

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

FAKULTÄT INFORMATIK

INSTITUT FÜR SOFTWARE- UND MULTIMEDIATECHNIK

PROFESSUR FÜR COMPUTERGRAPHIK UND VISUALISIERUNG

PROF. DR. STEFAN GUMHOLD

## Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Informatiker

# Optimierung und Übertragung von Tiefengeometrie für Remote-Visualisierung

Josef Schulz

(Geboren am 20. Oktober 1989 in Naumburg (Saale), Mat.-Nr.: 3658867)

Betreuer: Dr. Sebastian Grottel

Dresden, 19. November 2016

---

## Aufgabenstellung

In Big-Data-Szenarien in der Visualisierung spielt der Ansatz der Remote-Visualisierung eine zunehmende Rolle. Moderne Netzwerktechnologien bieten große Datenübertragungsraten und niedrige Latenzzeiten. Für die interaktive Visualisierung sind aber selbst kleinste Latenzzeiten problematisch. Um diese vor dem Benutzer maskieren zu können, kann eine Extrapolation der Darstellung durchgeführt. Diese Berechnungen erfordern zusätzlich zum normalen Farbbild weitere Daten, beispielsweise ein Tiefenbild und die Daten der verwendeten Kameraeinstellung. Für die Darstellungsextrapolation werden Farb- und Tiefenbild zusammen interpretiert, beispielsweise als Punktwolke oder Höhenfeldgeometrie. Im Rahmen dieser Arbeit soll untersucht werden, wie die Darstellung mittels Höhenfeldgeometrie optimiert werden kann. Ansätze sind hierfür Algorithmen aus der Netzvereinfachung. Zu erwarten sind sowohl harte Kanten als auch glatte Verläufe der Tiefenwerte, welche sich in der Netzgeometrie durch adaptive Vernetzung mit reduziertem Datenaufwand darstellen lassen.

Dem Szenario der Web-basierten Remote-Visualisierung folgend soll der Web-Browser als Klient-Komponente eingesetzt werden. Die einzusetzenden Technologien sind HTML5, Javascript, WebGL und WebSockets. Entsprechende Javascript-Bibliotheken sollen genutzt werden um die Qualität und Wartbarkeit des Quellcodes zu steigern. Für die Server-Komponente darf die Technologie vom Bearbeiter frei gewählt werden.

Zu Beginn der Arbeit wird eine Literatur-Recherche zu Web-basierter Visualisierung und Remote-Visualisierung erfolgen. Schwerpunkte sind hierbei die Bild-Extrapolation, Vernetzung und Rekonstruktion auf Basis von Tiefenbildern und die Netzoptimierung und -Vereinfachung. Im Anschluss an die Literaturrecherche wird ein Konzept für die Implementierung mit dem Betreuer abgesprochen und anschließend als prototypische Software umgesetzt. Folgendes Szenario dient als Grundlage für dieses Konzept:

Als Eingabedaten stehen mehrere Datensätze aus unterschiedlichen Szenarien der wissenschaftlichen Visualisierung zur Verfügung. Für jeden Datensatz sind mehrere Tripel aus Farbbild, Tiefenbild und Kamera-Parameter gegeben. Die Serverkomponente bereitet einen Datensatz auf und bietet ihn dem Klienten an. Diese Aufbereitung ist vor allem die Generierung einer optimierten Tiefennetzgeometrie aus den Tiefenbilddaten. Der Klient fordert Farbbilder, Kameraeinstellungen und Tiefengeometrie von Tripel-Paaren an. Konzeptuell wird ein Tripel als aktueller Zustand und das zweite Tripel als Ground-Truth einer Bildextrapolation verstanden. Diese können daher auch in dieser Reihenfolge angefordert werden. Die Tripel werden zwischen

---

Klient und Server direkt per Sockets/WebSockets übertragen. Die Daten des ersten Tripels werden anschließend genutzt um dessen Farbbild in die Ansicht des zweiten Tripels extrapoliert. Hierbei werden vom zweiten Tripel nur die Kameraeinstellung genutzt. Diese Extrapolation wird Klient-seitig in WebGL implementiert damit alle Berechnungen auf der GPU ausgeführt werden. Anschließend wird das extrapolierte Bild mit dem originalen Ground-Truth-Farbbild aus dem zweiten Tripel verglichen um die Qualität der Extrapolation zu bewerten, z.B. durch SSIM.

Die umgesetzte Lösung wird ausführlich evaluiert. Zentraler Wert ist hierbei die Bildqualität nach der Extrapolation abhängig vom Winkelunterschied zwischen den Kameraeinstellungen und den Parametern der Vereinfachung der Tiefennetzgeometrie. Hierfür werden Tripel-Paare aus den Datensätzen und Variationen der Parameter der Algorithmen systematisch und automatisiert vermessen. Untersuchungen zum Laufzeitverhalten der Netzoptimierung im Server und der Bildextrapolation im Klienten sind optional durchzuführen.

---

## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tag dem Prüfungsausschuss der Fakultät Informatik eingereichte Arbeit zum Thema:

*Optimierung und Übertragung von Tiefengeometrie für Remote-Visualisierung*

vollkommen selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Dresden, den 19. November 2016

Josef Schulz

---

## **Kurzfassung**

Zusammenfassung Text Deutsch

## **Abstract**

abstract text english

# Inhaltsverzeichnis

|           |                                   |           |
|-----------|-----------------------------------|-----------|
| <b>1</b>  | <b>Einleitung</b>                 | <b>2</b>  |
| <b>2</b>  | <b>Verwandte Arbeiten</b>         | <b>4</b>  |
| <b>3</b>  | <b>Grundlagen</b>                 | <b>7</b>  |
| 3.1       | Datensätze . . . . .              | 7         |
| 3.2       | Extrapolation . . . . .           | 8         |
| 3.3       | Delaunay-Triangulierung . . . . . | 10        |
| 3.4       | PSNR . . . . .                    | 10        |
| 3.5       | SSIM . . . . .                    | 11        |
| <b>4</b>  | <b>Methodik</b>                   | <b>14</b> |
| 4.1       | Vollvernetzung . . . . .          | 14        |
| 4.2       | Delaunay-Triangulierung . . . . . | 15        |
| <b>5</b>  | <b>Implementierung</b>            | <b>20</b> |
| 5.0.1     | 16 Bit . . . . .                  | 20        |
| <b>6</b>  | <b>Ergebnisse</b>                 | <b>22</b> |
| <b>7</b>  | <b>Diskussion</b>                 | <b>24</b> |
| <b>8</b>  | <b>Zusammenfassung</b>            | <b>25</b> |
| <b>9</b>  | <b>Ausblick</b>                   | <b>26</b> |
| <b>10</b> | <b>Noch mehr Ergebnisse</b>       | <b>27</b> |
|           | <b>Literaturverzeichnis</b>       | <b>28</b> |

# 1 Einleitung

Bei der Remote-Visualisierung, wird die Bildsynthese und die eigentliche Darstellung voneinander getrennt. Der Server-Prozess erzeugt und kodiert jedes Bild zu einem kompakten Datenpaket, welches an den Klient-Prozess gesendet wird. Der Klient empfängt und dekodiert das Datenpaket und gibt das Bild auf einem Bildschirm aus.

Remote-Visualisierung, ist ein insbesondere für mobile Endgeräte interessantes Konzept, weil es die Visualisierung von komplexen Szenen auch auf Leistungsarmen Geräten ermöglicht. Neben Computerspielen, ist die wissenschaftliche Visualisierung ein wichtiges Anwendungsgebiet, da Datensätze Größenordnungen erreichen können, die den Speicher herkömmlicher Desktops, Laptops, Smartphones etc. bei weitem übersteigen. Auch wenn ausreichend Speicher zur Verfügung steht, kann die Übertragung dieser Daten viel Zeit in Anspruch nehmen.

