

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, 24. Oktober 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 24. Oktober 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>6</b>
3.1	Extrapolation . . . . .	6
3.2	Delaunay-Triangulierung . . . . .	7
3.3	SSIM . . . . .	7
3.4	PSNR . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Noch mehr Ergebnisse</b>	<b>10</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>13</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 im Anschluss an den Klient-Prozess gesendet, von diesem dekodiert und auf einem Bildschirm ausgegeben wird. 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, die den Speicher herkömmlicher Desktops, Laptops, Smartphones etc. bei weitem übersteigen. Auch wenn ausreichend Speicher zur Verfügung steht, kann die Übertragung langwierig und teuer werden. Mit Hilfe der Remote-Visualisierung kann die Visualisierung vom Server übernommen werden und es muss nicht der komplette Datensatz übertragen werden. Mit leistungsstarken Serversystemen lassen sich komplexe Beleuchtungsmethoden verwendet, 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 flüssige Betrachtung von Szenen Bild für Bild zu ermöglichen.

Ein Ausweg besteht darin, dass der Klient-Prozess ein bereits empfangenes Bild extrapoliert, dadurch kann dem Betrachter ein neues Bild präsentiert werden, obwohl es noch nicht empfangen wurde. Bei der Bildsynthese des Server-Prozesses entsteht neben dem Farbbild zusätzlich ein Tiefenbild, das genutzt werden kann um geometrische Informationen an den Klient-Prozess weiter zu reichen und mit Hilfe dieser Extrapolation durchzuführen. Aus dem Tiefenbild wird dazu ein Dreiecksnetz erzeugt, das mit dem Farbbild als Textur vom Klient aus der neuen Kameraperspektive synthetisiert wird.

Zu diesem Zweck wurde eine Server- und eine Klient-Komponente entwickelt, die mit Hilfe des WebSocket-Protokolls Daten untereinander austauschen. Der Klient basiert auf JavaScript und nutzt für die Bildextrapolation WebGL. Die Qualität der Darstellungen werden mit Hilfe von

---

Ground-Truth-Daten überprüft. Zum Vergleich wird der PSNR und der SSIM [WBSS04] der Bildpaare bestimmt und evaluiert.

Im Folgenden werden existierende Konzepte und Ideen vorgestellt.



## 2 Verwandte Arbeiten

Einen Überblick über Methoden und Architekturen der interaktiven Remote-Visualisierung geben Shu Shi et al. [SH15]. Bevor 3D Anwendungen im Fokus der Forschung waren, wurden Desktop und Remote-Anwendungen sogenannte Thin Client systems entwickelt. Als Beispiele sollen SLIM [SLN99] und THiNC [BKN05] dienen. Ihre Aufgabe besteht darin Desktop-Systeme fern zusteuern, zu diesem Zweck wurden sie für den Einsatz von 2D Grafiken optimiert. Ein Vorteil bei diesen Anwendungen besteht darin, dass nur relativ kleine Änderungen tatsächlich übertragen werden müssen, wenn sich zum Beispiel ein Fenster ändert muss auch nur diese Änderung zum Klient übertragen werden.

Ein Remote-Visualisierungssystem lässt sich weiterhin auch als ein verteiltes System betrachten. Zhefan Jin stellt drei Klassen solcher Systeme vor: sort-first, sort-middle und sort-last [Jin06]. Die drei Klassen unterscheiden, wann welche Informationen getrennt werden und von unterschiedlichen Host-Systemen weiter verarbeitet werden. In Abhängigkeit wie ein solches System konstruiert wurde können Zeicheninstruktionen, Attribute, oder Bilder von einem Knoten zum anderen weiter gereicht werden. Kompressionsmethoden werden für alle arten von Informationen erläutert.

Peter Eisert und Philipp Fechteler haben ein Remote-Visualisierungssystem für Computerspiele entwickelt [Eis07]. Sie haben sich dafür zwei Ansätze zunutze gemacht. Im ersten Ansatz erzeugt der Server die fertigen Bilder, welche mit Video-Codecs codiert und an den Klient gestreamt werden. Im zweiten Ansatz, werden Zeicheninstruktionen an den Klient gestreamt, welcher mit diesen das Ergebnissbild produziert. Ihr System ist für den Einsatz im lokalen Netzwerk konstruiert, trotzdem ist die Verzögerungszeit von der Eingabe bis zum fertigen Bild zu groß.

