

BACHELORTHESIS

---

# Geometrie basiertes Reflectance Transformation Imaging

---



*Autor:*  
Magnus KAFFENBERGER  
(Mat.Nr.: 27079)

*Prüfer:*  
Prof. Dr. Bernhard EBERHARDT  
Prof. Dr. Thomas KEPPLER

*Eine Arbeit eingereicht  
zum Erlangen des Grades  
Bachelor of Engineering*

3. Mai 2021

# Erklärung an Eides statt

Hiermit versichere ich, Magnus KAFFENBERGER, an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel

Geometrie basiertes Reflectance Transformation Imaging

selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§23 Abs. 2 Bachelor-SPO der Hochschule der Medien Stuttgart) sowie die strafrechtlichen Folgen (gem. § 156StGB) einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Unterschrift:

---

Datum:

---

HOCHSCHULE DER MEDIEN

## *Auszug*

Electronic Media  
Audiovisuelle Medien

Bachelor of Engineering

### **Geometrie basiertes Reflectance Transformation Imaging**

von Magnus KAFFENBERGER

Ziel dieser Arbeit ist es ein alternatives Reflectance Transform Imaging Verfahren vorzustellen und praktisch umzusetzen. Dieses Verfahren soll die realistische Darstellung von Oberflächen ermöglichen, indem der Erhalt von Reflexionen und Schatten verbessert wird. Geometric Reflectance Transfer Imaging unterscheidet sich von traditionellem Polynomial Texture Mapping, indem es Bildinformationen geometrisch kodiert.

Im einleitenden Abschnitt werden die Gründe für ein alternatives Verfahren erläutert. Anschließend werden Begriffe aus der Computergrafik erklärt, welche für die anschließende theoretische Abhandlung des Themas nötig sind. In dem zweiten Teil folgt eine Dokumentation der Implementierung. Dabei werden verwendete Bibliotheken und das Vorgehen von der Aufnahme bis zur Darstellung beschrieben. Es folgt eine Präsentation der Ergebnisse mit einem Vergleich zu traditionellen Polynomial Texture Mapping Verfahren. Abschließend werden die Ergebnisse diskutiert und Möglichkeiten der Verbesserung aufgezeigt.

HOCHSCHULE DER MEDIEN

## *Abstract*

Electronic Media  
Audiovisuelle Medien

Bachelor of Engineering

### **Geometrie basiertes Reflectance Transformation Imaging**

by Magnus KAFFENBERGER

This thesis presents an alternative Reflectance Transform Imaging workflow. The investigated procedure aims to improve the realistic representation of surfaces by enhancing the preservation of reflections and shadows. Geometric Reflectance Transfer Imaging differs from Polynomial Texture Mapping by encoding picture information in form of geometry.

The first chapter presents the need for alternatives to Polynomial Transfer Modelling to be able to produce more realistic surface representations. To understand the theory of Reflectance Transfer Imaging presented in Chapter 3, relevant terminology will previously be discussed. The latter part will showcase its implementation while describing the overall procedure starting from capture to image processing up to visualisation. Finally, the achieved results will be presented and compared to the traditional Polynomial Texture Mapping approach. A discussion while showing possibilities for future work will follow.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Erklärung an Eides statt</b>	<b>i</b>
<b>Auszug</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>iv</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>vi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	2
1.2 Lösungsansatz . . . . .	3
1.3 Überblick . . . . .	4
<b>2 Begriffserklärungen im Zusammenhang mit Reflectance Transform Imaging</b>	<b>5</b>
2.1 Auf Bildinformationen basierendes Rendering . . . . .	5
2.2 Reflectance Transfer Functions . . . . .	6
2.3 Light Stage . . . . .	8
2.4 Kugelkoordinaten . . . . .	8
2.5 Intensitäts Lobe . . . . .	10
2.6 Alembic . . . . .	10
2.7 Subdivision und Reverse Subdivision Algorithmen . . . . .	11
<b>3 Theorie des Reflectance Transformation Imaging Verfahrens</b>	<b>13</b>
3.1 Oberflächenrekonstruktion . . . . .	14
3.2 Polynomiales Texture Mapping . . . . .	15
3.3 Bildakquise . . . . .	16
3.4 Überblick Geometric Reflection Transfer Imaging Workflow . . . . .	17
3.5 Einsatzgebiete . . . . .	20
<b>4 Pipeline für den Geometric Transform Imaging Workflow</b>	<b>24</b>
4.1 Laden der Ausgangsbilder . . . . .	26
4.2 Meshing . . . . .	27
4.3 Lobe Generierung . . . . .	28