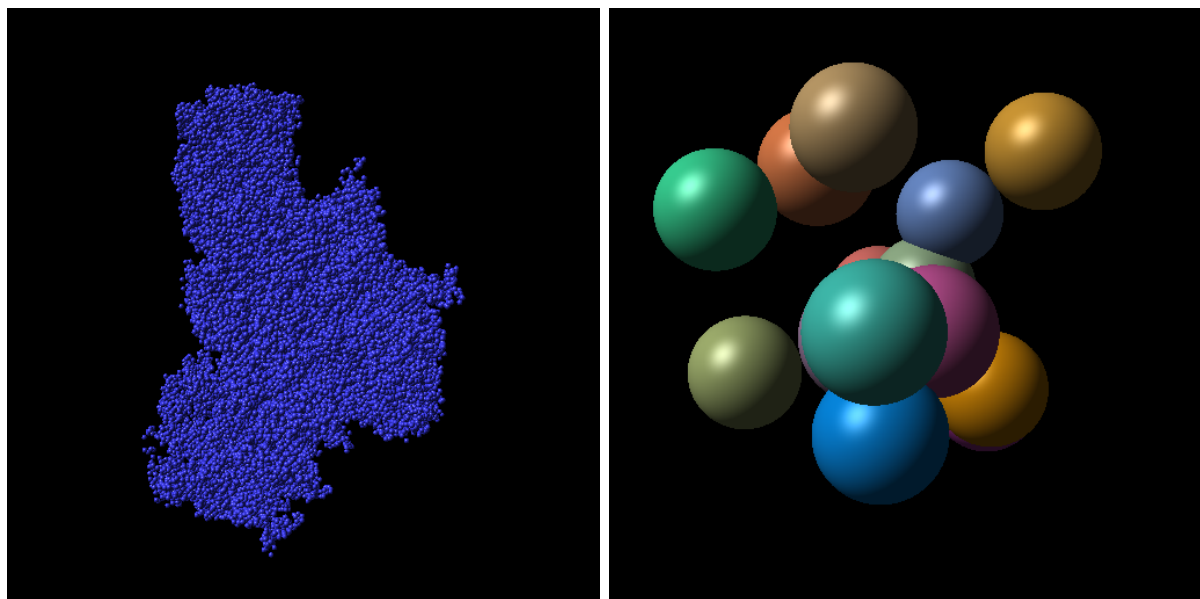
Mit Hilfe der Remote-Visualisierung ist es möglich, dass der Server die Bildsynthese übernimmt und nicht der komplette Datensatz übertragen werden muss. Ein weiterer Vorteil der mit leistungsstarken Serversystemen einhergeht ist der, dass sich komplexe Visualisierungs- und Beleuchtungsmethoden verwenden lassen, die mit normalen Endgeräten nicht zu realisieren sind.

Die Latenz bezeichnet in der Netzwerktechnik die Übertragungszeit von einem zum anderen Gerät. Diese ist in modernen Netzwerken gering, für die Interaktive Visualisierung allerdings immer noch zu groß um eine für den Menschen nicht wahrnehmbare Verzögerungszeit und damit eine interaktive Visualisierung zu gewährleisten. Ein möglicher Ausweg besteht darin, dass der Klient-Prozess ein bereits empfangenes Bild extrapoliert. Auf diese Weise, ist es möglich, dass der Klient-Prozess bereits ein neues Bild ausgeben kann, obwohl es noch nicht empfangen wurde.

Bei der Bildsynthese des Server-Prozesses entsteht neben dem Farbbild zusätzlich ein Tiefenbild. Dieses kann genutzt werden, um geometrische Informationen an den Klient-Prozess weiter zureichen. Geometrisch entspricht das Tiefenbild einer 2.5D Ansicht der Szene, in Form einer Punktwolke. Die Extrapolation eines Bildes wird durchgeführt, indem diese Informationen aus einer neuen Kameraperspektive gezeichnet wird. Um die Qualität zu verbessern und Informationen einzusparen, wird aus dem Tiefenbild ein Dreiecksnetz erzeugt. Das Farbbild wird dabei als Textur über das Netz gelegt.

Die Zentrale Aufgabe ist die Optimierung und die Übertragung der Tiefeninformationen, vom Server zum Klient. Es gibt im wesentlichen zwei Möglichkeiten diese Aufgabe zu erfüllen. Zum einen, kann das Tiefenbild direkt komprimiert werden und im Anschluss daran wird es an den Klient gesendet, welcher das Dreiecksnetz aus dem Tiefenbild erzeugt und die Extrapolation durchführt. Die zweite Möglichkeit besteht in der Konstruktion des Dreiecksnetzes durch den Server. Beide Varianten werden in dieser Arbeit untersucht und mit Ground-Truth Datensätzen, hinsichtlich ihrer Güte in Abhängigkeit des Kamerawinkels evaluiert. Die Abbildung ?? zeigt zwei Bilder aus den Datensätzen. Um die Algorithmen zu testen wurde eine Server- und eine Klient-Komponente entwickelt. Beide Komponenten tauschen Informationen über das auf TCP basierende Websocket-Protokoll aus. Der Klient ist ein Browser basierter Web-Klient, damit die implementierten Algorithmen mit den Einschränkungen durch JavaScript und WebGL evaluiert werden können.

Im Folgenden werden bereits existierender Arbeiten diskutiert.



(a) CoolRandom

(b) TestSpheres

Abbildung 1.1: Die Abbildungen a und b zeigen Bilder aus den Datensätzen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein Remote-Visualisierungssystem zu entwickeln, und eine Klient-seitige Bildextrapolation durchzuführen. Grundlage sind jeweils ein Farbbild, ein Tiefenbild und die entsprechenden Kamerainformationen.



## 2 Verwandte Arbeiten

Einen Überblick über Architekturen und Methoden der interaktiven Remote-Visualisierung geben Shu Shi *et al.* [SH15]. Zum zentralen Problem ihrer Arbeit, wird die Latenz und die effiziente Übertragung der Daten vom Server zum Klient. Lösungen hängen vom Anwendungsfall ab. In *THIN*-Systemen besteht die Aufgabe in der Übertragung von 2D Informationen, mit denen sich zum Beispiel Desktop-Anwendungen Fernsteuern lassen. Beispiele sind *SLIM* [SLN99] und *THiNC* [BKN05]. Sie sind für die Übertragung von 2D-Daten optimiert und profitieren davon, dass die meisten Änderungen nur Teilbereiche der eigentlichen Oberfläche betreffen. Ein anderes extrem der Remote-Visualisierung ist die Aufteilung der Bildsynthese, auf verschiedene Host-Systeme wie bei WireGL [HEB<sup>+</sup>01]. Jin Zhefan stellt in diesem Kontext Kompressionsmethoden für Zeicheninstruktionen, Vektoren, Normalen und Texturinformationen vor [Jin06]. Peter Eisert und Philipp Fechteler haben ein Remote-Visualisierungssystem für Computerspiele entwickelt [Eis07]. Ihr System überträgt bei kleinen Auflösungen, für Endgeräte ohne GPU die Bilder kodiert mit h264 oder wahlweise mpeg4. Bei größeren Auflösungen werden Zeicheninstruktionen gesendet und die Bilder werden vom Klienten synthetisiert. Auch wenn ihr System ausschließlich für den Einsatz in lokalen Netzwerken konzipiert wurde, ist die Latenz zu hoch um vom Benutzer nicht registriert zu werden. Mit Hilfe einer Bildextrapolation durch den Klienten kann die Latenz reduziert werden. Zu diesen Zweck schätzen Shu *et al.* in ihrer Arbeit [BG04], zusätzliche Referenz-Kamerapositionen und erzeugen zusätzlich zum Farbbild der Originalen Kameraposition weitere Tiefenbilder. Das Farbbild wird mit JPEG komprimiert und die Tiefenbilder mit ZLIB. Mit Hilfe der zusätzlichen Tiefeninformationen können durch Verdeckung bedingte Lücken bei der Extrapolation durch den Klienten geschlossen werden. Ein ähnlicher Ansatz wurde im VR-Bereich von Smit *et al.* erprobt [SLBF09]. Auch in diesem System werden Lücken mit Hilfe von Tiefenbildern aus Referenz-Kamerapositionen geschlossen. Die Wahl des Warping-Algorithmus ist entscheidend für die Performance der Klient-Komponente, neben der im VR-System zum Einsatz kommenden Variante [MMB97], bieten Mark *et al.* eine Übersicht über verschiedene mögliche Verfahren [Mar99].

Die Übertragung und Visualisierung von Tiefenbildern spielt auch in der Visualisierung von

Sensordaten eine wichtige Rolle. Debevec1998 Palomo *et al.* beschäftigen sich mit der Visualisierung von Tiefenbildern [PG10], in ihrem Fall wurden diese mit Tiefensensoren erhoben. Sie kombinieren mehrerer aus verschiedenen Blickwinkeln aufgenommenen Bilder mit Hilfe eines Tiefenpuffers zu einem Gesamtbild und vermindern auf diese Weise entstehende Artefakte im Zusammenhang von Verdeckung bei der Visualisierung der Daten aus einer anderen Perspektive.

Um die Latenz bei der Übertragung von Tiefeninformation zu verbessern, können die Daten auch progressiv zum Klient gesendet werden. Evans *et al.* haben für diesen Zweck ein Datenformat für Punktwolken entwickelt und für den Einsatz mit WebGL optimiert [EAB14].

Banno *et al.* erzeugen mit Hilfe der Delaunay-Triangulierung adaptive Dreiecksnetze aus Tiefenbildern, um die Qualität der Darstellung zu verbessern [BGTB12].

Lee *et al.*

Eine Vergleichbaren Ansatz wird von untersucht.

Wessels *et al.* stellen eine Konzeption für den Programmaufbau eines interaktiven Remote-Visualisierungssystem basierend auf dem WebSocket-Protokoll vor [WPJR11]. In ihrem System besteht der Server-Prozess aus zwei Hauptkomponenten, der Visualisierungs-Engine und dem Deamon. Während die Visualisierungs-Engine für die Bildsynthese zuständig ist, übernimmt der Deamon die Kommunikation mit dem Klient-Prozess. Der Klient schickt dabei seine Eingabeinformationen von Maus und Tastatur direkt an den Server. Dieser wertet die Daten aus und erzeugt darauf hin ein mit JPEG komprimiertes Bild, das mit Base64 kodiert wird und schließlich an den Klient-Prozess geschickt wird. Dieser kann das Bild nativ mit Hilfe eines HTML5 Canvas dekodieren und darstellen. Ihr System wird zur Grundlage dieser Arbeit.

