

Bauhaus-Universität Weimar  
Fakultät Medien  
Studiengang Mediensysteme

**Erstellung, Segmentierung und Out-Of-Core Speichermanagement  
von Sparse Voxel Octrees**



**Diplomarbeit**

Felix Weißig  
Matrikelnummer: ——  
geb. am 10.10.1979 in Hoyerswerda

1. Gutachter: Prof. Dr. Charles A. Wüthrich

Datum der Abgabe: 25. März 2013



## **Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig angefertigt, anderweitig nicht für Prüfungszwecke vorgelegt und alle verwendeten Quellen angegeben habe.

Felix Weißig

Weimar, den 25. März 2013



# **Danksagung**

Danke lieber Henning



## **Kurzfassung**

Voxel+Ray=Pixel



# Inhaltsverzeichnis

Erklärung . . . . .	III
Danksagung . . . . .	V
Kurzfassung . . . . .	VII
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Zielstellung . . . . .	3
<b>2 Repräsentation und Verwendung von Volumendaten in der Computergrafik</b>	<b>5</b>
2.1 Volumendaten . . . . .	5
2.1.1 Octrees . . . . .	6
2.1.2 Verwandte Arbeiten . . . . .	7
2.1.3 Sparse Octrees . . . . .	7
2.1.4 Verwandte Arbeiten . . . . .	8
2.2 Raycasting von Volumendaten . . . . .	8
2.2.1 Verwandte Arbeiten . . . . .	8
2.3 Out-of-Core Datenmanagement . . . . .	8
2.3.1 Verwandte Arbeiten . . . . .	9
<b>3 Systemkonzeption</b>	<b>11</b>
3.1 Überblick . . . . .	11
3.2 Datenstruktur . . . . .	11
3.3 Aufbau . . . . .	11
3.4 Out-of-Core Management . . . . .	12
3.5 Real Time Rendering von SVO . . . . .	12
<b>4 Implementierungsdetails und Umsetzung</b>	<b>13</b>
4.1 Überblick . . . . .	13
4.1.1 Verwendete Infrastruktur . . . . .	13
4.2 Aufbau der SVO Datenstruktur . . . . .	14
4.2.1 Definition der Knotenstruktur . . . . .	14
4.2.2 Segmentierung . . . . .	14
4.3 Attribute . . . . .	16
4.3.1 Generalisiertes System zur SVO-Erstellung . . . . .	17

4.3.2	Erzeugung der Treelet Struktur . . . . .	17
4.3.3	Treelet Aufbau . . . . .	19
4.3.4	Attribut Generierung . . . . .	20
4.4	Echtzeitfähiges SVO-Ray Casting . . . . .	24
4.4.1	Prinzipieller Aufbau . . . . .	24
4.4.2	Überblick der Verarbeitungsschritte . . . . .	24
4.4.3	Analyse Pass . . . . .	25
4.4.4	Vorsortierung . . . . .	26
4.4.5	Clientseitige Aktualisierung . . . . .	26
4.4.6	Einfügen eines Treelets . . . . .	26
4.4.7	Entfernen eines Treelets . . . . .	27
4.5	Serverseitige Aktualisierung . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>31</b>
5.1	Überblick . . . . .	31
5.2	Verwendete Testszenen . . . . .	31
5.3	Laufzeitanalyse . . . . .	32
5.4	Einschränkungen und Verbesserungen . . . . .	32
5.4.1	Serverseitige Aktualisierung . . . . .	32
5.4.2	Verwendung von OpenGL Texturen als Buffer . . . . .	32
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>35</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	35
6.2	Ausblick . . . . .	35

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Mesh und Sparse Voxel Octree . . . . .	2
1.2	Detail: Mesh und Sparse Voxel Octree . . . . .	2
2.1	Schnitt durch ein Volumen Gitter . . . . .	5
2.2	Schnitt durch einen Octree . . . . .	6
2.3	Schnitt durch einen Sparse Voxel Octree . . . . .	7
2.4	Bestimmung der Reihenfolge der Kindknoten beim Schnitt . . . . .	8
2.5	Out-Of-Core-Prinzip . . . . .	9
3.1	Schematischer Aufbau des Out-Of-Core-Systems . . . . .	11
4.1	Indizierung der Kind-Voxel . . . . .	14
4.2	Aufbau eines Knotens . . . . .	15
4.3	Beschreibung der SVO-Struktur . . . . .	15
4.4	Treelet-Struktur mit 6 Knoten pro Treelet . . . . .	15
4.5	Verbindung der Treelets durch ihren Index . . . . .	16
4.6	Attribut-Buffer mit verschachtelten Farb- und Richtungswerten . . . . .	17
4.7	Klassendiagramm des generallisierten Erstellungssystems . . . . .	18
4.8	Schrittweiser Aufbau der SVO-Struktur aus Treelets . . . . .	19
4.9	Ermittlung von UV-Koordinaten . . . . .	21
4.10	Reihenfolge der Erzeugung der Attributen innerer Knoten . . . . .	22
4.11	Schematischer Aufbau des Out-Of-Core-Systems . . . . .	24
4.12	Zusammenfassen von Slot-Bereichen zur Übertragung . . . . .	29
5.1	Verfeinerung in 5 aufeinander folgenden Schritten . . . . .	31
5.2	Systemzeiten und Arbeit für Model lucy mit 4 kb Treelets . . . . .	33
5.3	Gegenüberstellung unterschiedleichen Treelet-Größen . . . . .	33
5.4	öfmÖAFJaÖFOJ . . . . .	34



# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Motivation

Seit ihrer Vorstellung in den 70er Jahren ist die Bildsynthese durch Rasterisierung von parametrisierten Dreiecken der Quasi-Standard für Echtzeitcomputergrafik. Diese Entwicklung wurde nicht zuletzt durch die Einführung von dezidierter Hardware und offenen Standards, wie OpenGL möglich. Der Vorteil von Dreiecken als Geometrieprimitiv ist, dass sich mit ihnen sehr effizient planare Flächen darstellen lassen. Dabei hat die Größe der abgebildeten Flächen keinen Einfluss auf den Speicherbedarf der Repräsentation. In modernen Anwendungen, wie Spielen oder bei der Darstellung von hochauflösenden 3D-Scans ist dieser Vorteil jedoch immer weniger relevant, da der überwiegende Teil des benötigten Speichers durch Texturen belegt wird. Diese werden benötigt, um die Flächen mit Details zu versehen, wie Farbe, Richtung und andere zur Beleuchtung benötigten Attributen. Dabei ist die Parametrisierung von komplex geformten Dreiecksnetzen mit Texturkoordinaten nicht trivial und muss meist händisch bewerkstelligt werden.

Bei der Rasterisierung von detaillierten Dreiecksnetzen mit hochauflösten Texturen kommt es zu Aliasing-artefakten. Um diese zu reduzieren, werden von Dreiecksnetz und Texturen niedriger aufgelöste, statische Versionen erzeugt (*Level-of-Detail, LOD*). Zwischen diesen wird bei der Darstellung je nach Beobachtungsabstand gewechselt, was zu störenden *Popping*-Artifakten führt wenn eine LOD-Stufe durch eine andere ausgetauscht wird. Mit dieser Technik kann nur im seltensten Fall, ein ideales Verhältnis zwischen Geometrie- und gegebener Bildauflösung, gewährleistet werden. Dynamische Erzeugung von LOD-Stufen ist mit hohen Rechen- oder Speicheraufwand verbunden. Außerdem muss das LOD-Problem für Geometrie und Texturdaten während der Erstellung und der Darstellung, separat gelöst werden. Ein Nachteil des Rasterisierungsansatzes ist das Fehlen von globalen Informationen während der Fragmentgenerierung. Jedes Primitiv wird für sich behandelt ohne das globale Informationen zur Optimierung (*Culling*) oder Beleuchtung (*Global Illumination*) zur Verfügung stehen.

Die Generalisierung der Renderpipelines und die Einführung von GPGPU-Hochsprachen wie OpenCL machen es möglich die Frage nach geeignetem Geometrieprimitiv und Bildsyntheseverfahren neu zu stellen. Sparse Voxel Octree als Datenstruktur in Kombination mit *Raycasting* als Algorithmus zur Bildsynthese bieten viele positive Eigenschaften. So vereinen Sparse Voxel Octrees Geometrie und Texturdaten in einer einzigen hierarchischen Datenstruktur. Durch Raycasting auf dieser Struktur kann das

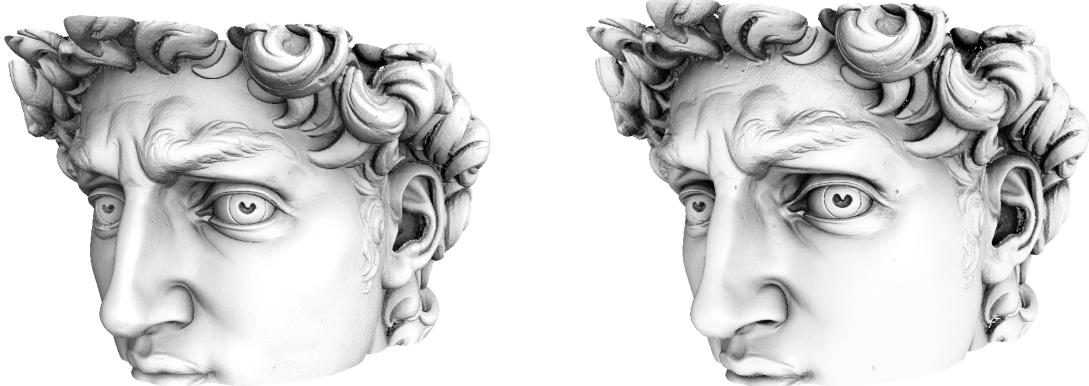


Abbildung 1.1: Mesh und Sparse Voxel Octree

LOD-Problem von Geometrie und Textur gemeinsam pro Bildpunkt gelöst werden. Gleichzeitig wirkt der Octree als Beschleunigungsstruktur, so dass während des Traversierens nur die Teile der Struktur durchlaufen werden, die zur Bildsynthese beitragen. Eine Parametrisierung ist nicht notwendig, da jedes Voxel seine eigenen Attributinformationen speichert, die für seine Größe in optimaler Auflösung vorliegen.

Dennoch gibt es einige Herausforderungen die vor der Verwendung von Sparse Voxels bewältigt

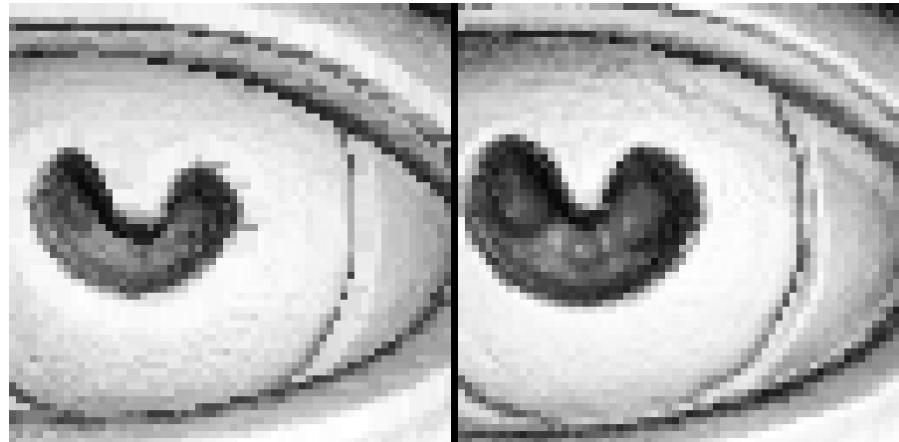


Abbildung 1.2: Detail: Mesh und Sparse Voxel Octree

werden müssen. Sparse Voxel Octrees benötigen viel Speicher. Die Menge an Arbeitsspeicher aktueller Grafikkarten genügt, um eine SVO-Struktur in relativ hohen Auflösung zu speichern, die für einige Anwendungen genügt. Benötigt man jedoch höhere Auflösung um möglichst viele Details bzw. sehr große Strukturen abbilden zu können, fallen leicht mehrere Gigabyte an Daten an, die nicht mehr als Ganzes in den GPU-Speicher passen.