---

4.4	Topologische Operatoren . . . . .	29
4.5	Darstellung . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Vergleich zu PTM</b>	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>36</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	36
6.2	Diskussion . . . . .	36
	<b>Literatur</b>	<b>38</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	RTI einer Speerspitze . . . . .	2
1.2	Vergleich von GRTI und PTM . . . . .	3
2.1	Hierarchie verschiedener Reflectance Transfer Functions . . . . .	7
2.2	Abbildung zweier Light Stage Modelle . . . . .	9
2.3	Illustration eines Punktes $P$ in Kugelkoordinaten . . . . .	9
2.4	Helligkeits Lobe Illustrationen . . . . .	9
2.5	Beispiel für eine Lobe Geometrie . . . . .	10
2.6	Abbildung einer mehrfach unterteilten Geometrie . . . . .	11
3.1	Geometrische Rekonstruktion . . . . .	14
3.2	RTI Verfahren im Vergleich . . . . .	15
3.3	Light Stage an der Hochschule der Medien . . . . .	17
3.4	Ausgangs Lobe Geometrie und ein daraus entstandener Lobe . . . . .	19
3.5	Abbildung einer Schnitpunkt bestimmung. . . . .	20
3.6	Aufnahme eines Highlight RTI . . . . .	22
4.1	Pipeline für den Geometric Transform Imaging Workflow . . . . .	24
4.2	Package Diagramm der Codebasis . . . . .	25
4.3	Meshing der Lampenpositionen . . . . .	28
4.4	Lobe Geometrie mit Helligkeitsdaten . . . . .	29
5.1	Vergleich von PTM und GRTI Render . . . . .	32
5.2	Vergleich von PTM Graden . . . . .	33
5.3	Vergleich von Highlights bei verschiedenen Polynomgraden . . . . .	33
5.4	Vergleich von PTM und GRTI Lobes . . . . .	34
5.5	Vergleich von reduzierten Lobes . . . . .	35

# Kapitel 1

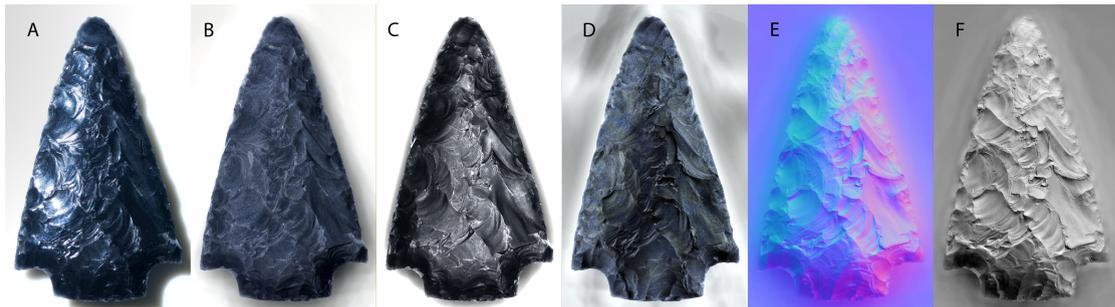
## Einleitung

In der menschlichen Wahrnehmung von Objekten spielen Oberflächen eine große Rolle. Jedes Objekt wird entweder haptisch oder visuell über die Eigenschaften seiner Oberfläche wahrgenommen. Ein Mensch kann durch seine Erfahrung Eigenschaften eines Objektes durch das reine visuelle Erscheinungsbild seiner Oberfläche erschließen. Daher lassen sich viele Informationen über eine Oberfläche eines Gegenstands besser visuell kommunizieren, als sie in anderer Form zu beschreiben. Die Kommunikation findet durch die Repräsentation von visuell aufgenommenen Bilddaten statt, und hängt von der Aufnahmequalität und Wiedergabe ab. Für die Qualität der Repräsentation ist die Interaktion des Lichts mit der Oberfläche von entscheidender Bedeutung. Je mehr Informationen über die Interaktion zwischen Licht und Objekt vorhanden ist, desto realistischer kann eine Oberfläche wiedergegeben werden. In der Forschung, bei der optischen Analyse von Materialien oder in der Computergrafik, profitieren Visualisierungen davon, dem Betrachter eine möglichst realistische Wiedergabe, einer aufgenommen oder einer simulierten Realität sichtbar zu machen.

Die Glaubhaftigkeit der Visualisierung eines Objekts oder der Realismus einer computergenerierten Welt, hängt davon ab, wie natürlich die Interaktion von Licht mit den wahrgenommenen Oberflächen ist. Je realistischer die Abbildung und Wiedergabe von Materialien erreicht wird, desto besser kann ein Mensch erfassen und beurteilen, um welcher Art Material es sich handelt und welche Materialeigenschaften es besitzt.