Das erzeugte Tiefenbild lässt sich Pauly *et al.* [PGK02]

Simon Stegmaier [SME02] A Generic Solution for Hardware-Accelerated Remote Visualization

Gabriel Taubin und Jarek Rossignac haben ein Algorithmus zur Erzeugung und effizienten Kodierung von Dreiecksstreifen aus Dreiecksnetzen entwickelt [TR98]. Dazu konstruiert ihr Algorithmus Spannbäume über dem Netz, die zur Erzeugung möglichst großer Dreiecksstreifen genutzt werden. Die Kompression kann wahlweise verlustfrei oder verlustbehaftet durchgeführt werden. Typische Kompressionsraten werden mit 1:50 angegeben.

Eine weitere Arbeit die sich mit der Kompression von Dreiecksnetzen und einer kompakten Repräsentation von diesen beschäftigt wurde Stefan Gumhold und Wolfgang Straßer geschrieben [GS98]. Kompression und Dekompression sind echtzeitfähig.

Michael Deering hat ebenfalls ein Geometrisches Kompressionsverfahren entwickelt. [Dee95]

Federico Ponchio und Matteo Dellepiane [PD15] Fast decompression for web-based view-dependent 3D rendering

Diplomarbeit mädcheninformatiker Effiziente Datenübertragung von Modellen und Texturen für die Verwendung in WebGL Stefan Wagner noch kein cite

WEB-BASED VISUALISATION OF ON-SET POINT CLOUD DATA Alun Evans et al [EAB14]

planarer scheiß [MWB<sup>+</sup>13]

## 3 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Datensätze im Detail vorgestellt und es wird gezeigt, wie die Bildextrapolation anhand der zur Verfügung stehenden Informationen durchgeführt wird. Anschließend werden die zwei Metriken PSNR und SSIM zum Vergleich von Bildern vorgestellt, die für die Evaluation verwendet werden.

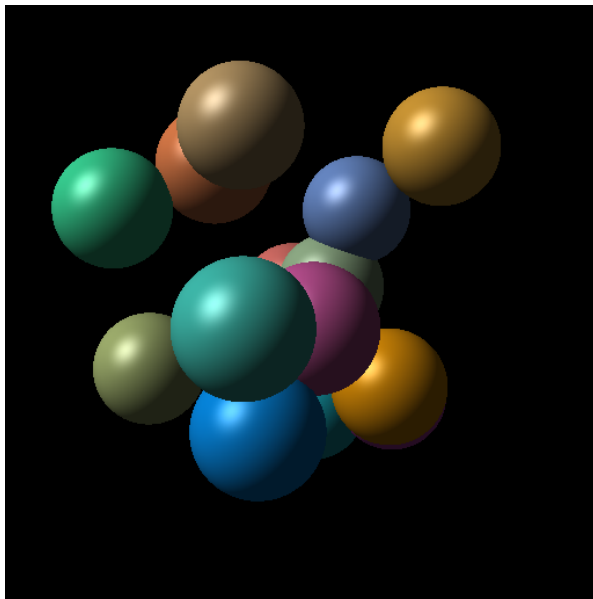
### 3.1 Datensätze

Zur Analyse der verwendeten Methoden stehen zwei Datensätze zur Verfügung. Jeder Datensatz besteht aus einer Sequenz von Tripeln. Dabei setzt sich jedes Tripel aus einem Farbbild  $I$ , einem Tiefenbild  $D$  sowie einem Satz von Kameraparametern zusammen. Die Auflösung der Farb- und Tiefenbilder beträgt für alle Datensätze  $w \times h = 512 \times 512$ . Die Tiefenbilder wurden mit 16 Bit und die Farbbilder mit 24 Bit quantisiert, dabei entfallen jeweils 8 Bit auf die einzelnen Farbkanäle. In der Abbildung 3.1 werden Farb- und Tiefenbild des ersten Tripels aus dem Datensatz *TestSpheres* dargestellt.

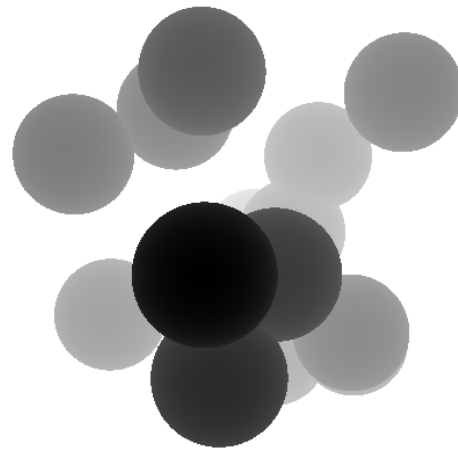
Die Kameraparameter setzen sich aus einem Vektor für die Kameraposition, einem *lookAt*-Vektor, der Punkt, auf den die Kamera schaut und dem *up*-Vektor zusammen. Für die Projektion werden die Positionen der Clippingebenen durch die Werte  $z_{near}$  und  $z_{far}$  beschrieben. Des Weiteren wird der Öffnungswinkel der Kamera benötigt.

Von beiden Szenen stehen 493 Bilder zur Verfügung. Beide Datensätze lassen sich in Abhängigkeit der Winkelschrittweite in 3 Sequenzen unterteilen. Der Winkel gibt dabei den Unterschied zwischen der Kameraposition aus dem ersten und dem gerade betrachteten Frame an. Eine Auflistung der Sequenzen zeigt die Tabelle 3.1.

Die Datensätze *CoolRandom* und *TestSpheres* wurden aus Partikeldatensätzen erzeugt. *TestSpheres* ist ein synthetisch erzeugter Datensatz, der aus wenigen Partikeln geniert wurde. Bei dem Datensatz *CoolRandom* handelt es sich dagegen um einen komplexen Datensatz, der mit Molekül-Datensätzen vergleichbar ist, welche in existierenden Anwendungen visualisiert werden.



(a)



(b)

Abbildung 3.1: Farb und Tiefenbild aus dem Datensatz *TestSpheres*

| # | Anzahl Bilder | min Winkel | max Winkel | Winkel Schritt |
|---|---------------|------------|------------|----------------|
| 1 | 241           | 0          | 5          | 0.25           |
| 2 | 60            | 6          | 10         | 1              |
| 3 | 192           | 15         | 90         | 5              |

Tabelle 3.1: Die Tabelle zeigt eine Übersicht über die Winkel der aufgenommenen Sequenzen.

## 3.2 Extrapolation

Eine einfache Möglichkeit, um die Extrapolation durchzuführen, besteht darin, das Tiefenbild als Punktwolke zu interpretieren und diese aus einer neuen Kameraperspektive zu zeichnen. Dazu wird aus jedem Pixel  $d \in D$  ein Vertex erzeugt. Mit Hilfe der Rückprojektion lassen sich die Vertices in die gewünschten Positionen transformieren.

Um das Prinzip der Rücktransformation zu erläutern, soll zunächst betrachtet werden, wie ein Vertex  $v$  aus dem Modellkoordinatensystem in normalisierte Gerätekoordinaten transformiert wird. Die Abbildung 3.2 verdeutlicht diesen Vorgang.

Der Vertex  $v = (x, y, z, 1)^T$  liegt zunächst in homogenen Modellkoordinaten vor. Mit Hilfe der Modellmatrix  $M = RT$ , die aus einer Rotations- und einer Translationsmatrix besteht, lässt sich der Vektor in das Weltkoordinatensystem überführen. Die Transformation in das Kamerakoordinatensystem wird durch die Multiplikation der Kameramatrix  $V$  mit dem Vektor  $v$

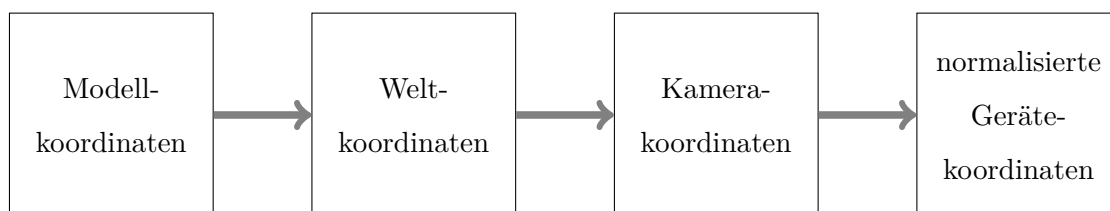


Abbildung 3.2: Die Abbildung zeigt die Teilschritte der Transformation eines Vertices aus den Modellkoordinaten in Bildschirmkoordinaten.

berechnet. Schließlich kann die Projektion aus dem Kamerakoordinatensystem in normalisierte Gerätekoordinaten mit Hilfe der Projektionsmatrix  $P$  berechnet werden. In der Gleichung 3.1 wird die Transformation von dem Vertex  $v$  aus den Modellkoordinaten in die normalisierten Gerätekoordinaten  $v'$  zusammengefasst:

$$v' = M \cdot V \cdot P \cdot v. \quad (3.1)$$

Normalisierte Gerätekoordinaten haben für die x-, y- und z-Komponente den Wertebereich von  $-1$  bis  $1$ . Diese lassen sich in Bildschirmkoordinaten umrechnen, indem die drei Komponenten in das Intervall  $[0, 1]$  übersetzt werden. Anschließend werden die x- und die y-Komponenten auf den Bildbereich gestreckt, indem sie mit  $w - 1$  und  $h - 1$  der gewünschten Auflösung  $w \times h$  multipliziert werden.