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 Daemon. Während die Visualisierungs-Engine für die Bildsynthese zuständig ist, übernimmt der Daemon 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.

Die Grundidee das Problem der Latenz mit Bildexploration in den Griff zu bekommen wurde in der Arbeit von Palomo et al. betrachtet [PG10].

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

Gabriel Taubin und Jarek Rossignac [TR98] Geometric Compression Through Topological Surgery Erzeugung von Dreiecksnetzen durch Bäume

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

Gumhold, Stefan and Straßer, Wolfgang [GS98] Real Time Compression of Triangle Mesh Connectivity

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

Geometry Compression Michael Deering [Dee95]

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 soll es um die Grundlagen der Arbeit gehen. Es wird vorgestellt wie ein bestehendes Dreiecksnetz aus einer neuen Perspektive gezeichnet wird und wie die Methoden zum Bildvergleich im Detail funktionieren.

### 3.1 Extrapolation

Bei dem Zeichenvorgang auf dem Server entsteht ein Farbbild und ein Tiefenbild. Das Tiefenbild wurde mit einer Farbtiefe von 16bit erzeugt und ist die Ausgangsbasis für die Bildextrapolation. Da aus diesem ein Dreiecksnetz erzeugt wird, welche das Farbbild als Textur verwendet, und zur Erzeugung neuer Ansichten genutzt wird. Um das Verfahren besser zu verständlich zu machen, wird zunächst die Vertex-Transformation näher betrachtet, zu Verdeutlichung der Zusammenhänge dient die folgende Abbildung:

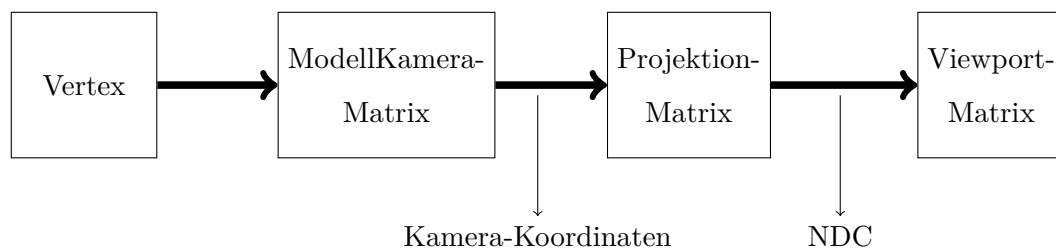


Abbildung 3.1: Die Abbildung zeigt die Transformationspipeline, mit deren Hilfe die Vertices auf den Bildschirm abgebildet werden.

Die Eingabe der Transformationspipeline ist ein Vertex. Jeder Vertex besteht aus einer x-, y- und einer z-Komponente. Die Vertices sind im Modell-Koordinatensystem definiert, das bedeutet, dass der Ursprung dieses Koordinatensystems das Zentrum des Modells ist. Durch die Multiplikation mit der Modell-Matrix werden die Vertices in das Weltkoordinatensystem projiziert. Um die Koordinaten aus dem Weltkoordinatensystem in das Kamera-Koordinatensystem abzubilden genügt die Multiplikation mit der Kameramatrix. In der Abbildung 3.1 wurde die Modell- und die Kamera-Matrix zur ModellKamera-Matrix zusammengefasst. Werden die Ver-

tices, die sich im Kamerakoordinatensystem befinden mit der Projektionsmatrix multipliziert, dann werden diese in *normalized-device-coordinates*, kurz NDC umgewandelt. Normalisierte-Geräte-Koordinaten haben für die x-,y- und z-Komponente den Wertebereich von  $-1.0$  bis  $1.0$ . Durch die Multiplikation mit der Viewport-Matrix werden die x- und y-Komponente auf die Bildschirmkoordinaten abgebildet.

