitter beschleunigen (mit SIMD)
- Problem: Traversal ist inkompatibel mit Packet Tracing
 - In welcher Folge besucht man die Zellen? ABCD oder ABDC?
 - Inkrementelle Traversal-Algos (Midpoint, 3DDDA) sind nicht mehr SIMD-fähig, sobald Strahlen auseinanderlaufen
 - Entscheidungsvariable für verschiedene Rays im selben Paket verschieden!
 - Pakete aufteilen degeneriert schnell zum Einzelstrahl-Traversal
- Idee:
 - Pakete funktionieren **nicht** mit einem Gitter...
 - ... aber **Frusta** schon.



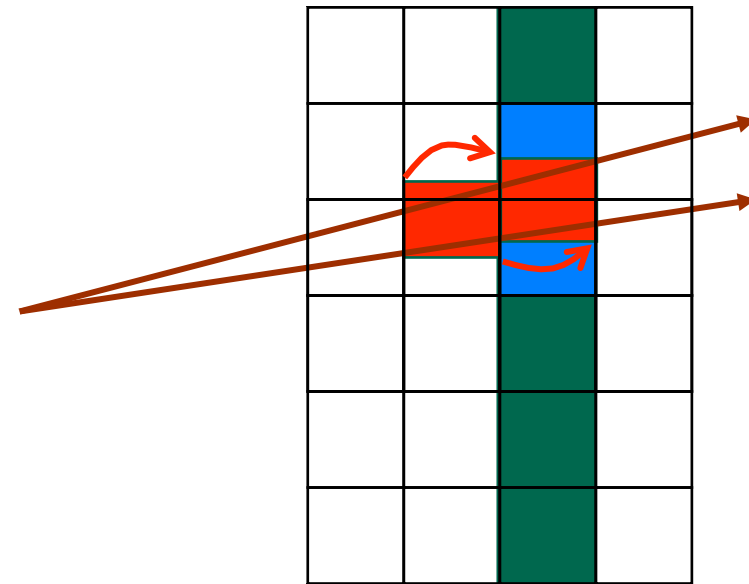


- Verwende uniformes Gitter
- Bestimme für ein Paket von Strahlen die obere/untere/linke/rechte bounding plane → "achsenparalleles" Frustum
- Traversiere mit Frustum durch das Gitter **schichtenweise**
 - Bestimme Overlap-Box zwischen Frustum und Gitter-Schicht
 - Runde auf ganzzahlige Indizes → überdeckte Zellen
 - Schneide alle Dreiecke in überdeckten Zellen





- Die Overlap-Box kann man inkrementell, von Schicht zu Schicht, aktualisieren
 - Trivial, da die Bounding Planes des Frustums bekannt sind und achsenparallel
 - Insgesamt pro Schritt 4 Additionen (= 1 SIMD-Op.)
 - Unabhängig von der Anzahl der Strahlen im Frustum
- Dazu noch SIMD-Frustum-Culling, um Dreiecke zu entfernen, die das Frustum nicht schneiden



Diplomarbeit ...



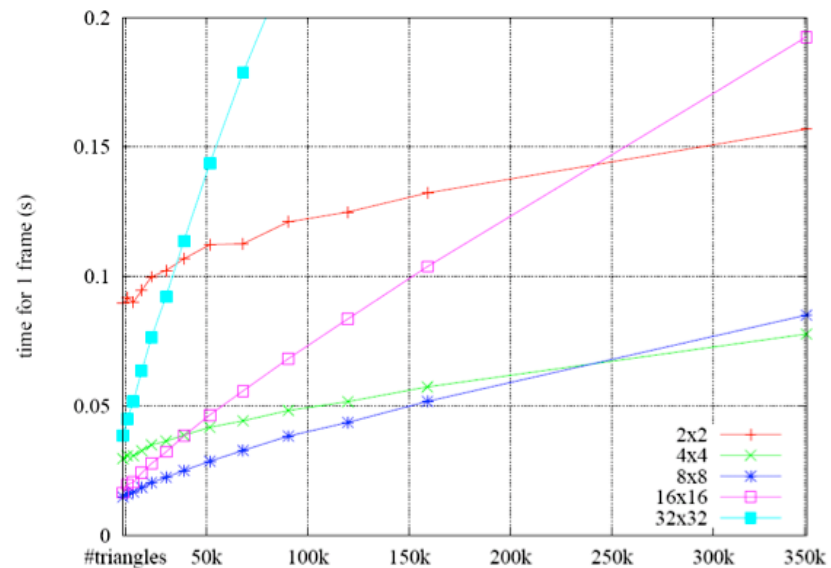
Bemerkungen

- Rel. teure Setup-Phase
 - Frustum berechnen, Setup des inkrementellen Algos
- Sehr billiger Update-Schritt von Schicht zu Schicht
- Sehr gut geeignet für dynamische Szenen:
 - Wiederaufbau = wenige Millisek für ~100.000 Dreiecke (1 Proc)
 - Einfach zu Parallelisieren: 10 MTris in ~150 ms (16 Opteron)
- Hierarchische Gitter: im Prinzip möglich
- Ähnlich wenige Schnittberechnung (Strahl-Obj) wie beim Kd-Tree
- Kleiner Nachteil: man muß Mailboxes verwenden
 - Gitter ohne FC & MB : 14 M ray-tri isecs
 - Gitter mit FC & MB : .9 M ray-tri isecs (14x less)
 - Kd-tree : .85M ray-tri isecs (5% kleiner als Gitter)
- Insgesamt: nur ~2x langsamer als BVH und Kd-Tree, aber dafür für dynamische Szenen!