Da Sparse Voxel Octrees erst in jüngster Zeit in den Fokus von Wissenschaft und Industrie gerückt sind, sind sie in Programmen zur Erstellung von 3D-Inhalten noch nicht angekommen. Daher ist es zunächst notwendig Sparse-Voxel-Octrees-Strukturen aus anderen Geometrirepräsentationen zu erstellen. Dreicksnetze, Punktwolken, Höhenfelder oder Volumen können als Eingabedaten dienen. Um unterschiedliche Repräsentationen von Inhalten, ohne großen Entwicklungsaufwand, unterstützen zu können fehlt ein

generisches System das diese Daten verarbeiten kann.

!!! SCRENSHOT david face dreicke gegen voxel

## 1.2 Zielstellung

In der vorliegenden Arbeit ...

**Zeilstellung 2:** Entwicklung eines Out-Of-Core Ansatzes basierend auf Segmentierung der SVO Daten und adaptives refinement

**Zeilstellung 1:** Entwicklung eines Templates zur Generierung von SVO aus unterschiedlichen Datenvorlagen (Dreiecke, Pointclouds, Heightmaps, volumen).

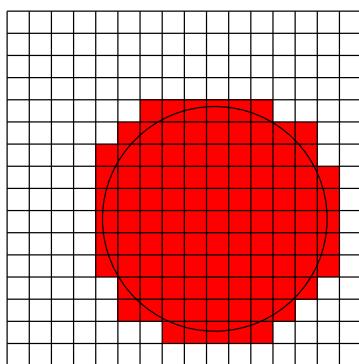


## Kapitel 2

# Repräsentation und Verwendung von Volumendaten in der Computergrafik

### 2.1 Volumendaten

Volumendaten können durch dreidimensionale, äquidistante Gitter beschrieben werden. Die Kreuzungspunkte der Gitter werden Voxel (Volumen-Pixel) genannt. Jeder Voxel kann einen einzelnen skalaren Wert, wie beispielsweise Dichte oder Druck, oder mehrere skalare Werte wie Farben und Richtungsinformationen enthalten. Dadurch eignet sich diese Darstellung zur Repräsentation eines äquidistant gesampelten Raumes, der nicht homogen gefüllt ist. Durch die uniforme Unterteilung des Raumes ist die Position und die Ausdehnung eines jeden Voxels implizit in der Datenstruktur enthalten und muss daher nicht gespeichert werden. Volumendaten werden vorwiegend in der Medizin, beispielsweise als Ausgabe der



256 Voxel

Abbildung 2.1: Schnitt durch ein Volumen Gitter

Magnetresonanztomographie oder in der Geologie zum Abbilden der Ergebnisse von Reflexionsseismik-

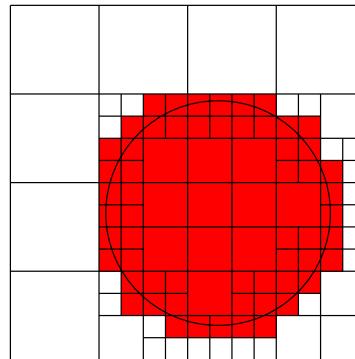
verfahren verwendet.

Um eine hinreichende Auflösung der Volumenrepräsentation zu gewährleisten sind große Datenmengen erforderlich. Ein mit  $512^3$  Voxeln aufgelöstes Volumen, dessen Voxel jeweils einen mit 4 Byte abgebildeten Skalar enthalten, belegt bereits 512 Megabyte. Verdoppelt man die Auflösung auf  $1024^3$  verachtigt sich der Speicherbedarf auf 4 Gigabyte. Volumendaten enthalten in der Regel einen großen Anteil an homogenen Bereichen die durch ein reguläres Gitter als viele Einzelwerte abgebildet werden müssen. Daher gibt es Datenstrukturen die ausgehend von dem regulären Gitter eine hierarchische Struktur erzeugen, um diese Bereiche zusammenzufassen.

### 2.1.1 Octrees

Ein Octree ist eine raumteilende, rekursive Datenstruktur. Ein initiales, kubisches Volumen wird in acht gleich große Untervolumen geteilt. Die Teilung wird für jedes Untervolumen fortgeführt, bis eine maximale Tiefe beziehungsweise ein maximaler Unterteilungsgrad erreicht ist. Mit jeder Tiefenstufe des Octrees verdoppelt sich die Auflösung der abbildbaren Information auf jeder Achse. Die Größe eines Voxels kann mit  $2^{-d}$  bestimmt werden wobei  $d$  die Tiefe des Voxels in der Baumstruktur, beginnend mit  $d = 0$  für die Wurzel, ist. Für vollbesetzte Octrees ist eine Darstellung im Speicher implizit vorgegeben. Da jeder Elternknoten genau acht Kinder besitzt, kann innerhalb einer seriellen Struktur implizit auf seine Kindknoten geschlossen werden. Die Positionen der Kinder eines Knotens kann durch die Funktion  $C(P, n) = 8 * P + n$  berechnet werden wobei  $P$  der Index des Elternknotens,  $n$  die Nummer des Kindes (beginnend mit 1) und das resultierende  $C$  der Index des Kindknotens ist.

Bereiche in Volumendaten die homogene Daten enthalten oder leer sind, können jedoch von der Unterteilung ausgeschlossen werden, wodurch eine wesentlich kompaktere Darstellung der Daten gegenüber konventionellen Volumendaten erreicht werden kann. Dafür muss für jedes Voxel ein Verweis auf die ihn unterteilenden Untervolumen existieren. In der Regel besitzt jedes Voxel eines solchen Octrees acht Kinder (*innerer Knoten*) oder kein Kind (*Blatt-Knoten*). Die, im ungünstigsten Fall zu speichernden sieben leeren Knoten, sind bei dieser Darstellung nötig, um homogene Bereiche innerhalb des Eltern-Voxels zu kodieren. Jeder Voxel kann ein oder mehrere Skalare speichern. Oft werden diese Werte



132 Voxel

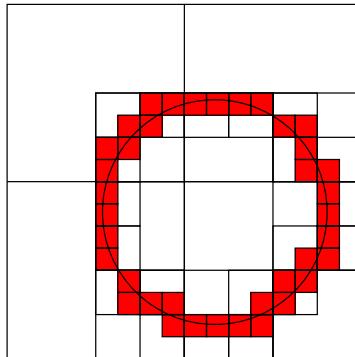
Abbildung 2.2: Schnitt durch einen Octree

nicht direkt im Octree abgelegt um bei der Traversierung der Struktur möglichst wenig Speicher lesen zu müssen. Stattdessen werden die Attributinformation in einem zusätzlichen Attribut-Buffer abgelegt, in dem zu jeder Voxel-Position im Octree ein Tuple mit Attributinformation an der selben Stelle im Attribut-Buffer vorgehalten wird. Die Attribute eines übergeordneten Voxels ergeben sich im einfachsten Fall aus dem Mittel der Attribute seiner untergeordneten Voxel, vergleichbar mit der Erzeugung von *Mipmaps*. Somit enthält jedes Voxel eine seiner Größe entsprechend aufgelöste Attributinformation. Diese approximiert die Ausprägungen der Attribute in seinem Bereich. Der Octree ist also beides: Geometrie und Textur. Der wesentliche Vorteil der Octree-Struktur gegenüber texturierten Dreiecksnetzen ist, dass sich mit ihr das LOD-Problem für Attribute (Texturen) und Geometrie gemeinsam lösen lässt. Dies kann während der Bildsynthese durch die Wahl der Traversierungstiefe im Baum pro Bildpunkt geschehen.

### 2.1.2 Verwandte Arbeiten

### 2.1.3 Sparse Octrees

Für einige Anwendungen sind nur bestimmte Ausprägungen der in den Voxeln gespeicherten Werte von Interesse. Beispielsweise werden beim Iso-Surface-Rendering nur Voxel mit einem bestimmten Dichte-werte als opake Oberfläche dargestellt. Werden nur diese Werte benötigt, kann die Datenstruktur weiter ausgedünnt werden, in dem nur noch Voxel gespeichert werden die zur Oberfläche beitragen. Eine solche



70 Voxel

Abbildung 2.3: Schnitt durch einen Sparse Voxel Octree

Volumenrepräsentation eignet sich ebenso zur Darstellung anderer opaker Oberflächen wie diskretisierte Dreiecksnetze, Punktwolken oder Höhenfelder und wird als *Sparse Octree* oder *Sparse Voxel Octree* bezeichnet. Dazu ist es erforderlich, dass innere Knoten weniger als acht Kinder haben können. Durch die variierende Anzahl von Kindknoten existiert keine implizite Regel zum Berechnen deren Positionen im Speicher. Vielmehr muss jeder Knoten speichern welche Kindknoten vorhanden sind und wo sich diese im Speicher befinden. Liegen die Kindknoten jedes Voxels jeweils hintereinander im Speicher, muss jedoch nur ein Verweis pro Elternknoten vorgehalten werden. Da in einem Sparse Voxel Octree nur Oberflächen gespeichert werden, steigt der Speicherbedarf pro weiterer Tiefenstufe nur durchschnittlich um das vierfache, wie (vgl. ESVORG) zeigen konnte.

### 2.1.4 Verwandte Arbeiten

## 2.2 Raycasting von Volumendaten

Bei Raycasting wird für jeden Punkt eines Ziel-Buffers ein Strahl erzeugt und mit den Volumendaten geschnitten. Volumengitter können dazu beispielsweise in festen Abständen durchschritten werden um Dichtewerte zu ermitteln und über eine Transferfunktion abzubilden (!!! ABBILDUNG FRONT-TO-BACK-VOLUME-RAYCASTING). Dabei müssen auch Bereiche des Volumens verarbeitet werden die leer sind und nicht zum Bildinhalt beitragen.

In der Octree-Darstellung können große homogen gefüllte Bereiche übersprungen werden. Dies wird erreicht indem der Strahl mit dem Voxeln geschnitten wird der diesen Bereich umgibt um so ein Eintritts- sowie ein Austrittspunkt zu ermitteln. Der hierarchische und regulären Aufbau des Octrees ermöglicht es die dazu notwendigen Schnittberechnung zu minimieren und effizient durchzuführen. Durch eine Tiefensuche im Baum kann in jeder Tiefe das Voxel ermittelt werden, das den Strahl zuerst scheidet. Da die Voxel ihre Position und Größe nur implizit über ihrer Lage im Baum speichern müsse diese beim Traversieren für jeden Voxel erzeugt werden.

Der Strahl kann durch  $p_t(t) = p + td$  beschrieben werden. Löst man die Gleichung nach  $t$  für eine achsenparallele Ebene erhält man  $t_x(x) = (\frac{1}{d_x})x + (\frac{-p_x}{d_x})$ .

