Parallelisierung

- Einfache (triviale) Parallelisierung:
  - "Grobkörnige" Parallelisierung = Verteilung auf mehrere CPU / Cores
  - → daher auch *"thread-level parallelism"* (TLP)
  - Implementierung:
    - mehrere Threads (≈ 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 = # Procs, k = 10 ... 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.

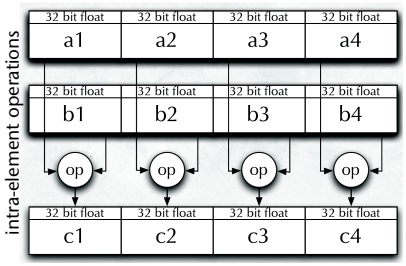
- Weitere Parallelisierungsart: *Instruction-Level Parallelism* (ILP)
- Beispiel:

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

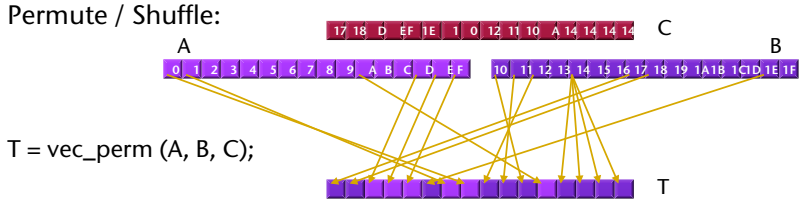
- Bemerkung:
  - das machen CPU & Compiler heutzutage von alleine
- Bringt für kd-Tree (z.B.) gar nichts:
  - Arbeit pro Knoten beim Traversal =
    - Float laden
    - Branch (für Splitting-Achse x, y, z)
    - Div. & Add.
    - Branch (welches Kind zuerst)
  - Branches machen ILP zunichte

- 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

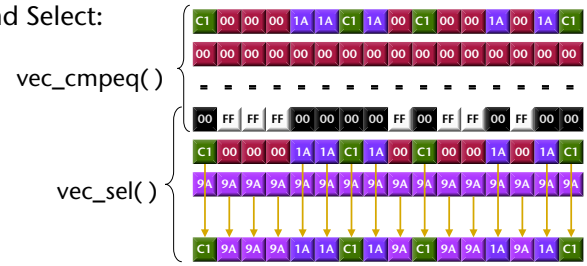
- Typischer SIMD-Befehlssatz (AltiVec, SSSE):
  - Alle Float/Int-Operationen (Add., Mult., Comp., Round., Load/Store, ...) komponentenweise auf ein Paar von Vektoren (*"intra-element op."*)
  - Inter-element-Operationen (permute, pack/unpack, merge, splat, ...)
  - "Horizontale" Operationen = "reduce"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



- Permute / Shuffle:

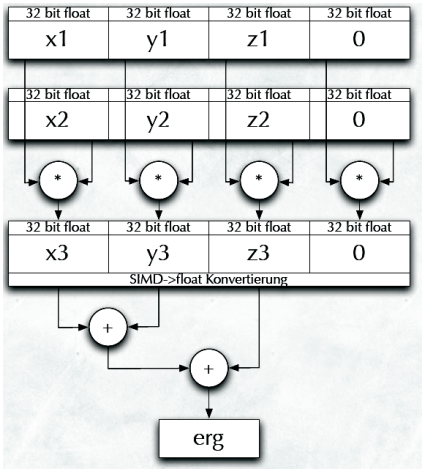


- Compare and Select:

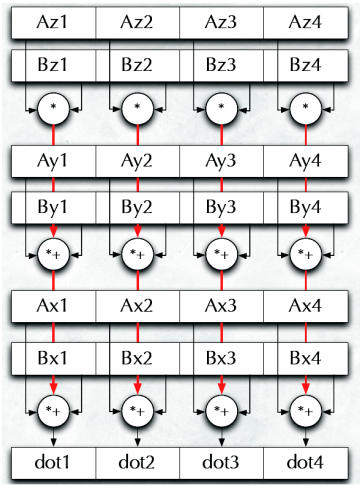


Beispiel 3D-Skalarprodukt

1 Skalarprodukt

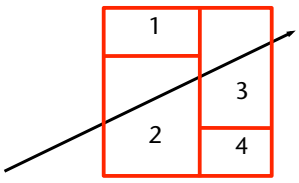


4 Skalarprodukte

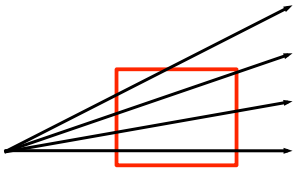


Anwendung auf kd-Tree-Traversal

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' = 1 / d
// alle Operationen, auch min/max, sind komponentenweise!
```

$t_{min} = -\infty$

$t_{max} = \infty$

```
loop a = x, y, z:
```

$$t_1 = (\bar{A}_a \ominus O_a) \odot d'_a$$

$$t_2 = (\bar{B}_a \ominus O_a) \odot d'_a$$

$$t_{min} = \max(\min(t_1, t_2), t_{min})$$

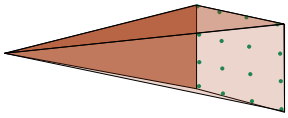
$$t_{max} = \min(\max(t_1, t_2), t_{max})$$

```
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

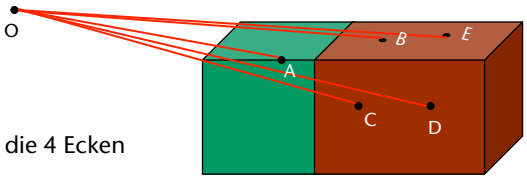
Frustum-Tracing im kd-Tree [2005]

- Ziel: mehr als nur 4 Strahlen auf einmal
- Verfolge also ganzes Strahlbündel durch kd-Baum
- Idee: repräsentiere Strahlenbündel als Frustum



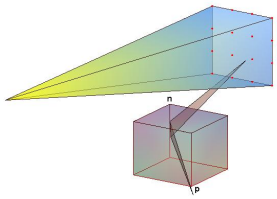
- Bisher: beim Traversieren wurde Entscheidung immer für 1 Strahl getroffen
  - Z.B.: "nur linker Teilbaum" / "nur rechter Teilbaum"
- Beim Packet / Frustum Tracing: treffe "Oder"-Entscheidung für alle Strahlen
  - Z.B.: falls 1 Strahl den linken Teilbaum trifft → trace das ganze Paket durch den linken Teilbaum ; dito für rechten Teilbaum

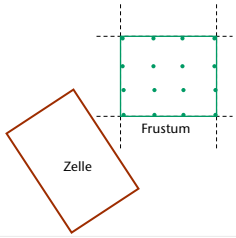
- Erste (problematische) Idee:, checke nur die Eckstrahlen
- Gegenbeispiel:



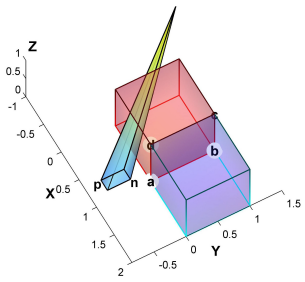
  - Strahlen B, C, D, E sind die 4 Ecken des Strahlbündels
  - Strahl A liegt in der Ebene von B und C
  - Alle 4 Eckstrahlen schneiden nur die rechte Zelle; aber Strahl A schneidet die linke!

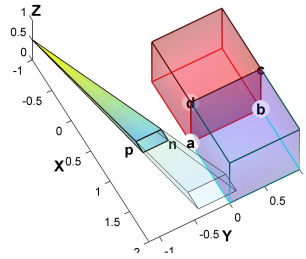
- Bessere Idee:
  - Verwende die Technik vom View-Frustum-Culling
  - Test: Box (= kd-Tree-Zelle) schneidet Frustum (= BV des Strahlbündels)?
  - Möglicher Algorithmus: wie beim View-Frustum-Culling [Möller]
- Probleme:
  - Frustum hier ist lang & schmal → viele "false positives"
  - Wir machen zu viel Arbeit:
    - Wir wissen schon, daß das Frustum die Vater-Zelle schneidet!