Es gibt unterschiedliche Verfahren zur Aufnahme und zur Wiedergabe von Oberflächen. Diese reichen von der einfachen Aufnahme eines Fotos, bis hin zur genauen spektralen Vermessung des von einer Oberfläche reflektierten Lichts. Die Genauigkeit der erfassten Daten ist abhängig von dem gewählten Aufnahmeverfahren. Zur Darstellung von Materialien können entweder aufgenommene Datensätze wiedergegeben werden oder aus den gemessenen Werten Modelle zur Simulation von Licht abgeleitet werden.

Eines dieser Verfahren heißt Reflectance Transform Imaging (RTI), bei welchem eine fotografische Aufnahme aus beliebigen Lichtrichtungen wiedergegeben werden kann. RTI ist in der Archäologie, Forensik und Computergrafik weit verbreitet. Abbildung 1.1 zeigt unterschiedliche Bilder einer Speerspitze, welche mit dem RTI Verfahren generiert wurden.



**Abbildung 1.1:** Eine mit dem Reflectance Transform Imaging Verfahren aufgenommene Speerspitze [31]. A: Eine normale Fotografie. B: Ein mit RTI generiertes Bild. C: Ein RTI mit Hervorhebung der Glanzlichter. D: Ein RTI mit mehreren Beleuchtungsrichtungen. E: Eine aus RTI Daten generierte Normal Map. F: Eine aus Normal Maps generierte Darstellung zur Detailhervorhebung.

Reflectance Transform Imaging erfasst mehrdimensionale Bilddaten, die über räumlichen Farbinformationen hinausgehen und damit lichtrichtungsunabhängige Bilddaten erhebt. Es wird verwendet um Texture Maps ohne vorab festgelegter Lichtrichtung zu generieren. Dafür werden bei der Erstellung eine Vielzahl an Lichtrichtungen aufgenommen, welche bei der Wiedergabe eine beliebige Lichtrichtung synthetisieren können. Durch addieren der einzelnen Lichtrichtungen ist es möglich verschiedene Lichtrichtungen zu mischen. Die folgende Arbeit beschäftigt sich mit der Erstellung, Verarbeitung und Wiedergabe von Reflectance Transform Imaging (RTI) Daten.

## 1.1 Motivation

Reflectance Transform Imaging Verfahren wie Polynominal Texture Maps (PTM) [16] bilden die Bildinformationen mit mathematischen Funktionen ab. Dabei werden nicht wie bei einem gerasterten Bild, diskrete Farbwerte für jeden Pixel abgespeichert, sondern Parameter abhängig der einfallenden Lichtrichtung. Diese Parameter werden bei der Darstellung in eine Basisfunktion eingesetzt. Mithilfe der Basisfunktion wird dabei der Helligkeitswert des Pixels, in Abhängigkeit der Lichtrichtung, berechnet. Die Basisfunktion ist für jede Lichtrichtung die selbe. Sie ist also eine globale Basisfunktion. Diese hat den Nachteil, dass lokale Intensitätsänderungen schlecht abgebildet werden. Lokale Veränderungen sind allerdings wichtig um Glanzlichter und Reflexionen realistisch abbilden zu können. Da bei der Verwendung von RTI in Visual Effects, Virtual,- oder Argumented Reality [12, 27] ein möglichst hoher Grad an Realismus angestrebt wird,



**Abbildung 1.2:** Mit zwei verschiedenen RTI Verfahren abgebildeter Löwenkopf. Links mit traditionellem PTM und rechts mit verbessertem Verfahren, welches den Erhalt von Glanzlichtern und Schatten verbessert.

ist es von großer Wichtigkeit, dass Reflexionseigenschaften von Oberflächen möglichst genau wiedergegeben werden. Um bei Polynomial Texture Maps Details zu erhalten sind sehr hohe Polynomgrade vonnöten. Dies bedeutet auf der anderen Seite jedoch ein sehr großen Speicherbedarf und ebenso einen hohen Berechnungsaufwand bei der Darstellung. Damit sind diese nicht zur Echtzeitdarstellung geeignet. In dieser Arbeit wird ein Lösungsansatz vorgestellt, welcher ein RTI Workflow mit ausreichend hohem Detailgrad ermöglicht und wie in [Abbildung 1.2](#) zu sehen ist, Reflexionen realistisch wieder gibt.

## 1.2 Lösungsansatz

Durch die Anwendung lokaler Basisfunktionen kann der Fehlerwert, den PTM mit einer globalen Basisfunktion verursacht, verringert werden. Der Grad des gewählten Polynoms hat direkten Einfluss darauf wie viele lokale Minima und Maxima abgebildet werden können. Das reicht aus, um den Helligkeitswert der diffusen Farbanteile aus verschiedenen Lichtrichtungen zu modellieren. Allerdings gehen dabei hohe Intensitätsschwankungen, wie sie bei stark reflektierenden Oberflächen auftreten, verloren.