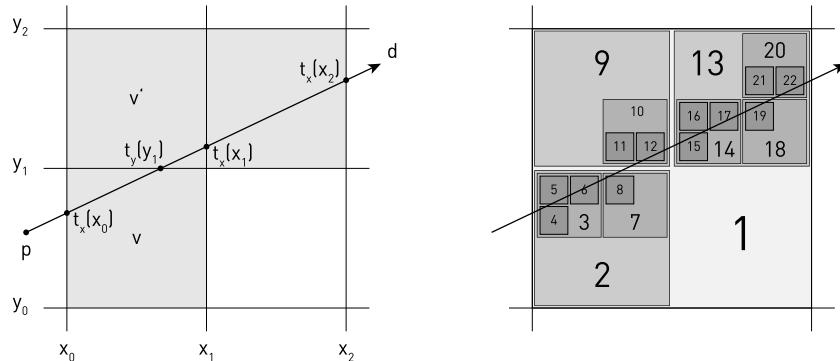


Abbildung 2.4: Bestimmung der Reihenfolge der Kindknoten beim Schnitt

### 2.2.1 Verwandte Arbeiten

## 2.3 Out-of-Core Datenmanagement

Out-of-Core-Strategien ermöglichen einer Anwendung oder einem System die Verwendung von Datensätzen, welche die lokale Speicherkapazität übersteigen. Voraussetzung dafür ist die Segmentierbarkeit der Daten. Außerdem muss die lokal gespeicherte Untermenge der segmentierten Daten zu jedem Zeitpunkt zur Verarbeitung genügen.

Die endliche Menge lokalen Speichers der GPU begrenzt die maximale Auflösungen der SVO-Struktur. Eine Vergrößerung des Speichers löst das Problem nicht da wie oben beschrieben eine weitere SVO-Tiefe etwa die vierfache Speichermenge benötigt.

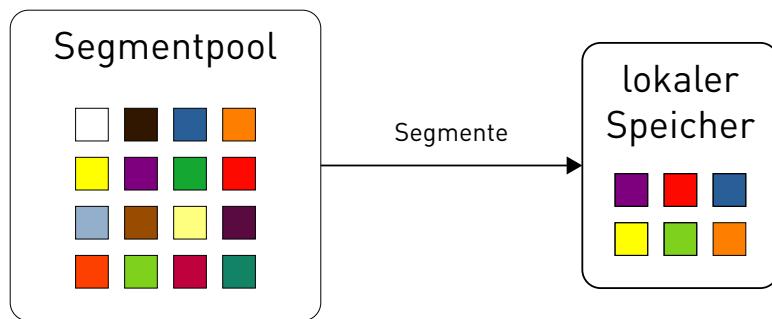


Abbildung 2.5: Out-Of-Core-Prinzip

(!!! streaming system notwendig)  
(beispiele für ooc Systeme)

### 2.3.1 Verwandte Arbeiten

### *2.3. OUT-OF-CORE DATENMANAGEMENT*

---

## Kapitel 3

# Systemkonzeption

### 3.1 Überblick

- Fehler bei der Darstellung -> Fehlerwert ausnutzen
- Visueller/Progressiver Ansatz (outputsensitiv)

### 3.2 Datenstruktur

### 3.3 Aufbau

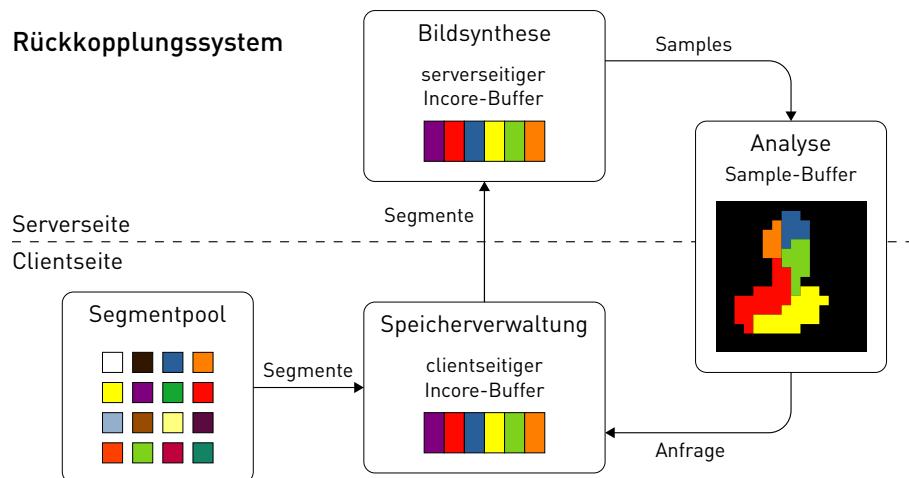


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau des Out-Of-Core-Systems

### **3.4 Out-of-Core Management**

### **3.5 Real Time Rendering von SVO**

## Kapitel 4

# Implementierungsdetails und Umsetzung

### 4.1 Überblick

#### 4.1.1 Verwendete Infrastruktur

## 4.2 Aufbau der SVO Datenstruktur

### 4.2.1 Definition der Knotenstruktur

Die Octree-Struktur in dieser Arbeit ist so aufgebaut, das jeder Knoten im Baum einen Voxel repräsentiert. Jeder Voxel steht für einen achsenparalleler Würfel der die Oberfläche der abzubildenden Geometrie schneidet. Jeder Voxel kann in bis zu acht weitere Voxel unterteilt werden. Die Indizierung der Kind-Voxel ergibt sich aus ihrer Position innerhalb des Eltern-Voxels. Diese kann durch die Vorschrift  $i(x, y, z) = 4p(x) + 2p(y) + p(z)$  bestimmt werden, wobei  $p(x)$ ,  $p(y)$  und  $p(z)$  für die Ergebnisse der Aussagen  $x > 0$ ,  $y > 0$  und  $z > 0$  stehen. Abbildung 4.1 zeigt ein vollständig unterteilten Voxel und die Indizierung seiner Kind-Voxel.

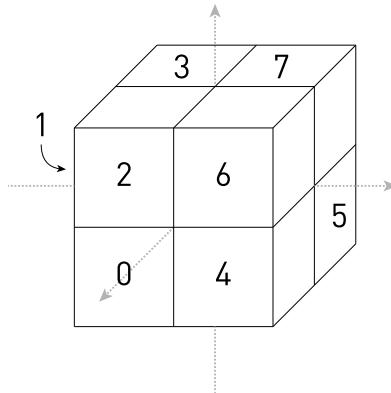


Abbildung 4.1: Indizierung der Kind-Voxel

Die Topologie des Octrees wird durch 64 Bit große Knoten beschrieben. Der Speicherbedarf teilt sich in 32 Bit für den Verweis auf das erste Kind (**First-Child-Index**) und zwei Bitmasken, die jeweils 8 Bit beanspruchen. Eine Bitmaske kodiert in jedem Bit das jeweilige Vorhandensein eines Kindes (**Valid-Mask**). Die zweite Bitmaske kodiert in jedem Bit ob das jeweilige Kind ein Blatt ist oder nicht (**Leaf-Mask**). Abbildung 4.3 veranschaulicht den Aufbau der Baumstruktur durch diese Knotenrepräsentation. 16 Bit pro Knoten bleiben für die Anwendung in dieser Arbeit frei, können aber auf verschiedene Weise genutzt werden. Beispielsweise ist es möglich diesen Platz zum Speichern von Attributen oder Verweisen zu Konturinformationen zu nutzen, wie es in (ESVOR) getan wird. Der freie Platz ist mit den Anforderungen an minimale Speichergrößen und Segmentierung der OpenCL zu erklären, die keine 24 oder 48 Bit Datentypen definiert. Lösungsvorschläge für eine kompaktere Notation werden in ( !!! verweis auf Verbesserungen) diskutiert.

### 4.2.2 Segmentierung

Die Unterteilung der SVO-Struktur erfolgt in Unterästen die in dieser Arbeit als *Treelets* (Bäumchen) bezeichnet werden. Jedes Treelet umfasst die selbe Anzahl an Knoten und stellt für sich gesehen einen Sparse Voxel Octree, mit Wurzel- und Blattknoten dar (vgl. Abbildung 4.4). Zum Identifizieren eines Treelets erhält jedes einen eindeutigen Index (*Treelet-Index*). Über diesen wird die Verknüpfung der Treelets untereinander realisiert. Dazu speichert jedes Treelet den Index seines übergeordneten Treelets und

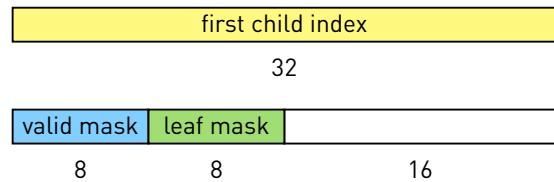


Abbildung 4.2: Aufbau eines Knotens

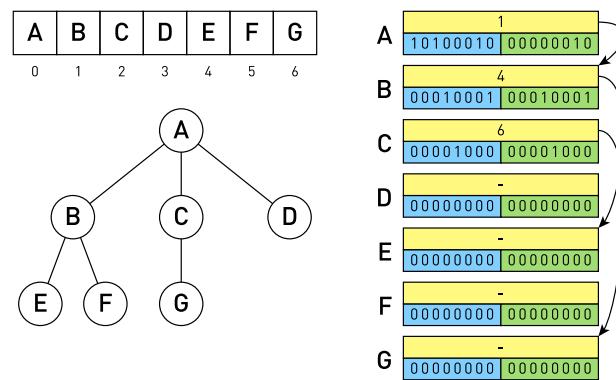


Abbildung 4.3: Beschreibung der SVO-Struktur

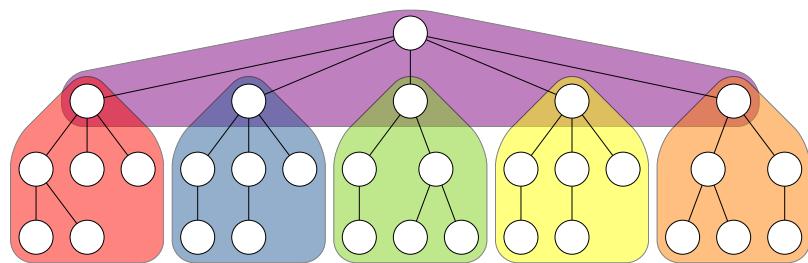


Abbildung 4.4: Treelet-Struktur mit 6 Knoten pro Treelet

#### 4.3. ATTRIBUTE

---

die Position des jeweiligen Blattknotens. Die im Baum abwärts gerichtete Verknüpfung wird durch Speichern der Indices der untergeordneten Treelets im First-Child-Index des jeweiligen Blattknotes realisiert. Die Verbindung der Treelets untereinander bildet einen bidirektionalen Baum über dem eigentlichen Oc-

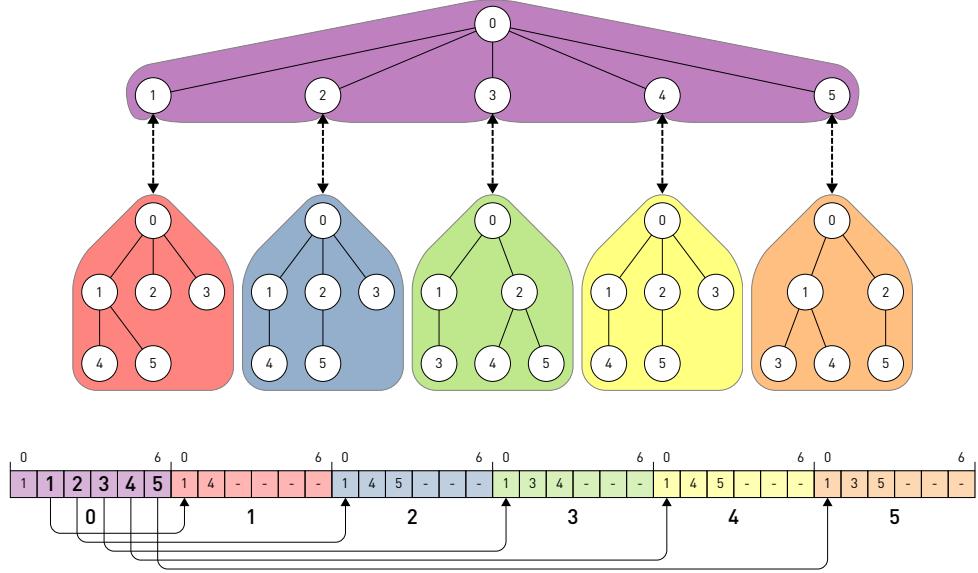


Abbildung 4.5: Verbindung der Treelets durch ihren Index

tree. Abbildung 4.5 stellt diese Verbindung dar. Unter der Abbildung des Baumes sind Werte der First-Child-Pointer für alle Knoten notiert.