Im Folgenden wird die Menge der Tiefenbilder  $D_i$  und den dazugehörigen Transformationsmatrizen  $T_i$ , mit  $i \in \{0, 1, \dots, N\}$  betrachtet. Jede Transformationsmatrix  $T_i$  setzt sich dabei aus einer Modellmatrix  $M_i$ , einer Kameramatrix  $V_i$  und einer Projektionsmatrix  $P_i$  zusammen:

$$T_i = M_i \cdot V_i \cdot P_i. \quad (3.2)$$

Um die Punktwolke des Tiefenbildes  $D_i$  mit der Transformationsmatrix  $T_j$  auf das Tiefenbild  $D_j$  abzubilden, muss zunächst für jeden Pixel  $d_i \in D_i$  ein Vertex  $v_i$  erzeugt werden, mit  $i, j \in \{0, 1, \dots, N\}$ . Zunächst liegt  $v_i$  in Bildschirmkoordinaten des Pixels  $d_i$  vor und muss in normalisierte Gerätekoordinaten übersetzt werden. Zu diesem Zweck werden zuerst die x- und y-Komponenten durch  $w - 1$  beziehungsweise  $h - 1$  geteilt. Anschließend müssen alle drei Komponenten des Vektors  $v_i$  aus dem Wertebereich  $[0, 1]$  in das Intervall  $[-1, 1]$  transformiert werden. Jetzt liegt  $v_i$  in normalisierten Gerätekoordinaten vor. Durch die Multiplikation der inversen Transformationsmatrix  $T_i^{-1}$  mit  $v_i$ , kann der Vertex in seine Modellkoordinaten überführt und im Anschluss mit Hilfe von  $T_j$  aus einer neuen Kameraperspektive gezeichnet werden:

$$v'_i = T_j \cdot T_i^{-1} v_i. \quad (3.3)$$

Die Interpretation der Tiefenbilder als Punktwolke ist keine optimale Lösung, da bei der Bildsynthese Lücken im Bild entstehen. Eine bessere Lösung ist es, aus dem Tiefenbild ein Dreiecksnetz zu erzeugen und dieses für die Bildsynthese zu verwenden. Mit Hilfe der Delaunay-Triangulierung ist es möglich aus Tiefenbildern adaptive Dreiecksnetze zu erzeugen, welche die Lücke füllen.

### 3.3 Delaunay-Triangulierung

Die Delaunay-Triangulierung ist ein Verfahren, um ein Dreiecksnetz aus einer Menge von Punkten  $p \in \mathbb{R}^2$  zu erzeugen. Dabei wird für jedes Dreieck ein Umkreis erzeugt, innerhalb dessen keine Punkte eines anderen Dreiecks enthalten sein dürfen. Jedes Dreieck des zu erzeugenden Netzes muss diese Bedingung erfüllen. Das Resultat dieser Forderung ist die maximierte Innenwinkelsumme aller Dreiecke. Für eine gegebene Punktmenge ist die Lösung nicht eindeutig, es kann verschiedene Netzkonfigurationen geben, welche die Forderung erfüllen.

Es existieren verschiedene Algorithmen die Delaunay-Triangulierung durchzuführen. Die besten erreichen eine Laufzeit von  $O(n \log n)$  und sind damit für den Einsatz in Echtzeitanwendungen tauglich. Beispiele sind der Sweep-Algorithmus und die inkrementelle Konstruktion.

### 3.4 PSNR

Die Abkürzung PSNR in Englisch *Peak signal-to-noise ratio*, gibt das Verhältnis zwischen dem *Peak signal-to-noise ratio*, kurz PSNR, gibt das Verhältnis zwischen dem Maximalwert und der maximalen Störung an. Da die meisten Signale sehr große Skalen haben, wird der PSNR häufig mittels einer logarithmischen Skala angegeben.

Der PSNR wird zur Messung der Qualität von nicht verlustfreien Kompressionsalgorithmen verwendet. Dazu wird das Originalbild als Signal interpretiert und der Fehler, der durch die Kompression eingeführt wird als Rauschen. Ein größerer PSNR-Wert bedeutet eine besser Qualität des dekomprimierten Bildes.

Bei einer Farbtiefe von 8 Bit pro Kanal, stehen Werte von 30 - 40 dB für ein geringes Störsignal.

Der *mean squared error*, kurz *MSE* summiert einem Fenster der Größe  $m \times n$  die quadratischen Abstände zwischen dem Original und dem rekonstruierten Bild auf.

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2 \quad (3.4)$$

Beim PSNR wird der maximal mögliche Wert  $MAX_I$  mit dem  $MSE$  ins Verhältnis gesetzt:

$$PSNR = 10 \times \log_{10} \left( \frac{MAX_I^2}{MSE} \right) \quad (3.5)$$

$$= 20 \times \log_{10} \left( \frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (3.6)$$

$$= 20 \times \log_{10}(MAX_I) - 10 \times \log_{10}(MSE) \quad (3.7)$$

### 3.5 SSIM

Eine weitere Metrik, die zum Vergleich von Bildern eingesetzt wird, wurde von Wang *et al.* entwickelt [WBSS04]. Diese basiert auf der Idee, dass die Struktur der abgebildeten Objekte von Beleuchtung und Kontrast unabhängig ist.

Beleuchtung und Kontrast können im gesamten Bild variieren, aus diesem Grund werden beide Parameter lokal in einem Fenster bestimmt.

In ihrem System wird die Aufgabe, die Ähnlichkeit zu messen, in drei Teile unterteilt: Beleuchtung, Kontrast und Struktur. Als Erstes wird die Beleuchtung bestimmt. Wenn die Signale, wie in diesem Fall diskret sind, lässt sich die mittlere Intensität, des Signals  $x$  mit dem Term

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.8)$$

berechnen. Die Vergleichsfunktion für die Beleuchtung zwischen zwei Signalen  $x$  und  $y$  wird  $l(x, y)$  und setzt die Werte  $\mu_x$  und  $\mu_y$  wie folgt ins Verhältnis:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}. \quad (3.9)$$

Als Nächstes wird die mittlere Intensität von den Signalen  $x$  und  $y$  abgezogen, so dass  $x' = x - \mu_x$  und  $y' = y - \mu_y$  entstehen.

Der Kontrast des Signals  $x$  wird mit Hilfe der Standardabweichung  $\sigma_x$  approximiert. In diskreter Form lässt sich diese mit der folgenden Formel berechnen:



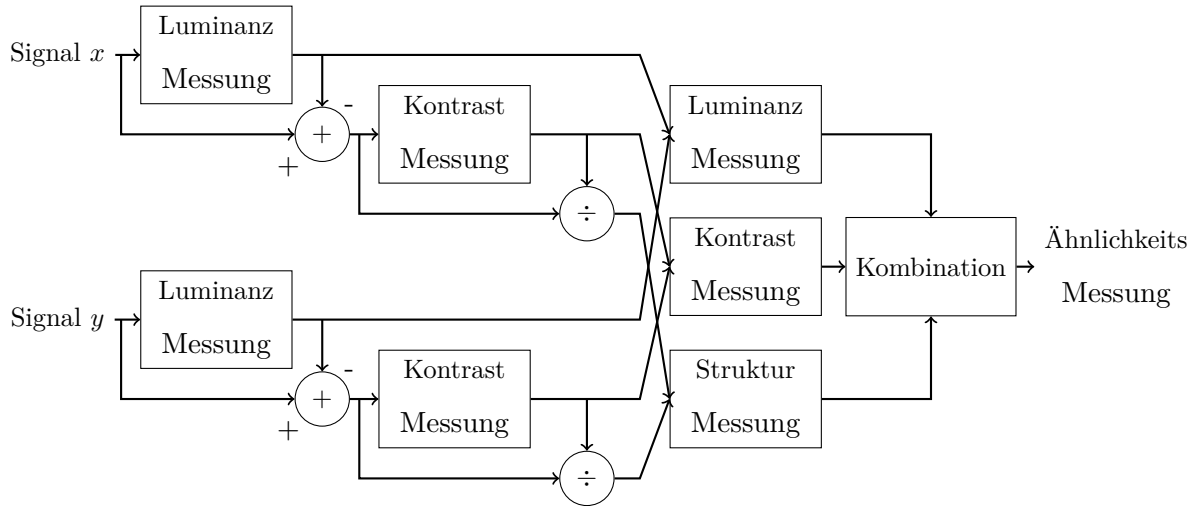


Abbildung 3.3: Das Modell zeigt das Vorgehen von dem SSIM-Algorithmus

$$\sigma_x = \left( \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.10)$$

Die Vergleichsfunktion für den Kontrast wird mit  $c(x, y)$  bezeichnet und definiert sich wie folgt:

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}. \quad (3.11)$$

An dieser Stelle wird das Signal normalisiert, indem es durch seine eigene Standardabweichung geteilt wird, so dass die Signale  $x'' = x' - \mu_{x'}/\sigma_{x'}$  und  $y'' = y' - \mu_{y'}/\sigma_{y'}$  entstehen. Der Vergleich der strukturellen Eigenschaften  $s(x, y)$  wird mit den normalisierten Signalen  $x''$  und  $y''$  durchgeführt. Für den Vergleich der Struktur sollen folgende Eigenschaften gelten:

Erstens, die Funktion  $s(x, y)$  muss Symmetrisch sein  $s(x, y) = s(y, x)$ .