Ziel des in dieser Arbeit vorgestellten RTI Verfahren ist es, die Helligkeitswerte in ihrer Lobe-Form<sup>1</sup> als Geometrie abzuspeichern und damit auf das Fitten<sup>2</sup> der aufgenommenen Werte zu verzichten. Die Kodierung der Helligkeitsdaten in Form von Geometrie bietet die Möglichkeit, eine beliebig hohe lokale Anpassung der Geometrieauflösung vorzunehmen. Dies bietet eine Verbesserung der Repräsentation von Glanzlichtern und erhöht den Detailgrad und Informationsgehalt des RTI Datensatzes.

<sup>1</sup> Ein Lobe beschreibt die Intensität des reflektierten Lichts abhängig einer Einfallsllichtrichtung und aller Ausfallsllichtrichtungen. Genauer beschrieben in [Abschnitt 2.5](#)

<sup>2</sup> Funktionsanpassung bei Ausgleichsrechnung

Außerdem können Algorithmen aus der Computer Grafik zur Komprimierung und Weiterverarbeitung auf die Topologie der Lobes angewendet werden. Beispiele hierfür sind die Verwendung von Reverse Subdivision Algorithmen zur Komprimierung mit der Möglichkeit einer annähernd exakten Rekonstruktion der originalen Lichtinformationen.

### 1.3 Überblick

Nachdem nun die Motivation und der Lösungsansatz erläutert wurden, wird ein kurzer Überblick über die in der Arbeit behandelten Themen gegeben. Beginnend werden in Kapitel 2 grundlegende Begrifflichkeiten für das Verständnis von Reflectance Transform Imaging erläutert. Des Weiteren werden Begriffe aus der Computer Grafik erläutert, welche für das Verständnis der Implementierung und Verarbeitung von Geometric Reflectance Transform Imaging (GRTI) nötig sind.

Eine theoretische Behandlung der Grundlage des Reflectance Transform Imaging Verfahrens wird in Kapitel 3 gegeben. Hierbei werden zu Beginn traditionelle Vorgänge und Anwendungsgebiete der Technologie beschrieben. Anschließend wird ein Überblick über die Vorgehensweise des neuen Geometric Transform Imaging Verfahrens gegeben.

Die praktische Umsetzung einer auf Geometrie basierenden RTI Pipeline ist in Kapitel 4 erarbeitet und baut dabei auf den Grundlagen der vorherigen Kapitel auf. Dabei wird das RTI Verfahren von Bildakquise bis hin zum Rendern und Darstellen einer neuen Lichtrichtung beschrieben.

Ziel dieser Arbeit ist es eine flexible Pipeline zur Generierung von Geometric Reflectance Transform Imaging zu erstellen. Die Ergebnisse der Pipeline Implementierung werden in Kapitel 5 vorgestellt. Hierzu findet ein Vergleich mit dem traditionellem PTM Verfahren statt. Dieser beinhaltet den visuellen Unterschied der gerenderten RTI Daten und eine Visualisierung der Detailauflösung der jeweiligen Datensätze.

In Kapitel 6 werden abschließend die erzielten Ergebnisse und mögliche Verbesserung, sowie Erweiterungen diskutiert

## Kapitel 2

# Begriffserklärungen im Zusammenhang mit Reflectance Transform Imaging

Um die Aufgabenstellung zu bearbeiten ist es vonnöten vorab einige Grundlagen zu behandeln. Hierzu werden in diesem Kapitel häufig auftretende Begrifflichkeiten aus dem Gebiet der Computergrafik mit dem Schwerpunkt der Bildsynthese erläutert.

### 2.1 Auf Bildinformationen basierendes Rendering

Auf Bildinformationen basierendes Rendering, im Englischen Image Based Rendering (IBR) genannt, ist eine Methode zur Bildgenerierung, bei welcher aus fotografischen Aufnahmen fotorealistische Bilder synthetisiert werden. IBR unterscheidet sich dabei von traditionellen Bildsynthetisierungsverfahren wie Pathtracer oder Scanlinerenderer. Bei diesen wird ein Lichtstrahl in einer Computergrafikszene simuliert. In der Szene werden Oberflächen durch Geometrie repräsentiert und bekommen Eigenschaften zugewiesen, welche die Interaktion mit Licht beschreiben.

Bei IBR Verfahren wird aus einer Sammlung an Ausgangsbildern eine neue Perspektive berechnet. Dabei unterscheiden sich verschiedene IBR Verfahren darin, wie viel Information über die Szene in Form von Geometrie vorliegt. Es kann dabei in drei Kategorien unterteilt werden [13].