Durch die abwärts gerichtete Verbindung, die in den Blatt-Knoten gespeichert ist kann beim Traversieren der Struktur in jedem Blatt das zugehörige Treelet ermittelt werden um dieses bei Bedarf anzufordern. Die aufwärts gerichtete Verbindung ermöglicht den effizienten Zugriff auf alle übergeordneten Treelets bis zum Wurzel-Treelet von denen ein gegebenes Treelet für seine Verarbeitung in der SVO-Struktur abhängig ist.

Die Speichergröße der Treelets kann bei der Erstellung des Baumes angegeben werden. Für die Tests in dieser Arbeit wurden Größen zwischen einem und zehn Kilobyte gewählt. Dabei gilt es bei der Wahl der Speichergröße zwischen Granularität und Aufwand abzuwagen. Um eine hohe Granularität und damit eine hohe Anpassung der gewählten Untermenge an Segmenten zu gewährleisten, sollte die Größe der Treelets eher klein gewählt werden. Sind die Treelets jedoch zu klein können für einen gegebenen Octree schnell mehrere Millionen Treelets entstehen. Deshalb ist es nötig für jeden als Treelet-Struktur abzubildende Datensatz eine geeignete Treelet-Größe zu wählen.

### 4.3 Attribute

Attributinformationen werden parallel zu den Treelets in einem oder mehreren Attribut-Buffern gehalten. Diese Buffer können, wie auch die Knotenstruktur des Octree, sehr groß werden da benötigte Attributwerte für jeden Voxel des Octrees einzeln gespeichert werden. Darum werden die Werte, z.B.

Beleuchtungsinformationen wie Farben, Richtungsinformationen oder ambiente Verdeckungswerte (Ambient Occlusion) vor dem Ablegen komprimiert. Dies kann durch die Verwendung von 8 Bit-Datentypen für die einzelnen Attribut-Komponenten.

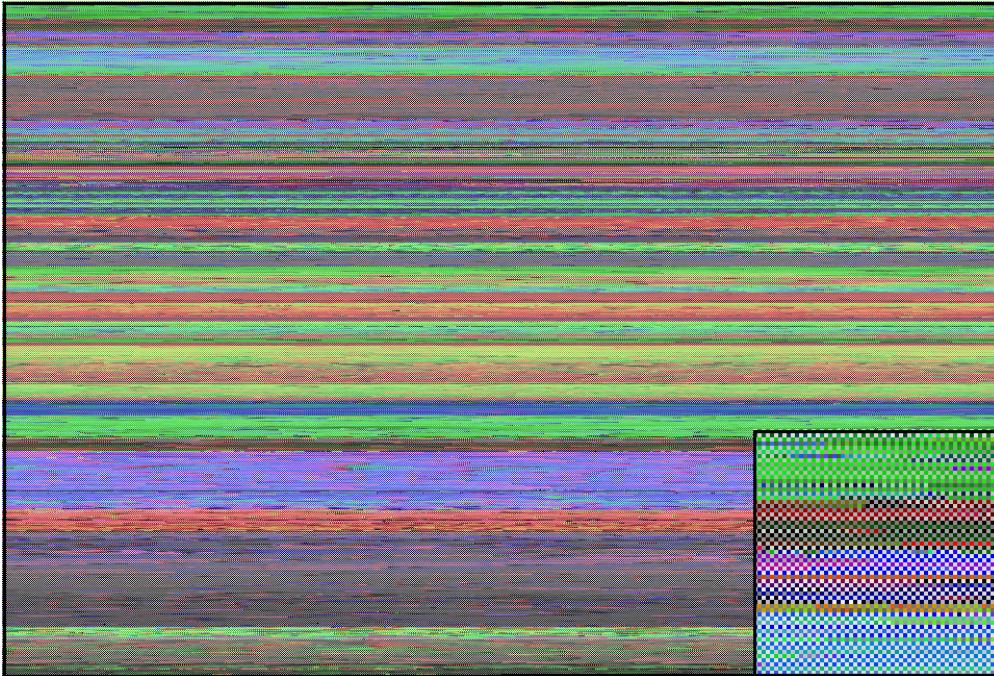


Abbildung 4.6: Attribut-Buffer mit verschachtelten Farb- und Richtungswerten

#### 4.3.1 Generalisiertes System zur SVO-Erstellung

Das System zur Erstellung der SVO-Struktur ist modular aufgebaut und besteht prinzipiell aus drei Teilen: Dem **Build-Manager** der den Ablauf der SVO-Generierung steuert, einem **Treelet-Builder** der die Treelets erstellt und abhängig vom Typ der Eingabedaten gewählt wird und einem **Attributgenerator** der in Abhängig von Eingabedaten und gewünschter Attributkonfiguration der Ausgabedaten gewählt werden kann. Mit dieser Unterteilung des Systems ist es prinzipiell möglich verschiedenste Eingabedaten wie 3D-Objekte aus Dreiecksnetzen oder Punktwolken zu verarbeiten und eine Vielzahl von Attributkonfigurationen zu erstellen. Durch den modularen Aufbau und der Bereitstellung entsprechender Basisklassen ist es möglich Unterstützung für weitere Eingabeformate zu schaffen. Das in Abbildung 4.7 abgebildete Klassendiagramm zeigt die Relationen zwischen den einzelnen Komponenten. Der Build-Manager besitzt einen Treelet-Builder der abhängig von der Art der Eingabedaten gewählt wird. Dazu besitzt er einen passenden Attributgenerator der anhand der Eingabedaten und SVO-Repräsentation Attribute für alle Knoten erzeugt.

#### 4.3.2 Erzeugung der Treelet Struktur

Die SVO-Struktur wird schon bei der Erstellung segmentiert, das heißt, in Treelets unterteilt aufgebaut. Dies bietet die Möglichkeit bereits erzeugte Treelets auf die Festplatte auszulagern, sollte der Arbeits-

#### 4.3. ATTRIBUTE

---

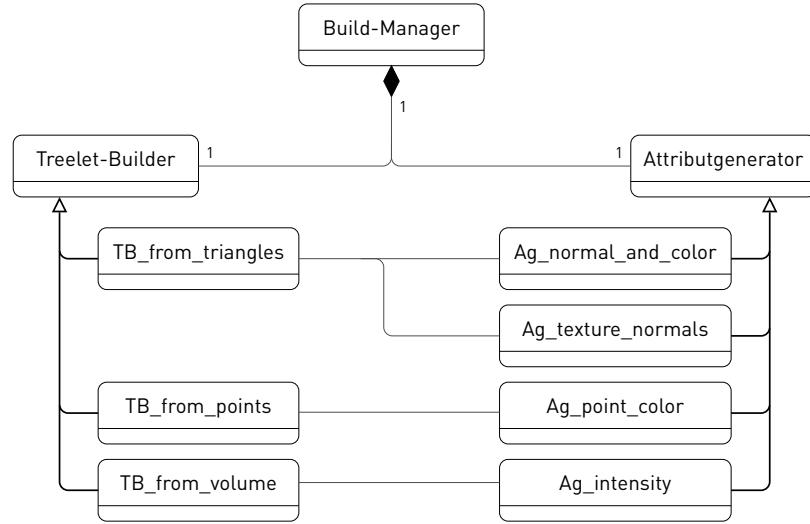


Abbildung 4.7: Klassendiagramm des generallisierten Erstellungssystems

speicher nicht ausreichen um die erzeugten Daten zu halten. Im Folgendem soll ein Überblick über den Ablauf der Erstellung einer SVO-Struktur aus Treelets gegeben werden. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Schritte genauer betrachtet.

Als Eingabe werden zunächst die gewünschte, minimale Tiefe des resultierenden Octrees, die Speichergröße der Treelets und der Pfad zu den Eingabedaten benötigt. Der Build-Manager erstellt ein initiales, leeres Treelet (*Wurzel-Treelet*) und übergibt dieses an den Treelet-Builder. Dieser füllt das Treelet anhand der Eingabedaten. Anschließend werden alle entstandenen Blatt-Knoten, die noch nicht die gewünschte, minimale Tiefe in der Octree-Struktur aufweisen, notiert. Zu jedem dieser Blattknoten wird eine Liste der in ihm liegenden Primitive der Eingabedaten gespeichert. Zusätzlich wird auch seine Tiefe im Baum und seine Transformation relativ zum Wurzelknoten notiert. Außerdem wird jeweils der Treelet-Index, der Index des Blattknotens und dessen Elternknotens gespeichert um die Verknüpfung der Treelets realisieren zu können (vgl. Abschnitt 4.2.2 Segmentierung, Seite 14). Der Build-Manager speichert diese Informationen in einer Queue und erzeugt für jeden Eintrag ein neues Treelet (*Top-Down*). Diese werden durch die gespeicherten Treelet- und Blattknotenindices des Wurzel-Treelets initialisiert und sind so logisch mit diesem verbunden. Jedes dieser Treelets wird wiederum dem Treelet-Builder übergeben, der sie anhand seiner Primitivliste und der gespeicherten Transformation füllt. Der Build-Manager erzeugt sukzessiv weitere Treelets aus Blattknoten bereits erstellter Treelets bis die geforderte minimale Tiefe des Octrees für alle Blattknoten erreicht ist.

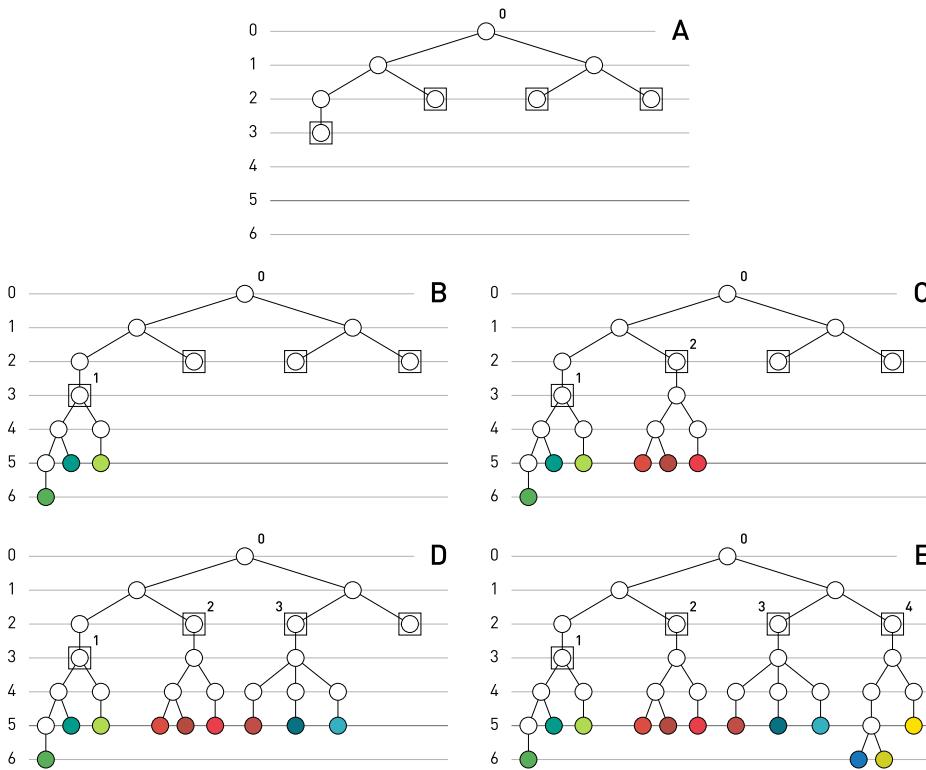


Abbildung 4.8: Schrittweiser Aufbau der SVO-Struktur aus Treelets

Für Blattknoten mit ausreichender Tiefe erzeugt ein Attributgenerator die gewünschten Attribute und speichert diese in einem zusätzlichen Buffer. Die Primitivliste und alle weiteren Informationen die zur Erstellung weiterer Treelets benötigt würden können an dieser Stelle verworfen werden. Abbildung 4.8 zeigt den schrittweisen Aufbau eines Octrees aus Treelets.