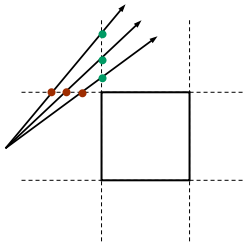


- Idee: teste Frustum gegen Splitting-Plane ("*inverse frustum culling*")
- Beispiel:
  - $\mathbf{d}^i$ = Richtung der Strahlen
  - $\forall i: \mathbf{d}_x^i > 0$
  - Frustum schneidet Vater
  - Splitting-Plane sei x=1
  - Seien die y-Koord. aller Schnittpunkte aller Strahlen < y-Koord. der Zelle (*)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





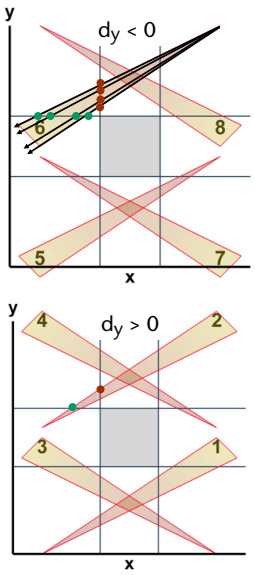
- Problem: gibt immer noch *"false positives"*
- Ziel: genauerer Box-Frustum-Test, der für SIMD geeignet ist
- Erste Idee: erweitere Test Box-Strahl auf 4 Strahlen
  - Erinnerung: teste Strahl gegen Folge von Slabs
    - Pro Strahl erhält man ein "*t entry*" und ein "*t exit*"
- Problem: könnte zu *"false 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"-Schnitt-punkte der Strahlen (im 2D) mit den Ebenen der Begrenzungsseiten y=const der AABB
  - Dito y_i^{exit}
  - Dito für x → x_i^{entry} , x_i^{exit}
  - Es gibt 8 Fälle, 2 Tests genügen:

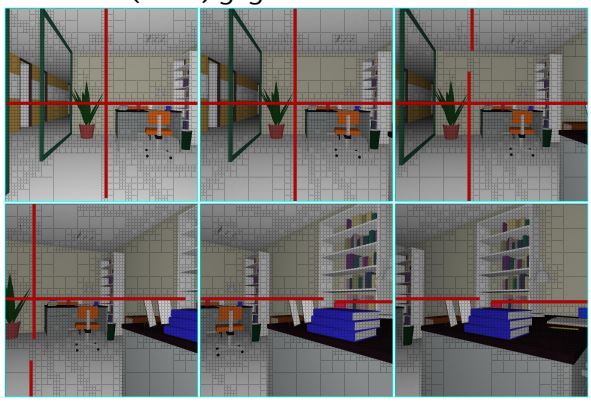
$$\min\{y_i^{\text{entry}}\} > \max\{x_i^{\text{exit}}\} \vee \quad (1,3,6,8)$$

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



Adaptive Tile / Frustum Splitting

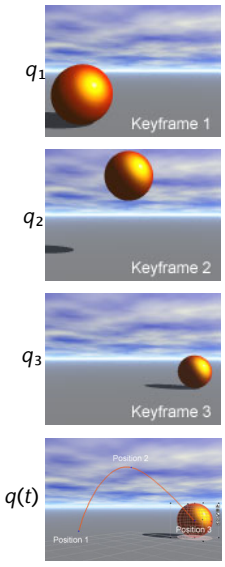
- Starte mit "großen" Strahlenbündeln (= Frusta) als "Primärstrahlen"
- Versuche, damit den kd-Tree zu traversieren
- Spalte Frustum auf, wenn die Bedingungen (*) für den Frustum-Zellen-Test nicht (mehr) gegeben sind