1. **Rendern ohne Geometrie:** Hierbei wird aus den Ausgangsbildern abgeleitet, wie sich die Oberflächenerscheinung abhängig von Licht und Blickrichtung ändert.

Das einfachste Beispiel hierfür ist ein Kugelpanorama, bei welchem der Betrachter eine beliebige Blickrichtung wählen kann. Diese wird in der Regel aus mehreren einzelnen Aufnahmen zusammengesetzt [7, 10].

Komplexere Verfahren bauen auf der plenoptischen Funktion auf [6]. Hierbei wird aus den Ausgangsbildern Informationen über jeden Blickwinkel und jede Lichtrichtung abgeleitet. Somit kann eine Szene unter frei wählbarem Betrachtungspunkt und Lichtrichtung dargestellt werden.

2. **Rendern mit implizierter Geometrie:** Es basiert auf übereinstimmende Positionsdaten in einer kleinen Menge Aufnahmen. Hierbei liegt keine 3D Information im Voraus vor, sondern es werden Positionsdaten nur mit Projektionsverfahren ermittelt. Dies erlaubt das Erstellen von neuen Betrachtungswinkeln durch Manipulation der gewonnen Punktpositionen.

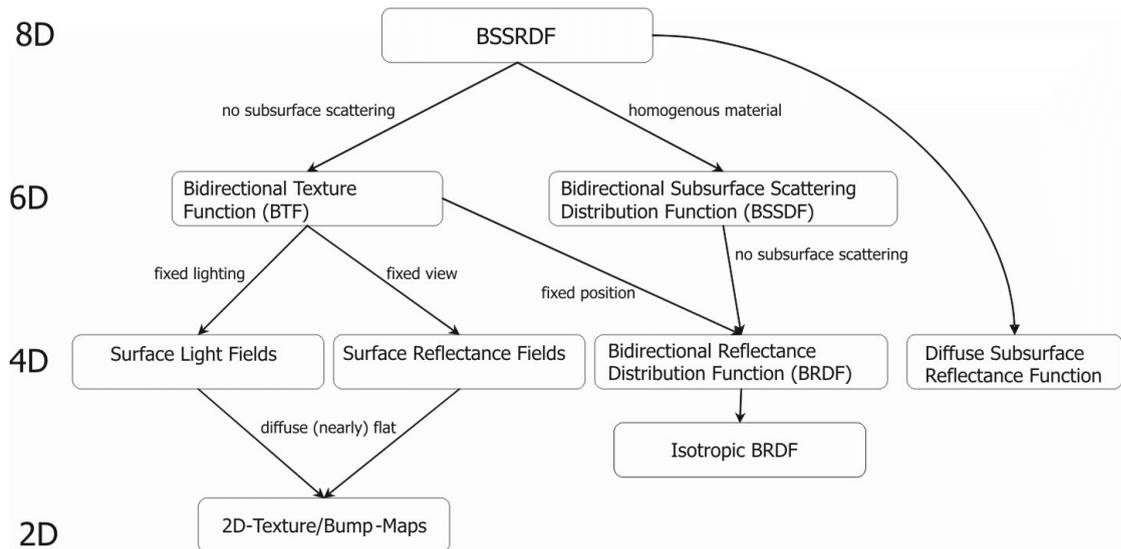
Ein Beispiel hierfür ist die Berechnung einer Tiefenkarte durch Featureerkennung und Parallaxunterschiede [4], mit welcher Bildinhalte zu einer neuen Blickrichtung perspektivisch verzerrt werden können.

3. **Rendern mit expliziter Geometrie:** Dies ist das gleiche Prinzip wie Texturemapping bei traditionellen Renderverfahren. Hierbei wird die Bildinformation auf Tiefeninformation projiziert. Somit kann ein beliebiger neuer Blickpunkt nahe der ursprünglichen Blickrichtung gewählt werden. Dieses Verfahren wird zum Beispiel in Compositing Programmen angewendet. Dabei liegt eine Punktwolke mit entsprechender Farb- und Positionsdaten vor und kann mit einer virtuellen Kamera abgefilmt werden.

Das in dieser Arbeit betrachtete Verfahren fällt unter die Kategorie „Rendern ohne Geometrie“. Die Ausgangsbilder sind aus derselben Blickrichtung, allerdings unter vielen verschiedenen Lichtrichtungen aufgenommen. Bei der Bildsynthese kann daher die Beleuchtung frei festgelegt und dadurch die Reflexionseigenschaften besser visualisiert werden. Des weiteren kann dieses Verfahren, um die Kategorie „Rendern mit implizierter Geometrie“ erweitert werden, da eine Rekonstruktion der Oberflächengeometrie hierbei möglich ist.