Ist die Erstellung der Treelets abgeschlossen werden die Attribute der inneren Knoten durch Mitteln der Attribute ihrer Untergeordneten Knoten erstellt. Dies geschieht für alle Treelets in umgekehrter Reihenfolge ihrer Erstellung (*Bottom-Up*). So wird sichergestellt, dass der Wurzelknoten eines untergeordneten Treelets bereits Attributinformation enthält wenn sein übergeordnetes Treelet diese zur Generierung seiner Attribute in seinen Blattknoten benötigt. Ist die Erstellung der Attribute bis in den Wurzelknoten des Wurzel-Treelets vorangeschritten ist die Erstellung des Octrees abgeschlossen.

### 4.3.3 Treelet Aufbau

Der Treelet-Builder erstellt die Knoten in der Breite (*Breadth-First*) und arbeitet dazu intern auf einem FIFO-Kontainer (*Queue*). Der Aufbau eines Elementes dieser Queue ist im Listing 4.1 zu sehen. Jedes Element der Queue entspricht einem Knoten in der SVO-Struktur und enthält einerseits alle Informationen die nötig sind diesen Knoten seinem übergeordneten Knoten mitzuteilen und andererseits die Erzeugung weiterer Unterknoten zu ermöglichen.

Listing 4.1: Queue-Element

```
1 struct QueueElement
```

### 4.3. ATTRIBUTE

---

```
2 {
3     // Knoten-Index des Knotens innerhalb des Treelets
4     unsigned           _localLeafIndex;
5     // Kind-Index des Knotens innerhalb seines Eltern-Knotens
6     char              _idx;
7     // Knoten-Index des Eltern-Knotens
8     unsigned           _parentLocalNodeIndex;
9     // Tiefe des Knotens in der SVO-Struktur
10    unsigned          _depth;
11    // Transformation des Knotens relativ zum Wurzelknoten
12    gloost::Matrix    _aabbTransform;
13    // In diesem Knoten enthaltene Primitive der Ausgangsdaten
14    std::vector<unsigned> _primitiveIds;
15 }
```

Initial wird ein Queue-Element stellvertretend für den Wurzelknoten des aktuellen Treelets erstellt. Dieses enthält die relative Transformation dieses Knotens in der SVO-Struktur sowie alle Primitive die in diesen Knoten liegen. Für jeden potentiellen Kind-Knoten wird ein Queue-Element mit entsprechenden Parametern erzeugt und dessen *Bounding Box* mit Primitiven des aktuellen Queue-Elementes zum Schnitt gebracht. Dabei wird für jedes Kind die Untermenge an Primitiven notiert die geschnitten wurden. Falls ein Kindknoten keine Primitive enthält, wird es verworfen. Die anderen Kindknoten bekommen aufeinanderfolgende Speicherpositionen innerhalb des Treelets. Der *First-Child-Index* des Knotens des aktuellen Queue-Elementes wird daraufhin auf die Position des ersten Kindes gesetzt und die Queue-Elemente der Kindknoten in die Queue eingereiht.

Vor dem Abarbeiten eines Queue-Elementes wird überprüft, ob im Treelet noch genügend freie Plätze für eine weitere Unterteilung vorhanden ist. Sind weniger als acht Plätze übrig muss nach der nächsten Unterteilung erst überprüft werden, ob die entstandenen Kindknoten noch abgelegt werden können, bevor die Unterteilung gespeichert werden kann. Geht dies nicht, wird versucht einen Queue-Element zu finden, dessen Bearbeitung weniger neue Knoten erzeugt. Kann kein Queue-Element gefunden werden, ist die Erstellung des Treelets abgeschlossen.

Die in der Queue verbliebenen Elemente werden nach ihrer Baumtiefe in finale und weiter zu unterteilende Elemente getrennt und in zwei Kontainern im Treelet gespeichert. Nachdem die finalen Knoten in den Leaf-Masks der Eltern-Knoten als solche markiert wurden, wird das Treelet an den Build-Manager zurückgegeben.

Der Build-Manager erzeugt für jedes nicht finale Queue-Element ein weiteres Treelet. Der Indices der neu erstellten Treelets werden im *First-Child-Index* der zugehörigen Blattknoten des übergeordneten Treelets gespeichert. Dann werden die Treelets entsprechend parametrisiert in einer eigenen Queue eingereiht um sie in entsprechender Reihenfolge an den Treelet-Builder weitergeben zu können. Der oben beschriebene Ablauf wiederholt sich daraufhin für jedes Treelet in der Queue. Liefert der Treelet-Builder nur noch Treelets mit finalen Blattknoten, leert sich die Queue und das Erstellen der SVO-Struktur ist abgeschlossen.

#### 4.3.4 Attribut Generierung

Zu jedem Treelet werden parallel ein oder mehrere Buffer mit verschachtelten (*interleaved*) Attributinformationen erstellt. Anzahl und Layout der Attribut-Buffer sind abhängig vom gewählten Attribut-

Generator.

Für jeden finalen Blattknoten wird mit Hilfe der gespeicherten Primitive und Transformation eine Menge von Attributen erzeugt. Dieser Vorgang soll im Folgenden am Beispiel von Dreiecksprimitiven erläutert werden. Für jedes Dreieck innerhalb eines Blatt-Knotens wird ein Strahl erzeugt, der durch die Voxelmitte und senkrecht zum Dreieck verläuft (vgl. Abbildung 4.9a). Der Strahl wird mit den Dreiecken geschnitten um so eine UV-Koordinate berechnen zu können. Durch die Wahl der Richtung ist gewährleistet, dass der

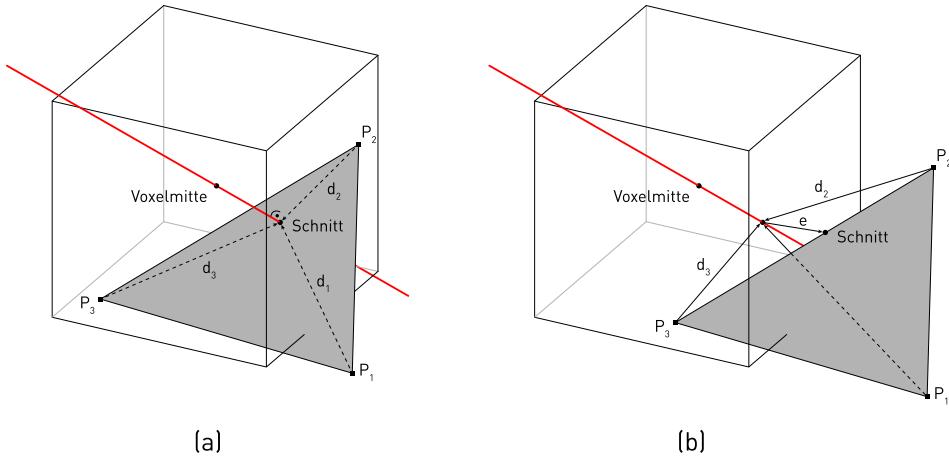


Abbildung 4.9: Ermittlung von UV-Koordinaten

Winkel zwischen Strahl und Dreiecksfläche maximal ist, so dass die Wahrscheinlichkeit eines Schnittes erhöht wird. Trotzdem ist es möglich, dass der Strahl das Dreieck verfehlt, da das Voxel das Dreieck beispielsweise nur mit einer Ecke schneidet, die nicht zur Voxel-Mitte ausgerichtet ist (vgl. Abbildung 4.9b). Um trotzdem den Beitrag des Dreiecks zu den Voxel-Attributen berücksichtigen zu können, wird in diesem Fall der Punkt auf dem Dreieck als Schnittpunkt angenommen, der den kleinsten Abstand zum Schnittpunkt mit der Dreiecksebene besitzt. Dieser Vorgang erzeugt ein Rauschen in den Daten das aber angesichts der geringen Größe der Blatt-Knoten und des daraus resultierenden geringen Fehlers nicht sichtbar ist. Mit Hilfe der ermittelten UV-Koordinaten können nun Attribute wie Farbe oder Richtung aus den Eckpunkten der Dreiecke interpoliert oder aus Texturen gelesen werden. Die erhaltenen Werte werden über alle am Voxel beteiligten Dreiecke gemittelt. Farb- und Richtungswerte werden auf 8 Bit pro Komponente quantisiert bevor sie in den Attributbuffer gespeichert werden.

#### 4.3. ATTRIBUTE

---

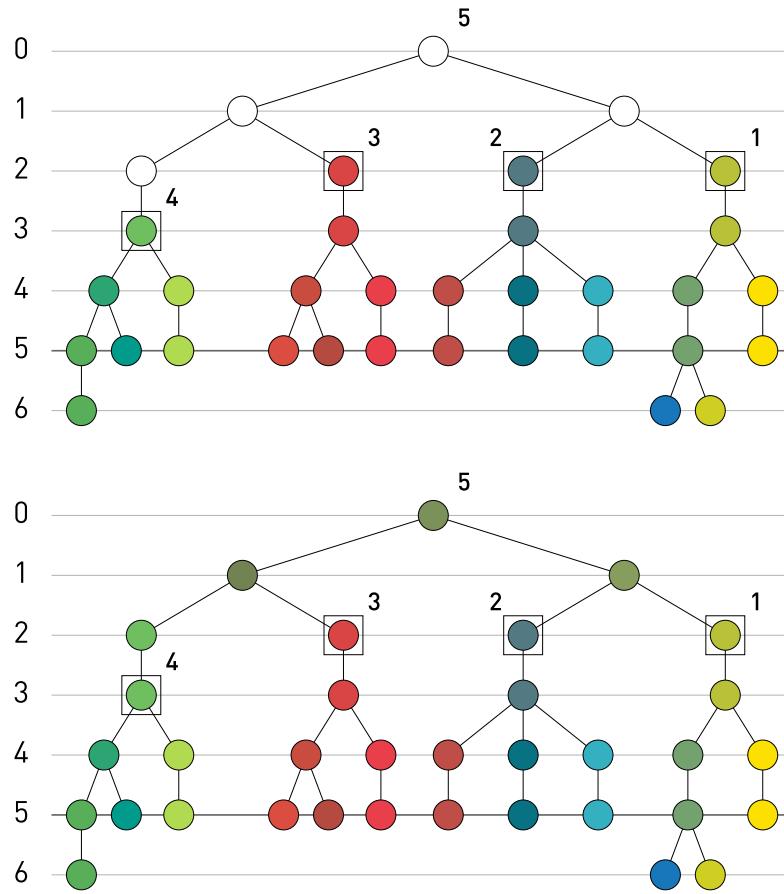


Abbildung 4.10: Reihenfolge der Erzeugung der Attribute innerer Knoten

Wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben, werden die Attribute der inneren Knoten erst erzeugt, nachdem die Erstellung aller Treelets abgeschlossen ist. Durch die Verwendung eines FIFO-Kontainers im Build-Manager sind die Treelets so nummeriert, dass jedes Treelet einen niedrigeren Index besitzt als seine untergeordneten Treelets. Somit ist das Treelet mit dem höchsten Index von keinem anderen Treelet für die Generierung seiner Attribute abhängig, da es schon in allen seinen Blatt-Knoten Attribute besitzt. Das Treelet mit dem Index 0 ist dagegen für seine Attributgenerierung von allen anderen Treelets abhängig. Für die Generierung der Attribute werden die Treelets daher in umgekehrter Reihenfolge ihrer Indizierung abgearbeitet. Abbildung 4.10 veranschaulicht die Reihenfolge anhand eines Beispiels (vgl. Abbildung 4.8).