Zweitens soll die Funktion auf einen Wert kleiner oder gleich 1 beschränkt werden  $s(x, y) \leq 1$ .

Drittens es soll nur ein Maximum  $s(x, y) = 1$ , genau dann und nur dann, wenn gilt das  $x = y$ .

Eine Definition, die diese Forderungen erfüllt ist:

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x + \sigma_y + C_3}. \quad (3.12)$$

Die Kovarianz  $\sigma_{xy}$  berechnet sich folgendermaßen:

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y). \quad (3.13)$$

Sie korreliert mit dem Kosinus des Winkels zwischen den beiden Vektoren  $x - \mu_x$  und  $y - \mu_y$ . Die Konstanten  $C_1, C_2$  und  $C_3$  in den drei Vergleichsfunktionen sorgen dafür, dass eine Division durch 0 nicht möglich wird, sollten die Werte in den Nennern zu klein werden. Letztlich kann die Gesamtqualität gemessen werden, indem Beleuchtung, Kontrast und Strukturvergleich kombiniert werden:

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha \times [c(x, y)]^\beta \times [s(x, y)]^\gamma. \quad (3.14)$$

Mit den Parametern  $\alpha > 0, \beta > 0, \gamma > 0$ , kann die Gewichtung zwischen den Vergleichsfunktionen variiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit gilt  $\alpha = \beta = \gamma = 1$  und es gilt für die Konstanten:  $C_3 = C_2/2$ , mit  $C_1 = 6.5025$  und  $C_2 = 58.5225$ . Der  $SSIM$  wird lokal berechnet, in Fenstern der Größe  $11 \times 11$ , dabei werden die Signalwerte  $x_i$  und  $y_i$  mit einer Gaussianfunktion gewichtet. Damit lassen sich die mittlere Intensität, die Standardabweichung und die Kovarianz zu folgenden Gleichungen umschreiben, wobei  $w_i$  die Gewichtung an dem Punkt  $i$  bezeichnet:

$$\mu_x = \sum_{i=1}^N w_i x_i \quad (3.15)$$

$$\sigma_x = \left( \sum_{i=1}^N w_i (x_i - \mu_x)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

$$\sigma_{xy} = \sum_{i=1}^N w_i (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y). \quad (3.17)$$

Die Gesamtgleichung für den  $SSIM(x, y)$  lässt sich durch die Gleichung

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (3.18)$$

ausrechnen. Der  $SSIM(x, y)$  misst die Güte jedoch nur lokal, um eine Aussage über das gesamte Bild treffen zu können, kann der Mittelwert über allen  $x \in X$  und  $y \in Y$  berechnet werden:

$$MSSIM(X, Y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M SSIM(x_j, y_j). \quad (3.19)$$

## 4 Methodik

In dieser Arbeit werden zwei grundsätzliche Verfahren untersucht, um die Tiefeninformationen zu übertragen und als Dreiecksnetz darzustellen. Der erste Ansatz besteht darin, das Tiefenbild als solches zu komprimieren und zu übertragen. Der Klient empfängt und dekodiert das Tiefenbild und erzeugt daraus ein voll vernetztes Dreiecksnetz. Im zweiten Ansatz wird aus dem Tiefenbild ein adaptives Dreiecksnetz mit Hilfe der Delaunay-Triangulierung vom Server konstruiert und an den Klienten übertragen.

Die Erzeugung von adaptiven Dreiecksnetzen lässt sich als eine Form der geometrischen Kompression bezeichnen. Um die Anzahl der zu übertragenden Informationen weiter zu reduzieren, kann das erzeugte Dreiecksnetz in Dreiecksstreifen zerlegt werden und sehr kompakt dargestellt werden. Durch Valenz-basierte Kodierung kann die Informationsmenge noch weiter reduziert werden.

TODO: nicht ganz klar was bessere kompressionsraten erreicht, werden beide Varianten untersucht. Klares Problem, der Rechenaufwand der Vollvernetzung steigt der Auflösung deutlich an

### 4.1 Vollvernetzung

Bei der Vollvernetzung wird für jeden Pixel  $d$  aus dem Tiefenbild  $D$  ein Vertex  $v$  erzeugt. Die entstandenen Vertices werden über Kanten zu Dreiecken miteinander verbunden. Die Abbildung 4.1 zeigt drei unterschiedliche Varianten, wie sich die Vertices zu voll vernetzten Dreiecksnetzen verbinden lassen. Alle drei Varianten wurden implementiert, weisen bei entsprechend großen Auflösungen jedoch keine Unterschiede hinsichtlich der Qualität der Darstellung auf.

Die Anzahl der Vertices entspricht der Anzahl der Bildpunkte. Die x- und y-Komponenten lassen sich aus der bekannten Auflösung vorausberechnen und müssen im Falle einer Auflösungsänderung neu bestimmt werden. Für jeden Vertex wird die z-Komponente mit Hilfe der Pixelwerte aus dem Tiefenbild während der Bildsynthese gesetzt. Die Anzahl der Dreiecke lässt sich dabei wie folgt berechnen:  $2(w - 1)(h - 1)$ .

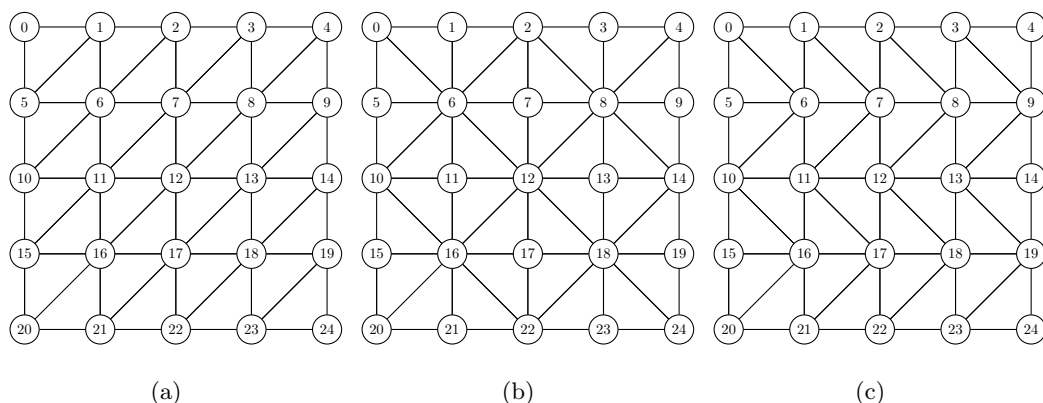


Abbildung 4.1: Darstellung von drei verschiedene Varianten der Vollvernetzung.

Problematisch bei diesem Verfahren ist, dass die Anzahl der Dreiecke von der Auflösung abhängt und der Rechenaufwand der klientseitigen Bildsynthese linear mit der Auflösung steigt.

## 4.2 Delaunay-Triangulierung

Die zweite Variante die in dieser Arbeit untersucht wird, ist die eine adaptive Vernetzung des Tiefenbildes. Diese wird vom Server durchgeführt und das erzeugte Dreiecksnetz wird anschließend als solches zum Klient gesendet. Das Verfahren lässt sich in drei Teile unterteilen. Zuerst muss aus dem Tiefenbild  $D$  eine Menge von Punkten  $P \subset D$  definiert werden. Anschließend werden die Punkte  $p \in P$  zu Dreiecken verbunden. Im letzten Schritt kann das entstandene Netz weiter optimiert werden.

Entscheidend für das Ergebnisnetz ist die Wahl der Punkte  $P$  im ersten Schritt. Sie müssen so gewählt werden, dass die Werteverläufe der Tiefenwerte möglichst optimal wiedergegeben werden. Das bedeutet, dass insbesondere im Bereich von Kanten Punkte gesetzt werden müssen, aber auch dort, wo Flächen nicht planar sind, damit die Oberflächenverläufe erhalten bleiben. Um diese Aufgaben zu lösen, wurden die beiden Verfahren von Banno *et al.* [BGTB12] und Lee *et al.* [LYW00] implementiert.