## 2.2 Reflectance Transfer Functions

RTI ist ein Verfahren zur Generierung von Surface Reflectance Fields (SRF). Im Zusammenhang mit anderen Reflectance Transfer Functions (RTF) sind SRF als erste Erweiterung von traditionellen zweidimensionalen Texturen einzuordnen. In Abbildung 2.1 sind verschiedene RTF abhängig ihrer Dimensionalität eingeordnet.



**Abbildung 2.1:** Hierarchie verschiedener Reflectance Transfer Functions [18]. Von oben nach unten nimmt die Dimensionalität der enthaltenen Informationen und der damit verbundenen Möglichkeiten ab.

Unten in Abbildung 2.1 befinden sich zweidimensionale Texturen (**Texture Maps**). Eine **Texture Map** hat Lichtrichtung und Selbstbeschattung unveränderlich kodiert und ihr Erscheinen ist Blick- und Lichtrichtungs unabhängig. Einer **Texture Map** kann mit Hilfe einer **Bump Map** den Anschein an Höhe gegeben werden. Allerdings ist mit **Bump Maps** Selbstbeschattung und Interaktion mit Glanzlichtern nur sehr beschränkt möglich und bietet keinerlei Informationen um einen neuen Betrachtungswinkel aus den vorhandenen Bilddaten zu generieren.

Erweitert man eine einfache **Texture Map** um Ansichten aus weiteren Blickrichtungen, erhält man die Informationen die nötig für die Generierung von **Surface Light Fields (SLF)** sind. SLF ermöglichen die freie Wahl des Betrachtungspunktes mit Änderung der Selbstbeschattung und Interaktion von Reflexionen und Glanzlichtern. Eine Veränderung der Beleuchtungssituation ist bei **Surface Reflectance Fields (SRF)** möglich. Ein **RTI** Datensatz beinhaltet alle Informationen für ein SRF aus einer Blickrichtung. Wird ein RTI Datensatz für jeden Betrachtungspunkt eines SLF aufgenommen, kann aus diesen Daten eine **Bidirectional Texture Function (BTF)** aufgestellt werden. Eine **BTF** beinhaltet alle Informationen über eine Oberfläche, um sie aus einer beliebigen Blickrichtung unter beliebigen Beleuchtungssituationen darzustellen. Alle Informationen für die realistische Darstellung von Selbstbeschattung<sup>1</sup> und Reflexionseigenschaften sind in einer **BTF** enthalten. Ganz oben in Abbildung 2.1 steht die **Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function (BSSRDF)**. Eine BSSRDF umfasst alle Informationen über das Verhältnis eines Einfallenden und eines die Oberfläche verlassenden Lichtstrahls. Zusätzlich zu den in einer BTF beschriebenen Informationen,

<sup>1</sup> Selbstbeschattung bezeichnet einen Schatten, den ein Objekt bei konkaver Oberfläche auf sich selbst wirft. Im Gegensatz zu Objektschatten, der von einem Objekt auf ein anderes fällt.

beinhaltet eine BSSRDF auch Informationen über die Ausbreitung eines Lichtstrahls in einem Medium.

## 2.3 Light Stage

Eine Light Stage, auch Light Dome genannt, bietet eine Umgebung um Objekte unter kontrollierten Beleuchtungsbedingungen aufzunehmen und findet daher Anwendung bei der Erfassung von Form oder Reflexionseigenschaften von Objekten und Oberflächen. Die Grundform besteht oft aus einer hemisphärischen Kuppel, an deren Innenseite eine große Anzahl an Lampen angebracht sind. Das zu erfassende Objekt wird in die Mitte der Grundfläche gelegt und die Lampen dorthin ausgerichtet. Die Vielzahl an Lampen ermöglicht eine Beleuchtung aus vielen Kombinationen von verschiedenen Lichtrichtungen. Wie in einer „Sound Stage“ Aufnahmen ohne Störgeräusche von außen aufgenommen werden können, bietet eine Light Stage die Möglichkeit Aufnahmen unter kontrollierten Beleuchtungsbedingungen zu erstellen. Manche Modelle können auch das farbliche Spektrum der Lampen oder die Polarisation des Lichts beeinflussen. Zum Beispiel bieten RGB LEDs die Möglichkeit Lichtverhältnisse wiederzugeben, die vorab in Form eines Light Probe Image aufgenommen wurden [14]. Die Anwendung von Polarisationsfiltern an Lichtquellen und Kamera ermöglicht eine Trennung der Diffus- und Spekularanteile in der Weiterverarbeitung [12].