Beginnend beim Treelet mit dem größten Index wird jedes Treelet, vom Wurzelknoten an, der Tiefe nach, rekursiv durchlaufen bis die Blattknoten erreicht werden. Diese enthalten bereits Attributeinformationen. Beim Aufsteigen aus der Rekursion werden die Attribute der jeweils vorhandenen Kindknoten gemittelt und im Attribut-Buffer abgelegt. Dazu werden die mit 8 Bit aufgelösten Attributkomponenten der Kindknoten zunächst wieder in 32 Bit Fließkommawerte konvertiert, damit sich bei der Mittelung der Kindknotenattribute die Quantisierungsfehler nicht verstärken. Nachdem auch für den Wurzelknoten ein Attribut vorhanden ist, wird dieses in den Attribut-Buffer des übergeordneten Treelets für den entsprechenden Blattknoten abgelegt. Durch die Reihenfolge der Indizierung ist für jedes Treelet sichergestellt, dass

für alle Blattknoten Attributinformationen vorhanden sind wenn sie zur Generierung der Attribute der inneren Knoten benötigt werden.

## 4.4 Echtzeitfähiges SVO-Ray Casting

### 4.4.1 Prinzipieller Aufbau

Der in dieser Arbeit verwendete Out-Of-Core-Ansatz besteht grundsätzlich aus vier Teilen (Abbildung 4.11): Einem großen, clientseitigen **Segmentpool** der die gesamte SVO-Struktur vorhält, einem vergleichsweise kleinen Buffer der eine Untermenge der SVO-Struktur halten kann und auf Server- und Clientseite existiert (**Incore-Buffer**), einer **Speicherverwaltung** die den server-seitigen Buffer pflegt und einem **Analysesystem** das entscheidet welche Segmente benötigt werden. Der Incore-Buffer, der auf Client- und

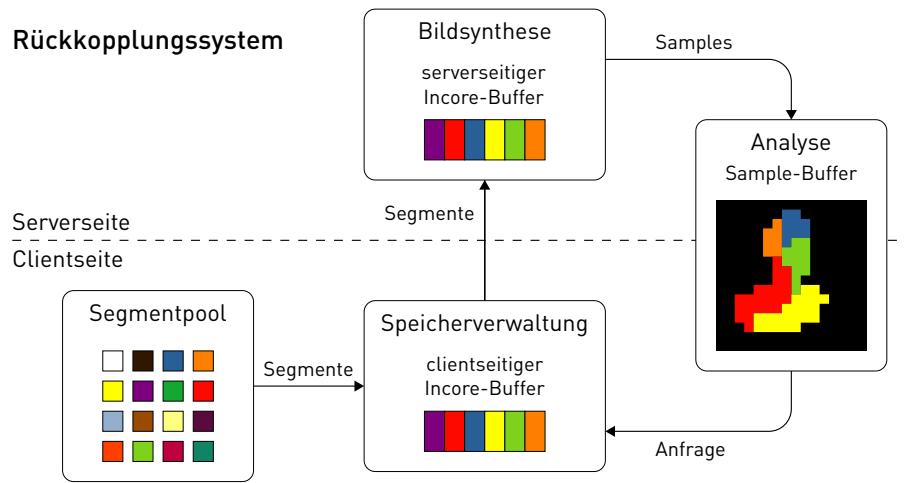


Abbildung 4.11: Schematischer Aufbau des Out-Of-Core-Systems

Serverseite vorhanden ist, wird wie der SVO in Segmente gleicher Größe (*Slots*) aufgeteilt von denen jeder ein Treelet aufnehmen kann. Die Wahl einer einheitlichen Treelet- und Größe verhindert somit Fragmentierung des Incore-Buffer und entsprechenden Aufwand zu Defragmentierung. Die Analyse arbeitet serverseitig auf den im Incore-Buffer vorhandenen Treelets. (!!! WEITER)

### 4.4.2 Überblick der Verarbeitungsschritte

Im Folgendem soll der Ablauf der dynamischen Veränderung der SVO-Struktur im Incore-Buffer, abhängig von der Kameraposition erläutert werden. In den folgenden Kapiteln wird auf die einzelnen Schritte genauer eingegangen.

Der Incore-Buffer wird zunächst mit dem Wurzel-Treelet im ersten Slot initialisiert. Die adaptive Anpassung der Baumstruktur wird in vier Schritten realisiert: Zunächst wird der Octree aus der Sicht der Kamera in den Feedback-Buffer gerendert (**Analyse-Pass**). Nach diesem Schritt enthält dieses Buffer für jeden Strahl u.A. die Position des getroffenen Knoten im Incore-Buffer und einen Fehlerwert. War der getroffene Knoten ein Blatt, zu dessen Verfeinerung ein Treelet vorhanden ist, wird zusätzlich noch dessen Index gespeichert.

Nach der Übertragung des Feedback-Buffers in den Hauptspeicher werden dessen Einträge in zwei Container verarbeitet (**Vorsortierung**). Der eine enthält die Treelet-Indices aller Knoten die getroffen wur-

den und zusätzlich die Treelet-Indices ihrer übergeordneten Treelets bis zum Wurzel-Treelet. Der andere Container enthält Anfragen nach Verfeinerung in Form der Treelet-Indices der anzuhängenden Treelets. Die Fehlerinformation bleibt dabei in beiden Containern erhalten.

Jetzt werden beide Container dem Speichermanagement übergeben (*clientseitige Aktualisierung*). Dort werden zunächst die Sichtbarkeitsinformation aller im letzten Zyklus gesehenden Treelets aktualisiert. Danach werden die neu anzuhängenden Treelets in den clientseitigen Incore-Buffer eingepflegt. Dabei werden nicht sichtbare Treelets entfernt falls im Incore-Buffer keine freien *Slots* mehr zur Verfügung stehen. Geänderte Slots werden markiert. Abschließend werden die veränderten Bereiche des Incore-Buffers an den Server übertragen und stehen nun dem Renderer für den nächsten Zyklus zur Verfügung (*serverseitige Aktualisierung*).

Die folgenden Abschnitte werden diese Schritte genauer betrachten.

#### 4.4.3 Analyse Pass

Um die Last, die durch diesen zusätzlichen Render-Pass entsteht, möglichst gering zu halten ist die Größe des zur Analyse verwendeten Zielbuffer wesentlich kleiner als die des für die Bildgenerierung verwendeten Frame-Buffers. Um Artefaktbildung zu vermindern werden die Strahlen bei jedem Analyseschritt durch Zufallswerte parallel zur Sicht-Ebene verschoben. Die Verschiebung ist dabei so gewählt das über die Zeit im Bereich von  $n \times n$  Frame-Buffer Texeln abgetasted wird wobei  $n$  das Verhältnis der Größen von Frame-Buffer und Analyse-Buffer ist. Damit ist es möglich den Analyse-Buffer auf bis 1/8 der Größe des Frame-Buffers zu verkleinert ohne das es durch Aliasing zu Artefaktbildung kommt oder zu wenig Information zur Verfügung steht um die nachfolgende dynamische Anpassung des Octrees zu treiben.

Das Füllen des Feedback-Buffers erfolgt analog zum bilderzeugenden Raycasting in OpenCl auf dem im Incore-Buffer vorhandenen Octree. Nach der Traversierung des Octrees liegt für jeden Strahl eines der folgenden drei Ergebnisse vor:

1. der Strahl trifft nicht
2. der Strahl trifft einen inneren Knoten
3. der Strahl trifft ein Blatt

Im ersten Fall wird nichts zurückgegeben, im Zweiten nur die Position des Voxels im Incore-Buffer und die Länge des Strahles. Im dritten Fall wird zusätzlich der Verweis auf ein evtl. vorhandenes Sub-Treelet und die Differenz zwischen vorgefundener Voxelgröße und der für die Länge des Strahles idealen Voxelgröße als Fehlerwert gespeichert.

**Listing 4.2: Struktur eines Feedback-Elementes**

```

1 struct FeedBackDataElement
2 {
3     // Knoten-Index im Incore-Buffer in dem der Strahl terminierte
4     int _nodeId;
5     // Unterschied zwischen geforderter und erreichter Voxelgröße
6     float _error;
7     // Treelet-Index, falls der Strahl in einem Blatt terminierte
8     int _subTreeletGid;

```

```

9     // Entfernung von Kamera und Knoten (nicht notwendig für den beschriebenen Ablauf)
10    float _tmin;
11 };

```

### 4.4.4 Vorsortierung

Nach dem Transfer des Analyse-Buffers vom Server in den Hauptspeicher, werden dessen Elemente ausgewertet. Dabei werden zwei Container mit unterschiedlichen Sichtinformationen gefüllt. Im ersten Container werden Indices von Treelets notiert, die bereits im Incore-Buffer vorhanden sind, im Zweiten nur Anfragen nach neuen Treelets. Beide Container sind nach dem Fehlerwert der Einträge absteigend sortiert wobei jeder Treelet-Index über beide Container hinweg unique ist.

Im oben beschriebenen Fall 1 (der Strahl trifft nicht) liegen keine Sichtbarkeitsinformation vor weshalb solche Einträge übersprungen werden. Im Fall 2 (der Strahl trifft einen inneren Knoten) wird über die erhaltene Position des Knoten im Incore-Buffer und über die Größe eines Treelets auf den *Slot* des zugehörigen Treelets und damit auch auf den entsprechenden Treelet selbst geschlossen. Durch die in den Treelets gespeicherten Eltern-Information werden zusätzlich alle übergeordneten Treelets als sichtbar notiert. Tritt bei der Notation ein Treelet mehrfach auf, wird jeweils der größte Fehler notiert.

Im Fall 3 (der Strahl trifft ein Blatt) wird für den Blattknotenindex wie im Fall 2 vorgegangen. Zusätzlich wird der Treelet-Index des anzuhängenden Treelets im entsprechenden Container gespeichert. Tritt ein Treelet-Index mehrfach auf wird auch hier nur ein Eintrag mit dem größten Fehler gespeichert.

Nachdem alle Elemente des Feedback-Buffers verarbeitet wurden werden beide Container dem Speichermanager übergeben.

### 4.4.5 Clientseitige Aktualisierung

Die Pflege der Sichtbarkeitsinformationen der bereits im Incore-Buffer befindlichen Treelets ist trivial: Zunächst wird die Sichtbarkeit jedes *Slots*, d.h. die Sichtbarkeit jedes im *Incore-Buffer* befindlichen Treelets dekrementiert. Dann wird die Sichtbarkeit derjenigen Treelets aktualisiert, die beim letzten Analyse-Pass gesehen wurden. Dabei wird die Sichtbarkeit auf einen vorher festgelegten Maximalwert gesetzt der dem Größenverhältnis von Render-Buffer und Analyse-Buffer entspricht.

### 4.4.6 Einfügen eines Treelets

Für das Einfügen eines Treelets aus dem in der Vorsortierung erstellten Containers wird zunächst ein freier Slot innerhalb des Incore-Buffers benötigt. Ist dieser vorhanden kann das Treelet an die entsprechende Stelle im Incore-Buffer kopiert werden. Der Slot-Index wird im Treelet-Objekt gespeichert und zur Aktualisierung des serverseitigen Incore-buffers vorgemerkt. Die folgende Veränderung der Baumstruktur kann in Listing 4.3 nachvollzogen werden. Aus dem Treelet werden folgende Informationen gelesen:

1. der Treelet-Index des Eltern-Treelets
2. der Knoten-Index des Blattes, an dem das Treelet angehängt werden soll
3. der Eltern-Knoten-Index des Blattes
4. die Position des Blattes in seinem Eltern-Knoten

Damit wird nun die Position des entsprechenden Blattknotens des Eltern-Treelets im Incore-Buffer ermittelt und durch den Wurzelknoten des anzuhängenden Treelets ersetzt. Dadurch muss dessen relative Index zu seinem ersten Kindknoten angepasst werden. Der erste Kindknoten des neuen inneren Knotens findet sich immer an zweiter Position innerhalb des angehängten Treelets im Incore-Buffer. Der Blattknoten wird damit zu einem inneren Knoten, was wiederum in seinem Elternknoten an der entsprechenden Stelle in der *Childmask* markiert wird. In einem weiteren Container wird vermerkt, dass das Parent-Treelet nun ein neues Kind-Treelet im Incore-Buffer besitzt. Abschließend wird der Slot-Index des Parent-Treelets zur späteren serverseitigen Aktualisierung vorgemerkt.