Um aus dem Tiefenbild normalisierte Gerätekoordinaten zu erhalten, müssen die x- und y-Koordinaten der Pixel durch die Auflösung geteilt werden. Die Farbwerte des Tiefenbildes liegen im Bereich von  $0.0$  bis  $1.0$ . Je größer der Wert ist, umso weiter ist ein Pixel von der Bildschirmenebene entfernt. Die Farbwerte müssen ebenfalls in den Wertebereich von  $-1.0$  bis  $1.0$  überführt werden.

Damit aus den normalisierten Gerätekoordinaten wieder Modellkoordinaten werden, reicht es aus diese mit der invertierten ModellKameraProjektionsmatrix zu multiplizieren. Die daraus resultierenden Vertices, lassen sich erneut mit der Transformationspipeline abbilden, auf diese Weise lassen sich die Koordinaten des einen Bildes in die eines anderen überführen.

## 3.2 Delaunay-Triangulierung

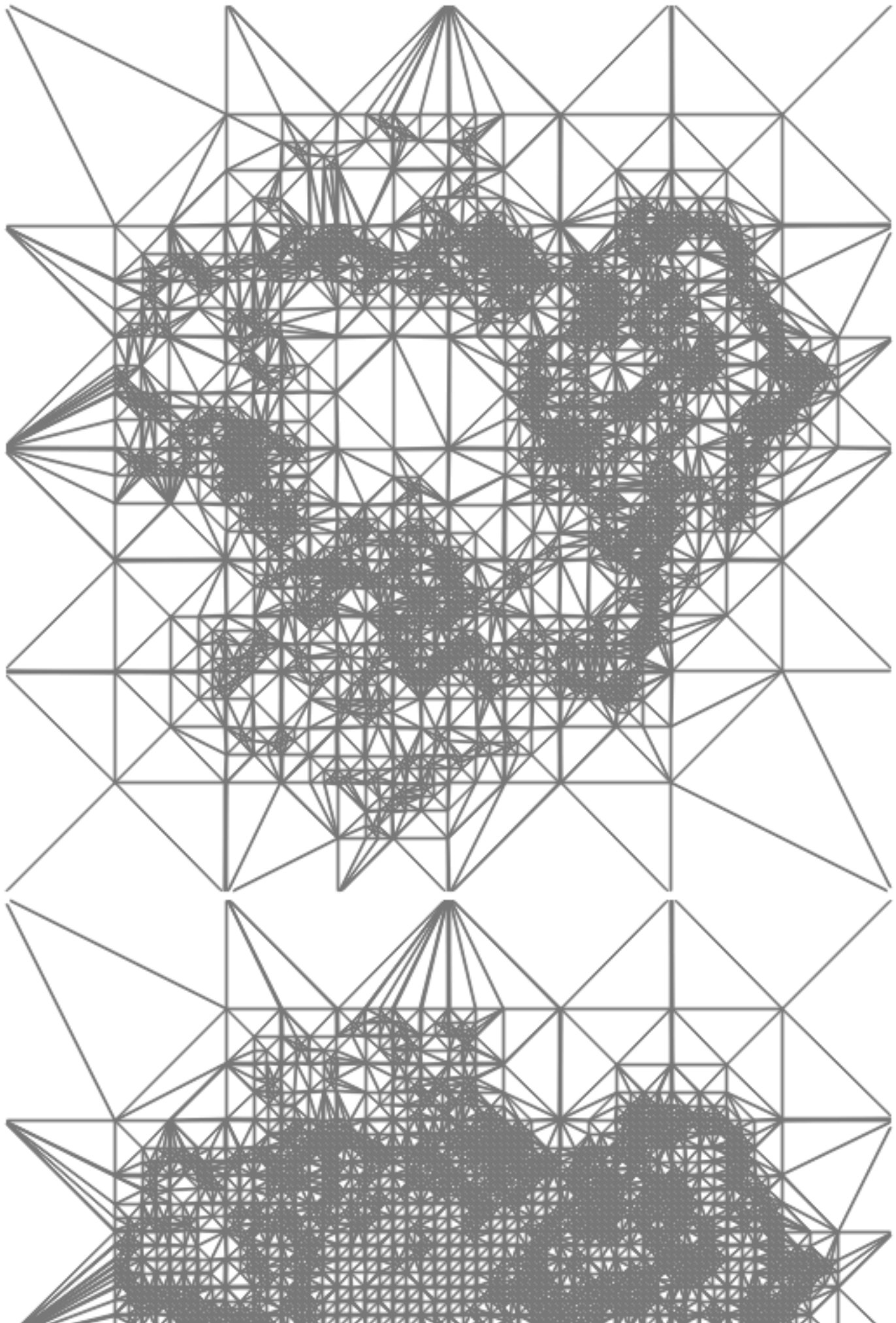
Die Delaunay-Triangulierung ist ein Verfahren um ein Dreiecknetz aus einer Menge von Punkten  $p \in \mathbb{R}^2$  zu erzeugen. Dabei wird für jedes Dreieck ein Umkreis erzeugt, innerhalb dessen keine Punkte eines anderen Dreiecks enthalten sein dürfen. Jedes Dreieck des zu erzeugenden Netzes muss diese 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.