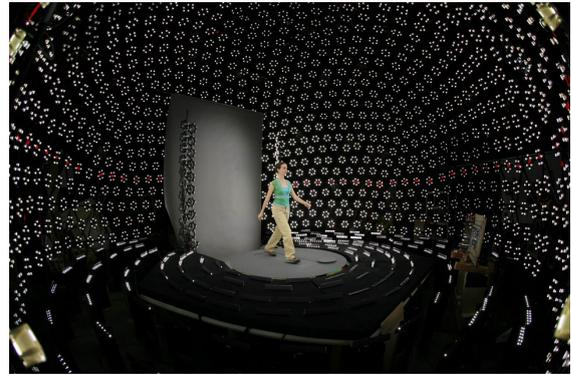
Die Lichtrichtung ist oftmals nicht die einzige unbekannte Größe von Interesse. Für die Aufnahme von Lichtfeldern ist zum Beispiel auch die Änderung des Blickwinkels von Bedeutung [9]. Hierfür bietet eine Light Stage die einfache Möglichkeit Kameras aus beliebigen Blickrichtungen zu befestigen.

## 2.4 Kugelkoordinaten

Bei der Verwendung von Reflectance Transform Imaging spielt es eine Rolle, aus welcher Richtung ein Lichtstrahl kommt und ein Punkt betrachtet wird. Eine einfache mathematische Darstellung dafür sind Kugelkoordinaten. Hierbei kann jeder Punkt auf einer Einheitskugel mit zwei Winkeln angegeben werden. Dabei ist der erste Winkel der Polwinkel und der zweite Winkel der Azimutwinkel [20]. Nach dem gleichen Prinzip wie Koordinatenangaben auf einem Globus.

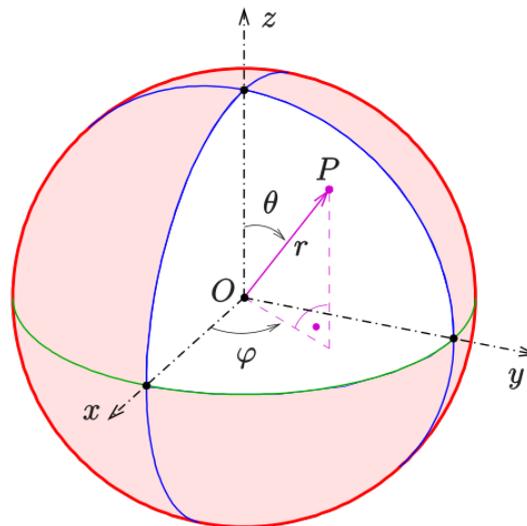


(a) Ein portabler Light Dome der in einem Rucksack zu entlegenen Einsatzorten transportiert werden kann [30].

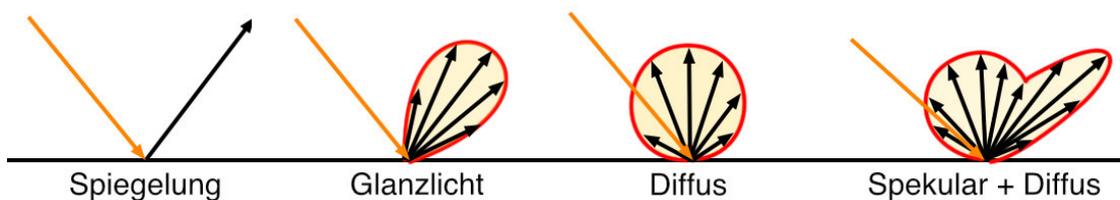


(b) USC's Light Stage 6 ermöglicht einem Menschen den aufrechten Gang auf einem Laufband [21].

**Abbildung 2.2:** Beispiele für zwei Light Stages. Verschiedene Anwendungsgebiete verlangen unterschiedliche Konstruktionsweisen. Das Funktionsprinzip bleibt gleich. Ein portabler Dom wie in Abbildung 2.2a wird von Archäologen im praktischen Einsatz vor Ort verwendet, um kleine Artefakte aufzunehmen. Light Stages von mehreren Metern Durchmesser kommen in der VFX Industrie bei der Digitalisierung von Menschen zum Einsatz. Um einen möglichst konstanten Einfallswinkel auf das gesamte Objekt bei der Aufnahme einer Lichtrichtung zu erhalten, ist bei größeren Objekten ein höherer Abstand zwischen Objekt und Lichtquelle nötig.