**Listing 4.3: Einfügen eines Treelets**

```

1 ...
2 Treelet* treelet           = _treelets[tve._treeletGid];
3 gloostId parentTreeletGid = treelet->getParentTreeletGid();
4 gloostId parentTreeletLeafPosition = treelet->getParentTreeletLeafPosition();
5 gloostId parentTreeletLeafParentPosition = treelet->getParentTreeletLeafsParentPosition();
6 gloostId parentTreeletLeafIdx = treelet->getParentTreeletLeafIdx();

7
8 Treelet* parentTreelet      = _treelets[parentTreeletGid];
9 unsigned incoreLeafPosition = parentTreelet->getSlotGid()
10 * _numNodesPerTreelet+parentTreeletLeafPosition;
11 unsigned incoreLeafParentPosition = parentTreelet->getSlotGid()
12 * _numNodesPerTreelet + parentTreeletLeafParentPosition;
13
14 // copy root node of new Treelet to the leaf of parents Treelet
15 _incoreBuffer[incoreLeafPosition] = _incoreBuffer[incoreNodePosition];
16
17 // update leaf mask of leafs parent so that the leaf is no leaf anymore
18 _incoreBuffer[incoreLeafParentPosition].setLeafMaskFlag(parentTreeletLeafIdx, false);
19
20 // update first child position within leaf/root (relative value within the incore buffer)
21 _incoreBuffer[incoreLeafPosition].setFirstChildIndex( (int)(incoreNodePosition+1)
22 -(int)incoreLeafPosition);
23
24 // mark incore slot of parent to be uploaded to device memory
25 markIncoreSlotForUpload(parentTreelet->getSlotGid());
26
27 // note treeletGid to parent position within the _childTreeletsInIncoreBuffer
28 _childTreeletsInIncoreBuffer[parentTreeletGid].insert(tve._treeletGid);
29
30 return true;
31 }
```

#### 4.4.7 Entfernen eines Treelets

Ist für das Einfügen eines Treelets kein Slot mehr verfügbar muss zunächst ein Slot dessen Treelet nicht sichtbar war wieder frei gegeben werden. Dazu wird der Baum der Treelets in einem Thread durchsucht und eine Menge von Kandidaten für das Entfernen vorgehalten. Da diese Suche nebenläufig geschieht ist nicht sichergestellt, dass dieser Kandidat zum Zeitpunkt des Entfernens noch valide ist. Deshalb muss vor dem eigentlichen Entfernen der Sichtbarkeitswert des Slots zunächst erneut überprüft werden. Außerdem ist es möglich, dass zwar das entsprechende Treelet selbst nicht sichtbar war, jedoch im Falle des Entfernens der entsprechende Blatt-Knoten des Eltern-Treelets. Bild (!!!BILD EINFÜGEN) illustriert diesen Fall der ausnahmslos an den Rändern der Geometrie auftritt. Im Bild befindet sich ein geladenes

#### 4.4. ECHTZEITFÄHIGES SVO-RAY CASTING

---

Treelet hinter einer konvexen Wölbung der Geometry und kann so nicht vom Analyse-Pass gesehen werden. Wird dieses Treelet jedoch entfernt, ragt der entstehende Blatt-Knoten des Eltern-Treelets über die Wölbung hinaus. Im nächsten Zyklus würde dieses Blatt wieder verfeinert werden wodurch es zu flackernden Artefakten an den Geometrikanten kommt. Um diese Artefaktbildung zu verhindern werden Umgebungsinformationen, sprich die Sichtbarkeit des Eltern-Treelets mitüberprüft. Nur wenn auch das Eltern-Treelet nicht sichtbar ist, kann das Treelet sicher entfernt werden.

Alle Slots von im Incore-Buffer gespeicherten Treelets die sich unterhalb des zu entfernenden Treelets befinden können sofort freigegeben werden. Dazu wird die Kind-im-Incore-Buffer-Information des Kandidaten-Treelets und rekursiv die aller untergeordneten Treelets traversiert. So werden im günstigen Fall gleich mehrere Slots freigegeben.

Die Manipulation des Incore-Buffers zum Entfernen des Kandidaten-Treelets läuft analog zum Einfügen ab. Die folgenden Schritte können im Listing 4.4 nachvollzogen werden.

**Listing 4.4:** Entfernen eines Treelets

```

1 ...
2 gloostId parentTreeletGid           = treelet ->getParentTreeletGid();
3 gloostId parentTreeletLeafPosition   = treelet ->getParentTreeletLeafPosition();
4 gloostId parentTreeletLeafParentPosition = treelet ->getParentTreeletLeafsParentPosition();
5 gloostId parentTreeletLeafIdx        = treelet ->getParentTreeletLeafIdx();
6
7 gloost::gloostId slotGid           = treelet ->getSlotGid();
8 gloost::gloostId parentSlotGid     = _treelets[parentTreeletGid] ->getSlotGid();
9
10 unsigned incoreLeafPosition       = parentSlotGid
11                           *_numNodesPerTreelet + parentTreeletLeafPosition;
12 unsigned incoreLeafParentPosition = parentSlotGid
13                           *_numNodesPerTreelet + parentTreeletLeafParentPosition;
14
15 // copy original node/leaf to incore leaf position
16 _incoreBuffer[incoreLeafPosition]
17           = getTreelet(parentTreeletGid) ->getNodeForIndex(parentTreeletLeafPosition);
18
19 // update leaf mask of leafs parent so that the leaf is a leaf again
20 _incoreBuffer[incoreLeafParentPosition].setLeafMaskFlag(parentTreeletLeafIdx, true);
21
22 // mark incore slot of parent to be uploaded to device memory
23 markIncoreSlotForUpload(parentSlotGid);
24
25 // clear slot info
26 _slots[slotGid] = SlotInfo();
27
28 // add slots to available/free slots
29 _freeIncoreSlots.push(slotGid);
30
31 // remove assoziation from treelet gid to slot
32 treelet ->setSlotGid(-1);
33
34 // remove entry of treelet within parents list of incore child treelets
35 _childTreeletsInIncoreBuffer[parentTreeletGid].erase(treeletGid);
36
37 return true;
38 }
```

Wieder wird das Eltern-Treelet, die Position des entsprechenden Blatt-Knoten und dessen Eltern-Knotens ermittelt. Dann wird der Blatt-Knoten durch sein Original aus dem Eltern-Treelet überschrieben.

Aus dem inneren Knoten wird so wieder ein Blatt-Knoten mit Verweis auf ein mögliches anhängbares Treelet. Dies wird im Eltern-Knoten des Blatt-Knotens an der entsprechenden Stelle in der *Childmask* markiert. Da sich damit das Eltern-Treelet im clientseitigen Incore-Buffer geändert hat muss dessen Slot zur serverseitigen Aktualisierung vorgemerkt werden.

## 4.5 Serverseitige Aktualisierung

Die Slots die beim Einfügen und Entfernen von Treelets markiert wurden werden in diesem Schritt auf den Server übertragen. Dabei kann im einfachsten Fall jeder Slot innerhalb des Incore-Buffers einzeln übertragen werden. Dies führt jedoch zu vielen Einzelübertragungen von geringer Größe. Dies ist sehr ungünstig da für jede Kopieroperation ein nicht unerheblicher Verwaltungsaufwand innerhalb der OpenCL-API anfällt. Handelt es sich beim verwendeten Server um eine GPU müssen die Daten zusätzlich über den PCI-Express-Bus übertragen werden. Auch hier kann die maximale Übertragungsrate nur durch möglichst große Pakete erreicht werden.

Um die Anzahl der Kopieraufrufe möglichst gering zu halten werden deshalb nahe aneinanderliegende Slots zusammengefasst und gemeinsam kopiert. Dazu werden die Indices der zu aktualisierenden Slots sortiert vorgehalten. Ausgehend vom ersten Slot-Index wird der zu kopierende Speicherbereich so lange bis zum nächsten Slot erweitert bis das Verhältnis zwischen zu aktualisierenden Slots und unveränderten Slots innerhalb dieses Bereiches unter ein festgelegtes Niveau sinkt. Abbildung 4.12 zeigt das Ergebnis dieser Zusammenfassung für ein Verhältnis von 50% zwischen veränderten und unveränderten Slot-Bereichen. Am effizientesten arbeitet dieser Ansatz wenn der Incore-Buffer anfangs noch leer ist da die

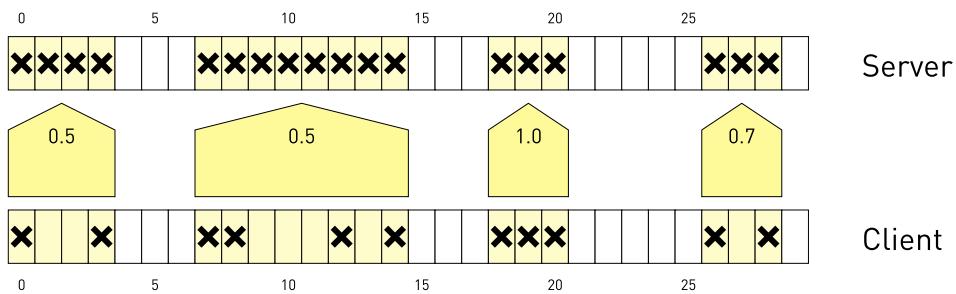


Abbildung 4.12: Zusammenfassen von Slot-Bereichen zur Übertragung

Slots-Indices aufeinanderfolgend herausgegeben werden und die entsprechenden Speicherbereiche damit an einem Stück auf den Server transferiert werden können. Das Zusammenfassen der Slots kann in einem Thread ausgelagert werden damit sich der entstehende Zeitaufwand nicht auf die Bildrate auswirkt.

#### *4.5. SERVERSEITIGE AKTUALISIERUNG*

---

## Kapitel 5

# Ergebnisse und Diskussion

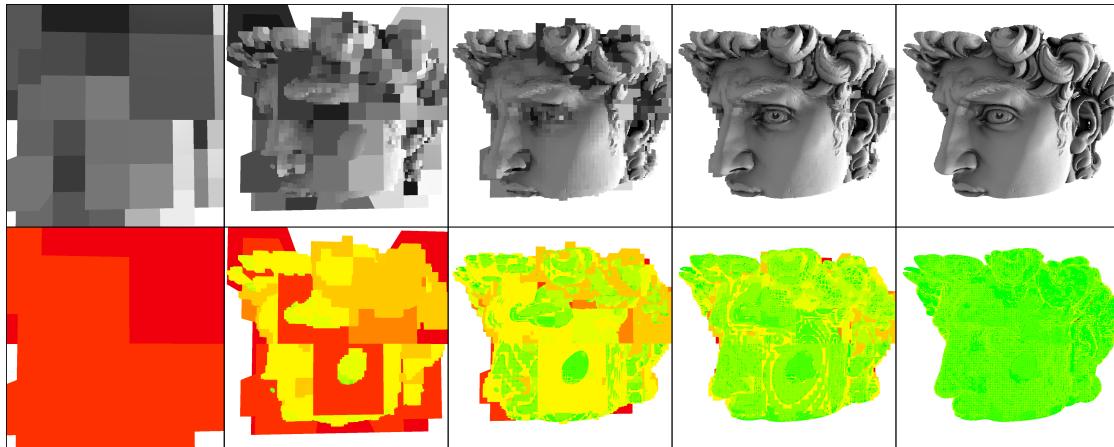


Abbildung 5.1: Verfeinerung in 5 aufeinander folgenden Schritten

### 5.1 Überblick

### 5.2 Verwendete Testszenen

Zum Testen des Out-of-Core Systems wurden SVO-Strukturen aus drei unterschiedliche Dreiecksgometrien generiert (siehe Tabelle 5.1). Aus jedem Modell wurden zwei verschiedene SVO-Strukturen erstellt. Beide haben jeweils die selbe minimale Tiefe von 13, aber eine unterschiedliche Treelet Größe. Die Tiefe betrug jeweils 12 bei Treelet Größen von 1kb und 4kb. Durch die Verkleinerung der Treelets bei gleicher minimaler SVO-Tiefe entstehen mehr Treelets und damit eine größerer Aufwand bei der Verwaltung. Die beiden Varianten sollen im folgenden verglichen werden, um die Skalierbarkeit des Out-of-Core Systems nach zu vollziehen. In Tabelle ... wird gezeigt... .