### 4.2.0.1 Besondere Punkte

Um die Menge  $P$  zu erzeugen, werden die Gradienten des Tiefenbildes  $\nabla_x$  und  $\nabla_y$  mit Hilfe des Sobel-Operators berechnet. Dieser berechnet die erste Ableitung und glättet gleichzeitig dazu die orthogonale Richtung. Mit Hilfe einer Faltungsmatrix der Größe  $3 \times 3$  können die Gradienten berechnet werden:

$$\nabla_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * D \quad (4.1)$$

$$\nabla_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * D. \quad (4.2)$$

Die Punktemenge  $P$  wird mit Hilfe einer Quaternärbaum-Datenstruktur erzeugt. Ein Quaternärbaum unterteilt das Tiefenbild sukzessiv in vier rechteckige Regionen. Die maximale Tiefe des Quaternärbaums ist invers proportional zur Breite der Blattregionen. Mit diesem Parameter kann die Qualität und die Kompression des erzeugten Netzes, sowie der Berechnungsaufwand skaliert werden.

Jeder Knoten des Baums entspricht einer rechteckigen Region  $R$  des Tiefenbildes, welche mit Hilfe der Sobel-Gradienten auf planarität getestet wird. Wenn die Region  $R$  nicht planar ist, dann werden die Eckpunkte von  $R$  zur Menge  $P$  hinzugefügt. Wenn die Gradienten in einer Region  $R$  nahezu gleich sind, dann wird diese Region  $R$  als planar bezeichnet. Ob eine Region  $R$  als planar bezeichnet werden kann, lässt sich mit Hilfe der Differenz, zwischen dem maximalen und dem minimalen Gradienten von  $R$  bestimmen:

$$c_x = \max_R \nabla_x - \min_R \nabla_x = \nabla_{H_x} - \nabla_{L_x} \quad (4.3)$$

$$c_y = \max_R \nabla_y - \min_R \nabla_y = \nabla_{H_y} - \nabla_{L_y}. \quad (4.4)$$

Wenn entweder  $c_x$  oder  $c_y$  größer als ein Schwellwert  $T_{planar}$  ist, dann ist die Region  $R$  nicht planar und die Eckpunkte werden der Menge  $P$  hinzugefügt.

Der Baum wird beginnend mit dem Blattknoten zum Wurzelknoten traversiert. Die Werte für  $c_x$  und  $c_y$  der inneren Knoten lassen sich effizient mit Hilfe von  $\nabla_H$  und  $\nabla_L$  der vier Kindknoten berechnen.

Der Schwellwert  $T_{planar}$  ist entscheidend für die Anzahl der eingefügten Punkte in  $P$ . Der Wert von  $T_{planar}$  kann adaptiv gewählt werden, um die Komplexität des Dreiecksnetzes anzupassen. Für den eigentlichen Planaritäts-Test unterscheidet sich der Schwellwert für Blatt oder innere Knoten in  $T_{leaf}$  und  $T_{inner}$ . Die Idee dahinter ist, dass Blattknoten vorrangig Tiefenuntersprünge detektieren sollen bzw. die Kontur, während die inneren Knoten nicht-planare Oberflächen

repräsentieren. Weil Tiefensprünge größere Gradienten bedeuten als nicht-planare Oberflächen, sollte  $T_{internal}$  kleiner  $T_{leaf}$  als gewählt werden.

Durch das Traversieren des Quadtree lässt sich die Menge  $P$  bestimmen und das Dreiecksnetz kann mit Hilfe der Delaunay-Triangulierung vernetzt werden.

Ähnlich zur Vollvernetzung kann die Datenstruktur des Quadtree im vorausberechnet werden und wird nur im Falle einer Auflösungsänderung oder einer Änderung des maximalen Tiefenwertes des Quadtree neu berechnet.

#### 4.2.0.2 Optimierung des Netzes

Das auf diese Weise entstandene Netz enthält zwei Arten von Artefakten. Zum einen können Dreiecke falsche Tiefenregionen approximieren, weil nur die Eckpunkte der jeweiligen Regionen  $R$  zur Konstruktion der Dreiecke genutzt werden. Zum anderen können Dreiecke über Tiefensprüngen liegen und dadurch werden Kanten nicht korrekt vom Netz abgebildet. Um die Artefakte zu reduzieren, werden nicht valide Dreiecke nochmals unterteilt oder verworfen. Die Validität eines Dreiecks wird anhand seiner Kanten bestimmt. Eine Kante wird als nicht valide Kante bezeichnet, wenn die Tiefenwerte einiger von ihr überspannten Pixel abweicht, oder die 3D Richtung der Kante sich dem Lot der Bildebene nähert.

Die Eckpunkte der zu prüfenden Kante, werden im folgenden mit  $p_1$  und  $p_2$  bezeichnet. Der Punkt  $p_m$  bezeichnet die Seitenhalbierende, den Median der Kante  $p_1p_2$ . Ein entscheidender Punkt, ist der dass alle Streckenlängen mit Texturkoordinaten berechnet werden, damit die Gleichungen unabhängig von der eigentlichen Auflösung sind.

In der Gleichung 4.5 approximiert der erste Term das Verhältnis, zwischen dem Betrag des Tiefenunterschieds von  $p_1$  und  $p_2$  zu der Länge der Kante projiziert auf die  $xy$ -Ebene.

$$\frac{|d(p_1) - d(p_2)|}{\|p_1 - p_2\| (d(p_1) + d(p_2))} < T_{angle} \quad (4.5)$$

Ist der Wert des ersten Terms der Gleichung 4.5 einer Kante größer als der Schwellwert  $T_{angle}$ , dann steht diese Kante nahezu senkrecht auf der Bildebene und sie liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit über einem Tiefensprung. Eine Kante auf die das zutrifft wird als nicht valide bezeichnet. Enthält ein Dreieck mindestens zwei Kanten die valide sind, wird es direkt zum endgültigen Dreiecksnetz hinzugefügt. Wenn ein Dreieck dagegen mehr als zwei nicht valide Kanten enthält, wird es weiter unterteilt.

Zwei Bildpunkte  $p_1$  und  $p_2$  werden als verbindbar bezeichnet, wenn alle Bildpunkte zwischen  $p_1$  und  $p_2$  valide Tiefenwerte besitzen und ihre Tiefe sich zum größten Teil linear ändert. Um Rechenzeit zu sparen wird empfohlen nur den Median  $p_m$  zwischen  $p_1$  und  $p_2$  zu testen. Eine Strecke wird als Verbindbar bezeichnet, wenn sie die folgende Gleichung erfüllt:

$$| (d(p_2) - d(p_m)) - (d(p_m) - d(p_1)) | < T_{join} \quad (4.6)$$

.

Um ein Dreieck zu unterteilen muss eine Fallunterscheidung durchgeführt werden. Hat das Dreieck nur eine valide Kante  $p_1p_2$ , dann müssen die anderen beiden Kanten wie in der Abbildung 4.2 geteilt werden und es entstehen aus dem ursprünglichen Dreieck drei neue Dreiecke.

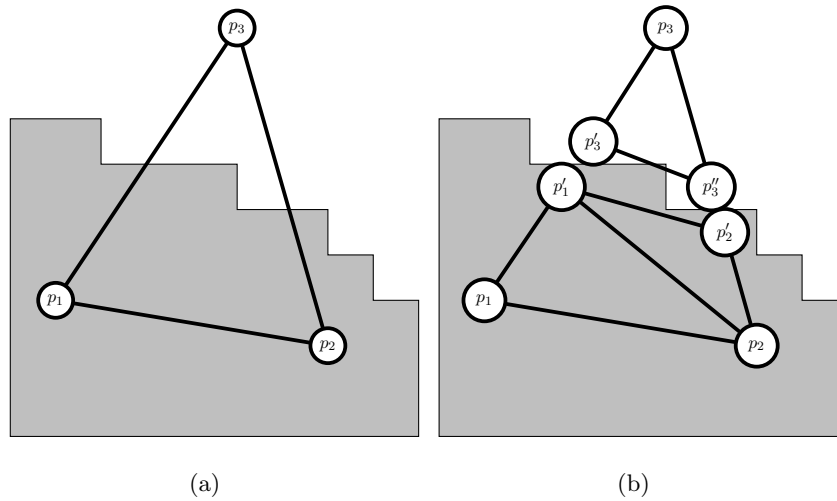


Abbildung 4.2: Die Bilder a und b zeigen die Unterteilung des Dreiecks  $p_1p_2p_3$ , wenn die zwei Kanten  $p_1p_3$ ,  $p_2p_3$  nicht valide sind.

Dazu werden vier neue Vertices iterativ entlang der alten Strecken eingefügt:

Der Vertex  $p'_1$  ist der von Punkt auf der Strecke  $p_3p_1$ , der am weitesten von  $p_1$  entfernt liegt und mit dem Punkten  $p_1$  und  $p'_2$  verbindbar ist.

Der Vertex  $p'_2$  ist der von Punkt auf der Strecke  $p_3p_2$ , der am weitesten von  $p_2$  entfernt liegt und mit dem Punkten  $p_2$  und  $p'_1$  verbindbar ist.

Der Vertex  $p'_3$  ist der von Punkt auf der Strecke  $p_3p_1$ , der am weitesten von  $p_3$  entfernt liegt und mit dem Punkt  $p_3$  verbindbar ist.