## 3.3 SSIM

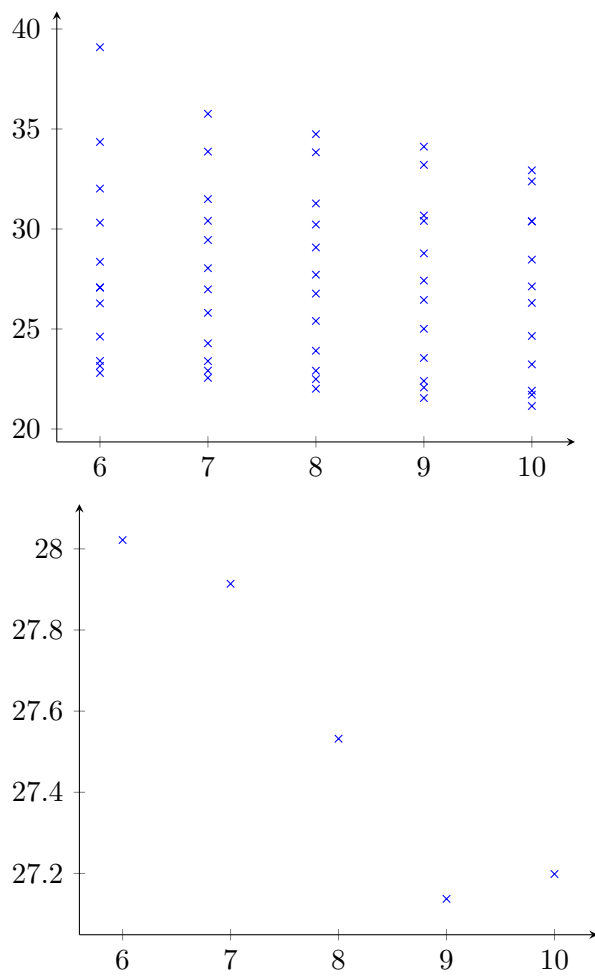
Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity [WBSS04]