### 5.3. LAUFZEITANALYSE

---

Name	Anzahl Dreiecke	Dateigröße
david face	52.5 Mio	14.7 GB
xyzrgb statuette	10.0 Mio	270 MB
Lucy	28.0 Mio	757 MB

Tabelle 5.1: Verwendete Dreicksmodelle

Name	Treelet Größe	Anzahl Treelets	Anzahl Knoten	Dateigröße
david face	1kb	743.277	95.139.456	1.4 GB
	4kb	484.297	247.960.064	3.7 GB
xyzrgb statuette	1kb	781.302	100.006.656	1.5 GB
	4kb	246.434	126.174.208	1.9 GB
Lucy	1kb	588.032	75.268.096	1.2 GB
	4kb	131.072	67.108.864	1.0 GB

Tabelle 5.2: Verwendete Sparse Voxel Octrees

## 5.3 Laufzeitanalyse

Zum Testen wurden die Zeiten für die einzelnen Verarbeitungsschritte des Out-of-Core Systems gemessen. Während der Messung wurde die Bildsynthese deaktiviert, um ausschließlich den Einfluss der Anzahl der Treelets auf den Verwaltungsaufwandes zu untersuchen. Der SVO wurde über einen Zeitraum von 60 Sekunden aus verschiedenen Perspektiven analysiert und verfeinert. Durch die kontinuierliche Veränderung der Perspektive muss das System permanent neue Teile des Octrees anfordern, während es andere verwerfen muss. Damit bei der Verfeinerung auch Treelets in hohen Octree Tiefen angefordert werden, wird zum testen eine Kamerafahrt verwendet die ein Maß an Kohärenz zwischen den Perspektiven zu gewährleisten.

## 5.4 Einschränkungen und Verbesserungen

### 5.4.1 Serverseitige Aktualisierung

Die in Abschnitt 4.5 beschriebene Zusammenfassung der zu kopierenden Incore-Buffer-Slots wirkt sich deutlich auf die zum Übertragen der geänderten Speicherbereiche benötigte Zeit aus. Wie beschrieben arbeitet der Ansatz am besten wenn die zu transferierenden Speicherbereiche Mit steigender Fragmentierung des Incore-Buffers sinkt die Einsparung jedoch und schwankt stark. Bei einem vorgegebenen Verhälts zu aktualisierenden Slots von 20% etwa schwankt die Einsparung zwischen 10% bis 92% und lag über einen Zeitraum von 60 Sekunden im Mittel bei etwa 43%. Die hier exemplarisch genannten Werte sind jedoch wenig aussagekräftig, da das Verhalten des Ansatzes nicht nur von der Anzahl der Slots, der Größe und dem Fragmentierungsgrad des Incore-Buffers abhängt, sondern auch von der Geometrie und der Kameraposition über die Zeit. Eine Verbesserung zum einzelnen Kopieren der Slots ist jedoch erkennbar.

### 5.4.2 Verwendung von OpenGL Texturen als Buffer

...

## 5.4. EINSCHRÄNKUNGEN UND VERBESSERUNGEN

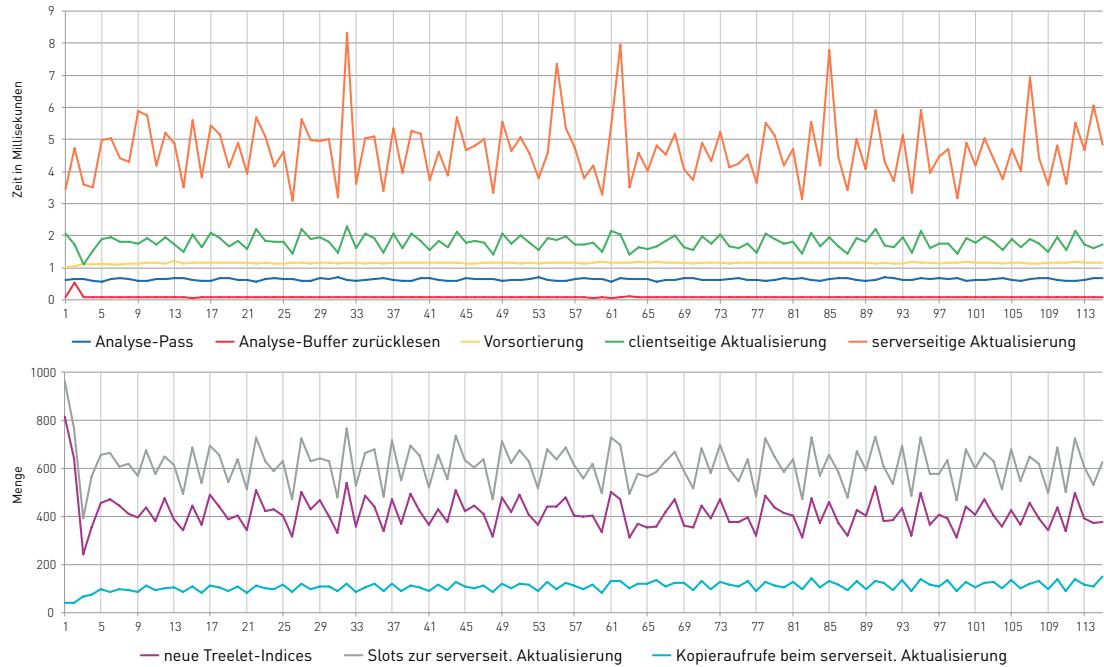


Abbildung 5.2: Systemzeiten und Arbeit für Model lucy mit 4 kb Treelets

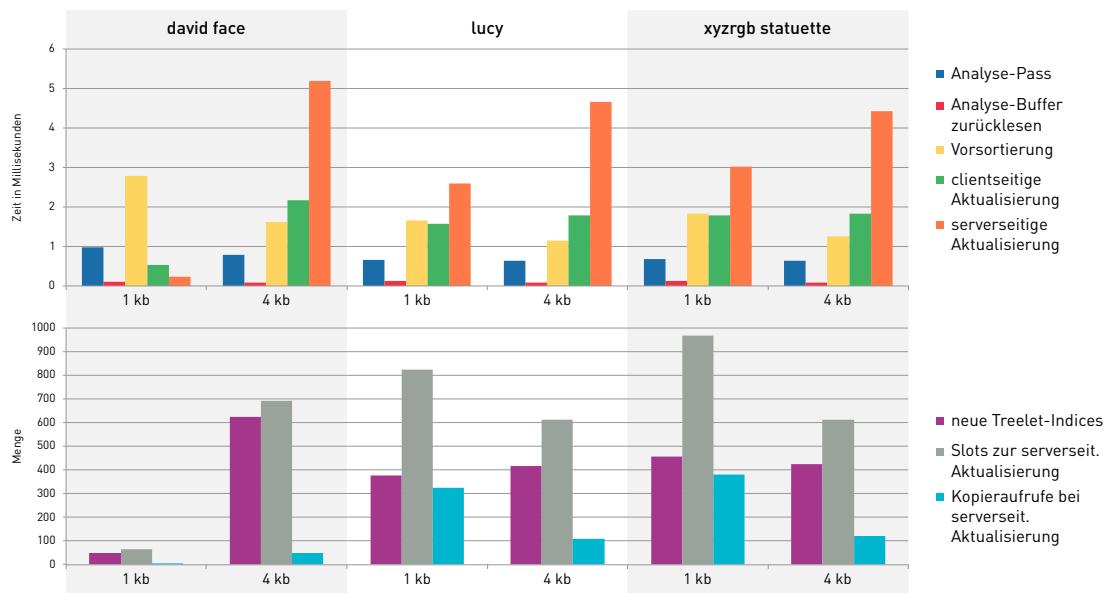


Abbildung 5.3: Gegenüberstellung unterschiedlichen Treelet-Größen

## 5.4. EINSCHRÄNKUNGEN UND VERBESSERUNGEN

---

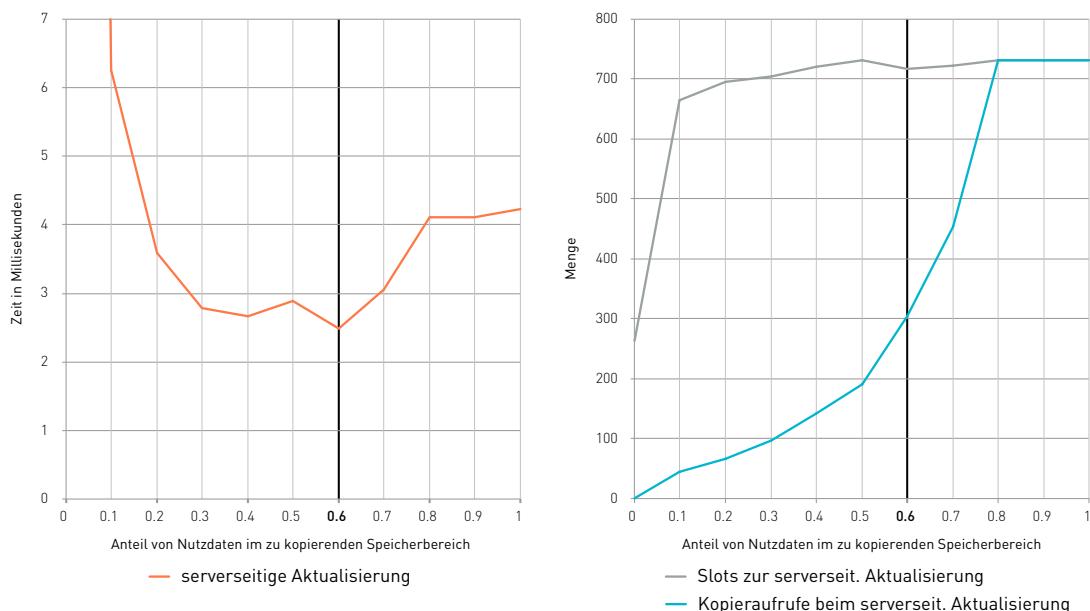


Abbildung 5.4: öfmÖAFJaÖFOJ

## Kapitel 6

# Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1 Zusammenfassung

Der Schwerpunkt der vorliegende Arbeit liegt auf...

In der vorliegende Arbeit wurde ein Out-of-Core Ansatz zur Darstellung von großen Sparse Voxel Octree Strukturen entwickelt. Diesem liegt eine Segmentierung der Octree Daten durch Aufteilung in Unterbäume gleicher Größe zugrunde. Zur Erstellung von Inhalten wurde ein generalisiertes System zur SVO Erstellung implementiert.

Die daraus entstanden Applikation kann ... , weil ... . OpenCL. Weiterin wurde ein ... .

Die Tests haben gezeigt ...

### 6.2 Ausblick