Der Vertex  $p''_3$  ist der von Punkt auf der Strecke  $p_3p_2$ , der am weitesten von  $p_3$  entfernt liegt und mit dem Punkt  $p_3$  verbindbar ist.

Anschließend wird das Dreieck  $p_3p'_3p''_3$  zum endgültigen Dreiecksnetz hinzugefügt. Um die anderen beiden Dreiecke einzufügen muss eine weitere Fallunterscheidung durchgeführt werden. Wenn die Strecke  $p_1p'_2$  kleiner ist als  $p_2p'_1$ , dann werden die Dreiecke  $p_1p_2p'_2$ ,  $p_1p'_2p'_1$  zu dem finalen Netz hinzugefügt, andernfalls die beiden Dreiecke  $p_1p_2p'_1$  und  $p_2p'_2p'_1$ .

In dem Fall, dass alle drei Kanten nicht valide sind, werden sechs neue Vertices eingefügt, die Abbildung 4.3 verdeutlicht diesen Fall. Die Berechnung aller Vertices geschieht analog zu dem Vertex  $p'_3$  aus der vorhergehenden Betrachtung mit einer validen Kante.

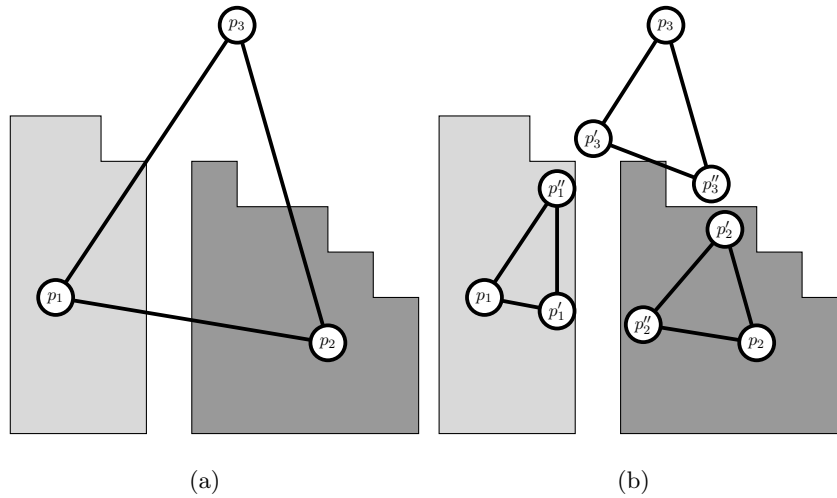


Abbildung 4.3: Die Bilder a und b zeigen die Unterteilung des Dreiecks  $p_1p_2p_3$ , wenn keine Kante valide ist.

Zu beachten ist, dass jedes neu erzeugte Dreieck auf Kollinearität zu überprüfen und gegebenenfalls zu verwerfen.



## 5 Implementierung

Die Klient-Anwendung ist eine Browser basierte Web-Anwendung, die mit dem Server über das WebSocket-Protokoll kommuniziert. Dabei handelt es sich um ein auf TCP basierendes Netzwerkprotokoll, das eine Bidirektionale Verbindung zwischen den Verbindungsteilnehmern erlaubt. Die Extrapolation der Bilddaten wird mit Hilfe von WebGL durchgeführt wird. Bei WebGL handelt es sich um eine Bibliothek die von modernen Browsern zur Verfügung gestellt wird, um eine Hardware beschleunigte Bildsynthese zu ermöglichen. Der Vorteil dieser Technologie ist die Unabhängigkeit der Anwendung im Bezug, zur Plattform und dem Gerät, in Kombination mit einer hohen Rechengeschwindigkeit.

Beide Komponenten tauschen Informationen mit Hilfe des kompakten vom Menschen lesbaren Java

### 5.0.1 16 Bit

Farb- und Tiefenbild werden mit base64 kodiert übertragen und lassen sich vom Browser nativ dekodieren. Die Farbtiefe pro Kanal ist Browserseitig auf 8 Bit beschränkt. Um 16 Bit Tiefeninformationen im Vertex-Shader nutzen zu können, müssen diese 16 Bit auf zwei 8 Bit Kanäle aufgeteilt werden. Die Abbildung 5.1 verdeutlicht dieses Verfahren. In den roten-Farbkanal werden die ersten 8 Bit und in den grünen-Farbkanal die restlichen 8 Bit aufgeteilt. Die Aufteilung der 16 Bit auf die Farbkanäle erfolgt Server-seitig.

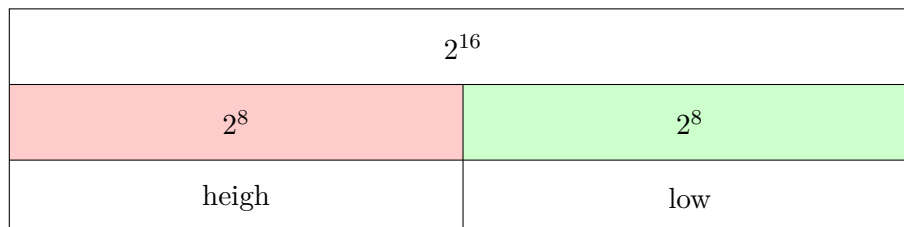


Abbildung 5.1: Hier wird die Aufteilung einer 16 Bit Zahl auf die Farbkanäle, links rot und rechts grün, visuell verdeutlicht. Das Schlüsselwort *heigh* bezeichnet die ersten 8 Bit und *low* die zweiten 8 Bit.

Um aus *heigh* und *low* die 16 Bit *v* zu berechnen, genügt es den Wert von *heigh* zuerst mit 255 zu multiplizieren und dann den Wert von *low* zu addieren. Die Gleichung 5.1 zeigt genau diesen Zusammenhang:

$$v = low + heigh \times 255. \quad (5.1)$$

Beim Laden einer Textur auf die Grafikkarte, werden alle Farbkanäle normiert, im Fall eines 8 Bit Bildes, wird jeder Wert durch den Maximalwert 255 geteilt, so dass der Wert im Intervall von  $[0, 1]$  liegt.

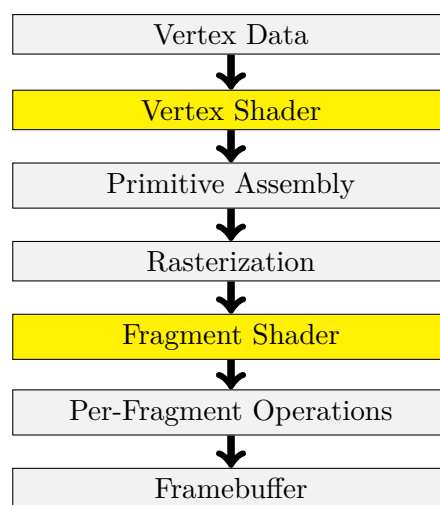
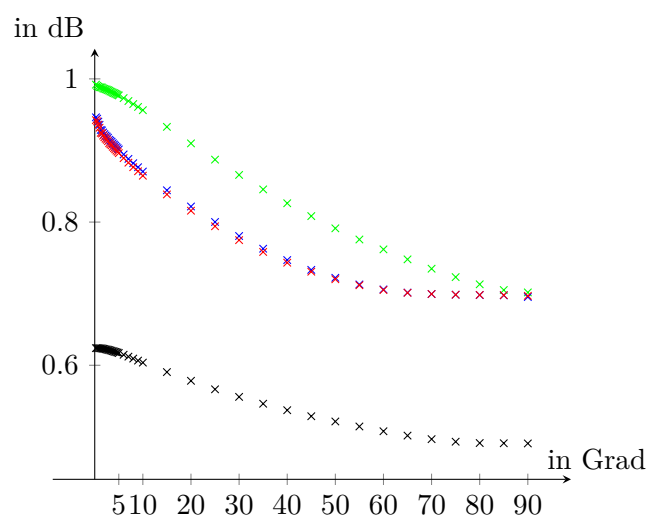
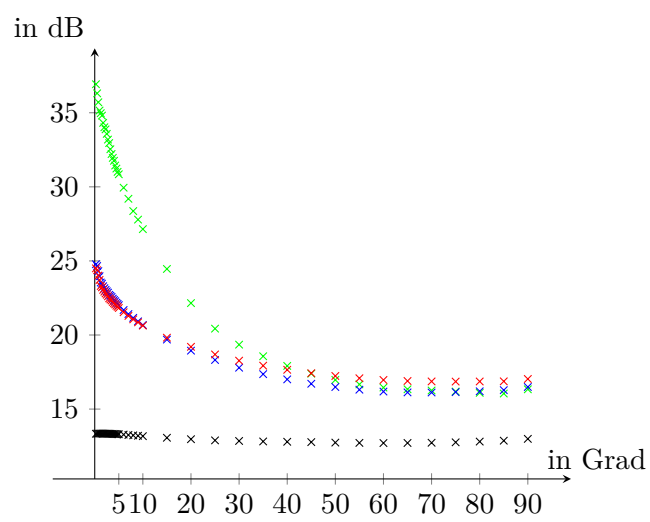


Abbildung 5.2: OpenGL ES 2.0 Darstellungspipeline. Grau unterlegt sind statischen und gelb die programmierbaren Elemente.