Wahl der optimalen Paketgröße

- Kosten des Traversal-Schrittes ungefähr unabhängig von der Anzahl Strahlen →
 - Größere Pakete = mehr „Potential“ für Amortisation (+)
- Mehr Strahlen/Paket = größeres Frustum →
 - Mehr besuchte Zellen, mehr Dreiecke, die gegen alle Strahlen im Paket getestet werden müssen (-)
- "Sweet spot":
 - Am Besten ist 4x4 (grün) oder 8x8 (blau)

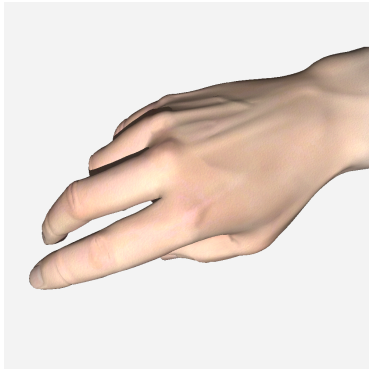




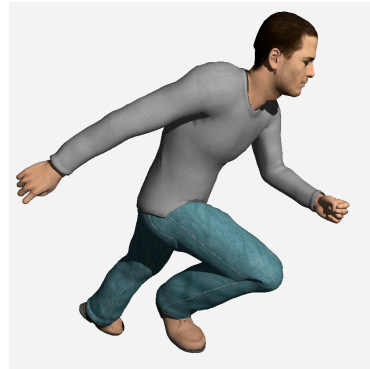
Resultate



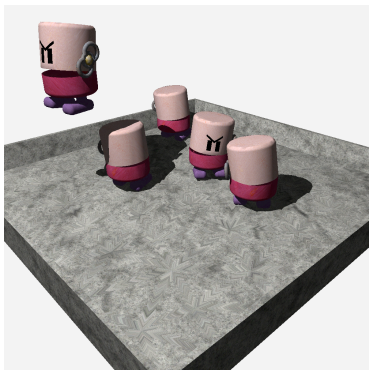
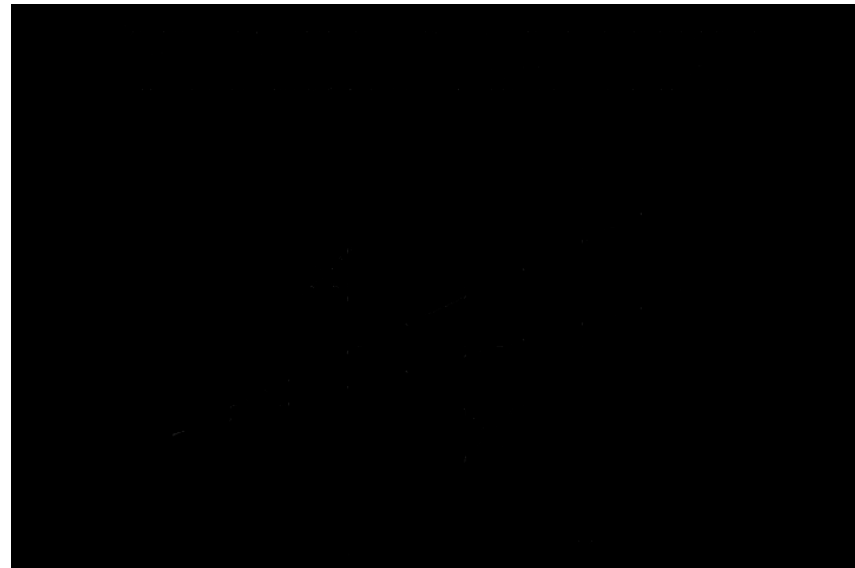
- Dual-Xeon 3.2GHz, 1024x1024, ohne Schattierung, reine Anim.



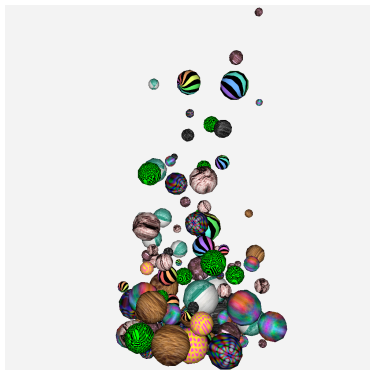
“Hand”
16K triangles
34.5/15.3 fps



“Runner”
78K triangles
15.8/7.8 fps



“Toys”
11K triangles
29.3/10.2 fps



“Marbles”
8.8K triangles
57.1/26.2 fps

X/Y fps:
X=raycast only
Y=raycast+shade+texture+shadows



■ Video (Fee)

- 174k tris, 1024x1024 Pixels, 16-core Opteron (180 GFLOPs)
 - CELL = 256 GFLOPs
 - ATI X1900 ~ 1000 GFLOPs
- 3.4 fps (raycast only)
- 1.2 fps (raycast + shade + texture + shadows)