(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

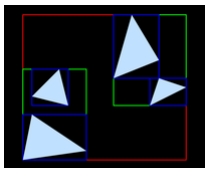


Dynamische Szenen

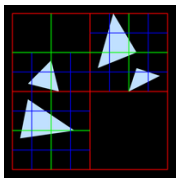
- Problem:
  - Alle Vertices bewegen sich (Animation / Simulation)
  - kd-Tree / Gitter / BVH wird ungültig (und viele andere DS ebenso)
- Naïve Idee:
  - In jedem Frame Beschleunigungsdatenstruktur neu aufbauen (nachdem neue Position der Vertices berechnet ist)
  - Kann man beim Gitter machen, aber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

Was ist an Gittern so speziell?

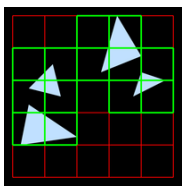
- Seit den 70-ern: viele *acceleration data structures*



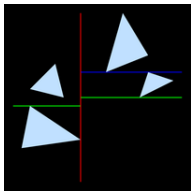
BVH



Octree



Grid

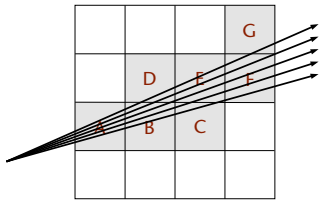


Kd-tree

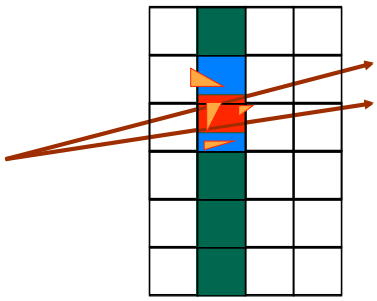
- Von allen ist nur das Gitter nicht-hierarchisch!

Coherent Grid Traversal [2006]

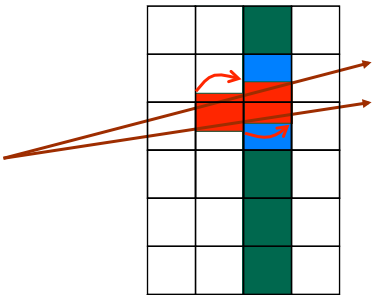
- Ziel: Strahlen-Pakete durchs Gitter beschleunigen (mit SIMD)
- Problem: Traversal ist inkompatibel mit Packet Tracing
  - In welcher Folge besucht man die Zellen? ABCD oder ABDC?
  - Inkrementelle Traversal-Algos (Midpoint, 3DDDA) sind nicht mehr SIMD-fähig, sobald Strahlen auseinanderlaufen
    -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



- Bestimme diejenige Koord.-Achse, zu der das geg. Strahlen-Paket "am senkrechtesten" ist; Ebenen senkrecht dazu heißen E_i
- Bestimme für das Strahlen-Paket die obere/untere/linke/rechte Frustum-Ebene
  - Die obere Frustum-Ebene soll so gewählt werden, daß ein Schnitt mit einer Ebene E_i eine horizontale Gerade ergibt
  - Analog für die anderen Frustum-Eb
- Traversiere mit dem Frustum 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 Opterons)
- Hierarchische Gitter: im Prinzip möglich
- Ähnlich wenige Schnittberechnung (Strahl-Obj) wie beim kd-Tree
- Kleiner Nachteil: man *muß* Mailboxes (MB) verwenden
  - Gitter ohne FC & MB : 14 M ray-tri intersections
  - Gitter mit FC & MB : .9 M ray-tri intersections (14x less)
  - Kd-tree : .85M ray-tri intersections (5% kleiner als Gitter)
- Insgesamt: nur ~2x langsamer als BVH und kd-Tree, aber dafür für dynamische Szenen!

Zur Wahl der optimalen Paketgröße

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