## 6 Ergebnisse





## 7 Diskussion

## **8 Zusammenfassung**

## **9 Ausblick**

## 10 Noch mehr Ergebnisse

□



## Literaturverzeichnis

- [Azu97] AZUMA, Ronald. *A Survey of Augmented Reality*. 1997
- [BG04] BAO, P. ; GOURLAY, D.: Remote walkthrough over mobile networks using 3-D image warping and streaming. In: *IEE Proceedings - Vision, Image and Signal Processing* 151 (2004), Aug, Nr. 4, S. 329–336. – ISSN 1350–245X
- [BGTB12] BANNÒ, Filippo ; GASPARELLO, Paolo S. ; TECCHIA, Franco ; BERGAMASCO, Massimo: Real-time Compression of Depth Streams Through Meshification and Valence-based Encoding. In: *Proceedings of the 11th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*. New York, NY, USA : ACM, 2012 (VRCAI '12). – ISBN 978–1–4503–1825–9, S. 263–270
- [BKN05] BARATTO, Ricardo A. ; KIM, Leonard N. ; NIEH, Jason: THINC: A Virtual Display Architecture for Thin-client Computing. In: *SIGOPS Oper. Syst. Rev.* 39 (2005), Oktober, Nr. 5, S. 277–290. – ISSN 0163–5980
- [CSS02] CHAI, Bing-Bing ; SETHURAMAN, S. ; SAWHNEY, H. S.: A depth map representation for real-time transmission and view-based rendering of a dynamic 3D scene. In: *3D Data Processing Visualization and Transmission, 2002. Proceedings. First International Symposium on*, 2002, S. 107–114
- [Dee95] DEERING, Michael: Geometry Compression. In: *Proceedings of the 22Nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA : ACM, 1995 (SIGGRAPH '95). – ISBN 0–89791–701–4, S. 13–20
- [DYB98] DEBEVEC, Paul ; YU, Yizhou ; BORSHUKOV, George: *Efficient View-Dependent Image-Based Rendering with Projective Texture-Mapping*. Vienna : Springer Vienna, 1998, S. 105–116. – ISBN 978–3–7091–6453–2
- [EAB14] EVANS, Alun ; AGENJO, Javi ; BLAT, Josep: Web-based Visualisation of On-set Point Cloud Data. In: *Proceedings of the 11th European Conference on Visual Media Production*. New York, NY, USA : ACM, 2014 (CVMP '14). – ISBN 978–1–4503–3185–2, S. 10:1–10:8

- [Eis07] EISERT, Peter: Remote rendering of computer games. In: *in Proc. International Conference on Signal Processing and Multimedia Applications (SIGMAP, 2007*
- [GS98] GUMHOLD, Stefan ; STRASSER, Wolfgang: Real Time Compression of Triangle Mesh Connectivity. In: *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA : ACM, 1998 (SIGGRAPH '98). – ISBN 0-89791-999-8, S. 133–140
- [HEB<sup>+</sup>01] HUMPHREYS, Greg ; ELDRIDGE, Matthew ; BUCK, Ian ; STOLL, Gordan ; EVERETT, Matthew ; HANRAHAN, Pat: WireGL: A Scalable Graphics System for Clusters. In: *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA : ACM, 2001 (SIGGRAPH '01). – ISBN 1-58113-374-X, S. 129–140
- [Jin06] JIN, Zhefan: Research on Rendering Instruction Stream Compression in Distributed VR Continuum. In: *Proceedings of the 2006 ACM International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications*. New York, NY, USA : ACM, 2006 (VRCIA '06). – ISBN 1-59593-324-7, S. 13–18
- [kho] KHONOS. *WebGL - OpenGL ES 2.0 for the Web*
- [Lev95] LEVOY, Marc: Polygon-assisted JPEG and MPEG Compression of Synthetic Images. In: *Proceedings of the 22Nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA : ACM, 1995 (SIGGRAPH '95). – ISBN 0-89791-701-4, S. 21–28
- [LYW00] LEE, J. ; YANG, Y. ; WERNICK, M. N.: A new approach for image-content adaptive mesh generation. In: *Image Processing, 2000. Proceedings. 2000 International Conference on* Bd. 1, 2000. – ISSN 1522-4880, S. 256–259 vol.1
- [Mar99] MARK, William R. *Post-Rendering 3D Image Warping: Visibility, Reconstruction, and Performance for Depth-Image Warping*. 1999
- [MKB<sup>+</sup>15] MWALONGO, Finian ; KRONE, Michael ; BECHER, Michael ; REINA, Guido ; ERTL, Thomas: Remote Visualization of Dynamic Molecular Data Using WebGL. In: *Proceedings of the 20th International Conference on 3D Web Technology*. New York, NY, USA : ACM, 2015 (Web3D '15). – ISBN 978-1-4503-3647-5, S. 115–122
- [MMB97] MARK, William R. ; MCMILLAN, Leonard ; BISHOP, Gary: Post-rendering 3D Warping. In: *Proceedings of the 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics*. New York, NY, USA : ACM, 1997 (I3D '97). – ISBN 0-89791-884-3, S. 7–ff.

- [MWB<sup>+</sup>13] MA, L. ; WHELAN, T. ; BONDAREV, E. ; DE WITH, P.H.N ; McDONALD, J.: Planar Simplification and Texturing of Dense Point Cloud Maps. In: *European Conference on Mobile Robotics (ECMR)*. Barcelona, Spain, September 2013. – Accepted. To appear.
- [PD15] PONCHIO, Federico ; DELLEPIANE, Matteo: Fast Decompression for Web-based View-dependent 3D Rendering. In: *Proceedings of the 20th International Conference on 3D Web Technology*. New York, NY, USA : ACM, 2015 (Web3D '15). – ISBN 978-1-4503-3647-5, S. 199–207
- [PG10] PALOMO, Cesar ; GATTASS, Marcelo: An Efficient Algorithm for Depth Image Rendering. In: *Proceedings of the 9th ACM SIGGRAPH Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*. New York, NY, USA : ACM, 2010 (VRCAI '10). – ISBN 978-1-4503-0459-7, S. 271–276
- [PGK02] PAULY, Mark ; GROSS, Markus ; KOBELT, Leif P.: Efficient Simplification of Point-sampled Surfaces. In: *Proceedings of the Conference on Visualization '02*. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2002 (VIS '02). – ISBN 0-7803-7498-3, S. 163–170
- [SH15] SHI, Shu ; HSU, Cheng-Hsin: A Survey of Interactive Remote Rendering Systems. In: *ACM Comput. Surv.* 47 (2015), Mai, Nr. 4, S. 57:1–57:29. – ISSN 0360-0300
- [SLBF09] SMIT, F. ; VAN LIERE, R. ; BECK, S. ; FROELICH, B.: An Image-Warping Architecture for VR: Low Latency versus Image Quality. In: *2009 IEEE Virtual Reality Conference*, 2009. – ISSN 1087-8270, S. 27–34
- [SLN99] SCHMIDT, Brian K. ; LAM, Monica S. ; NORTHCUTT, J. D.: The Interactive Performance of SLIM: A Stateless, Thin-client Architecture. In: *SIGOPS Oper. Syst. Rev.* 33 (1999), Dezember, Nr. 5, S. 32–47. – ISSN 0163-5980
- [SME02] STEGMAIER, Simon ; MAGALLÓN, Marcelo ; ERTL, Thomas: A generic solution for hardware-accelerated remote visualization. In: *In VISSYM '02: Proc. Symposium on Data Visualisation 2002*, 2002, S. 87
- [SNC12] SHI, Shu ; NAHRSTEDT, Klara ; CAMPBELL, Roy: A Real-time Remote Rendering System for Interactive Mobile Graphics. In: *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.* 8 (2012), Oktober, Nr. 3s, S. 46:1–46:20. – ISSN 1551-6857
- [TR98] TAUBIN, Gabriel ; ROSSIGNAC, Jarek: Geometric Compression Through Topological Surgery. In: *ACM Trans. Graph.* 17 (1998), April, Nr. 2, S. 84–115. – ISSN 0730–

0301

- [WBSS04] WANG, Zhou ; BOVIK, Alan C. ; SHEIKH, Hamid R. ; SIMONCELLI, Eero P.: Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. In: *IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING* 13 (2004), Nr. 4, S. 600–612
- [WPJR11] WESSELS, Andrew ; PURVIS, Mike ; JACKSON, Jahrain ; RAHMAN, Syed (.: Remote Data Visualization through WebSockets. In: *Eighth International Conference on Information Technology: New Generations, ITNG 2011, Las Vegas, Nevada, USA, 11-13 April 2011*, 2011, S. 1050–1051

## **Danksagung**

Die Danksagung...

## **Erklärungen zum Urheberrecht**

Hier soll jeder Autor die von ihm eingeholten Zustimmungen der Copyright-Besitzer angeben bzw. die in Web Press Rooms angegebenen generellen Konditionen seiner Text- und Bildübernahmen zitieren.