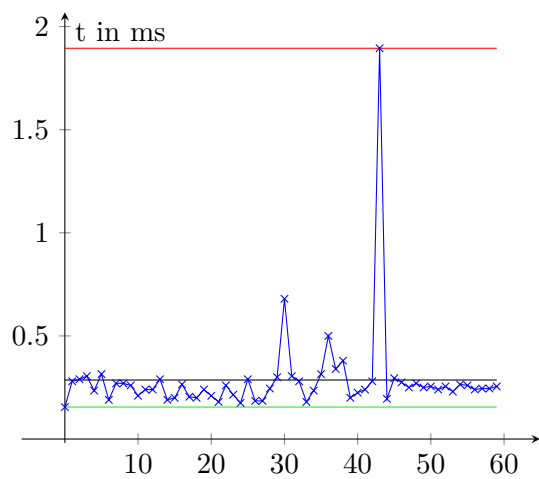
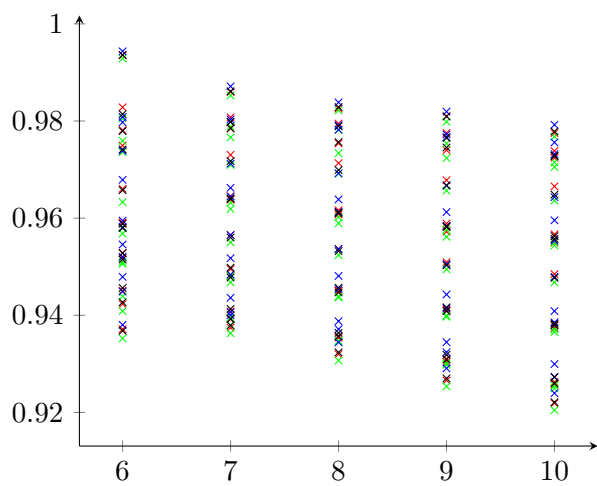
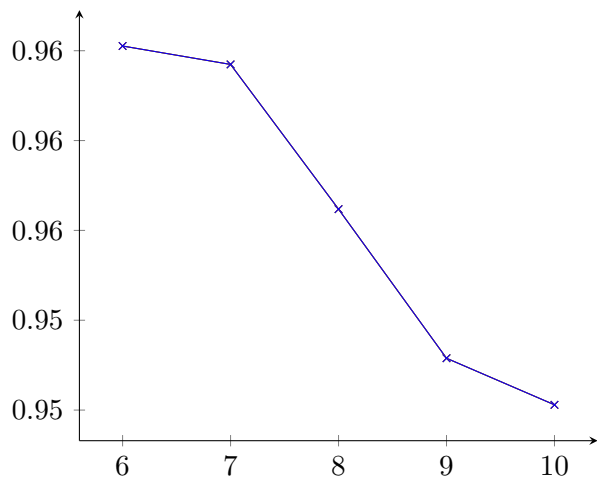
## 3.4 PSNR

## 4 Ergebnisse



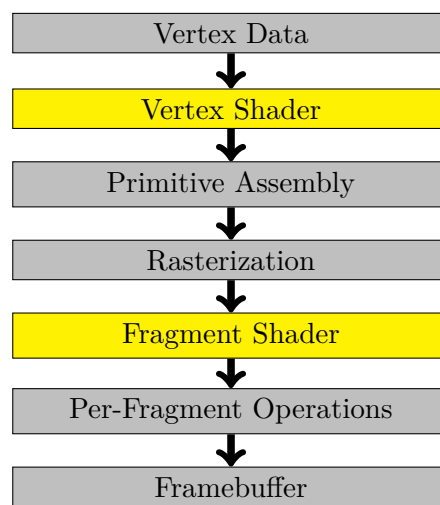
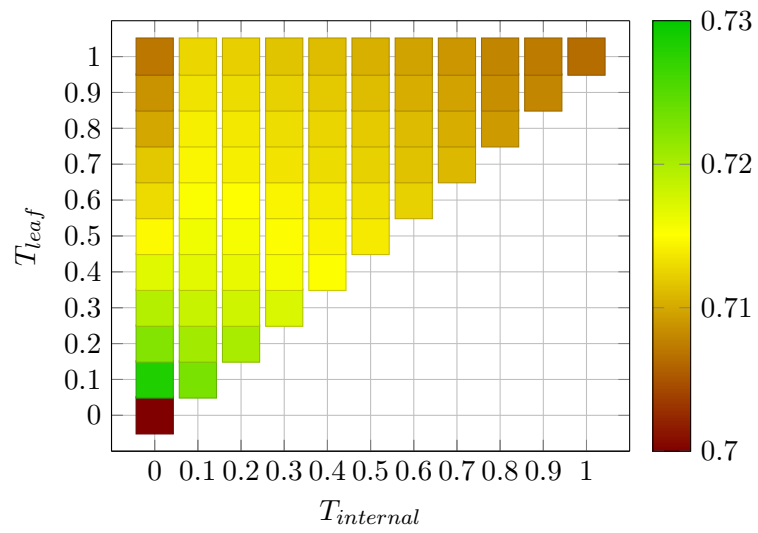
## 5 Noch mehr Ergebnisse





□





## Literaturverzeichnis

- [Azu97] AZUMA, Ronald. *A Survey of Augmented Reality*. 1997
- [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
- [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
- [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
- [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
- [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
- [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
- [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
- [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.