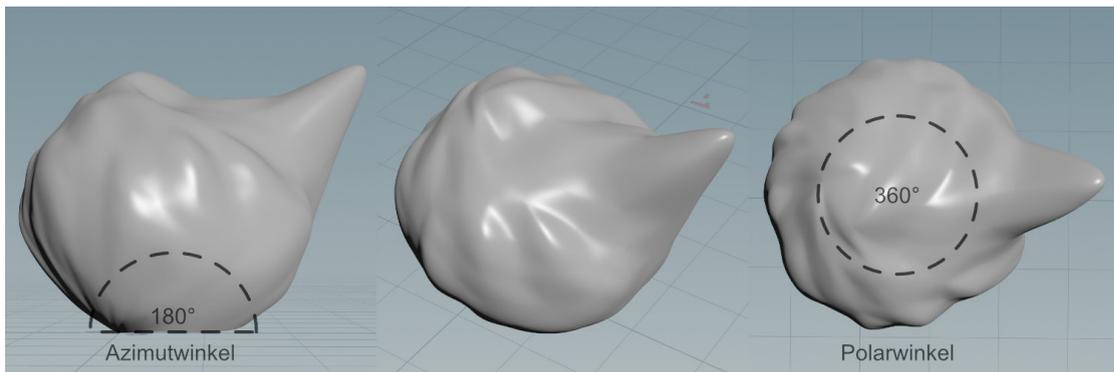
**Abbildung 2.3:** Illustration eines Punktes  $P$  in Kugelkoordinaten  $\theta$  und  $\phi$  relativ zu einem kartesischen Koordinatensystem mit den Achsen  $x, y$ , und  $z$  [26].



**Abbildung 2.4:** Illustration der Zusammensetzung eines Helligkeits Lobe [28]

## 2.5 Intensitäts Lobe

Ein Intensitäts oder Helligkeits Lobe beschreibt, wie ein Oberflächenpunkt einen Lichtstrahl reflektiert. Wenn eine Oberfläche rau ist, wird ein einfallender Lichtstrahl gestreut reflektiert. Die Streuung weicht dabei vom idealen Ausfallwinkel einer Spiegelung ab. Ein Glanzlicht wird gerichteter reflektiert als die diffuse Komponente. Werden die einzelnen Komponenten einer Reflexion aufaddiert, kann man diese zusammen in einem Lobe kodieren. In Abbildung 2.4 sind Querschnitte solcher Lobes illustriert. Der Radius des Lobe, zwischen Lichteinfallspunkt und Oberfläche beschreibt dabei die Intensität der Reflexion abhängig vom Ausfallwinkel.



**Abbildung 2.5:** Eine Lobe Geometrie aus verschiedenen Blickwinkeln. Eingezeichnet sind der Azimut und Polarwinkel, welche zur Bestimmung der Lichtrichtung dienen.

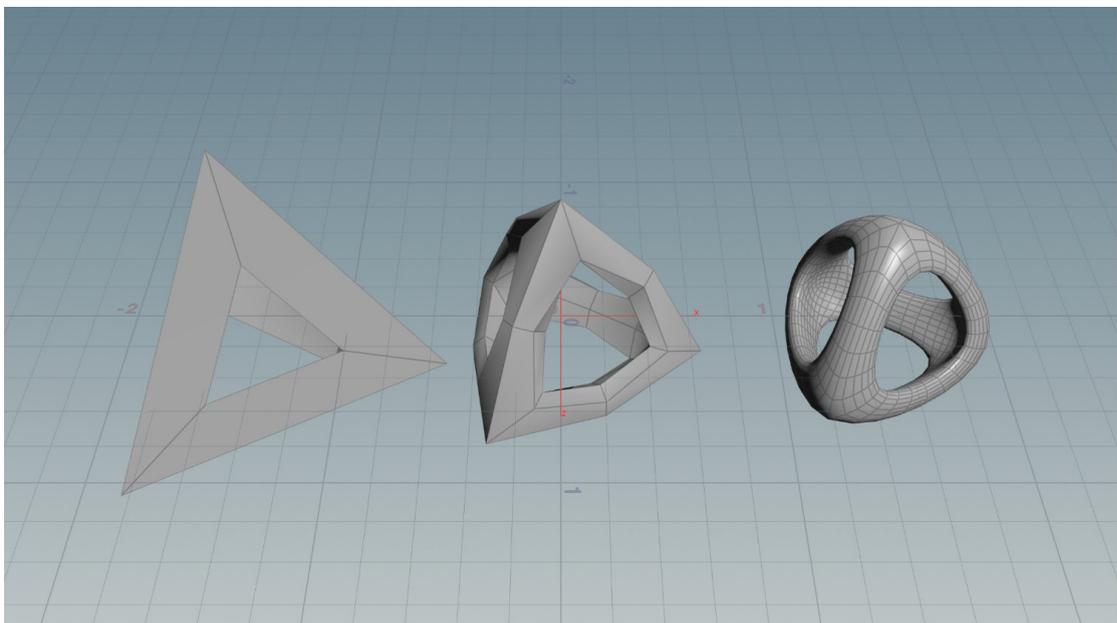
## 2.6 Alembic

Alembic ist ein Dateiformat zur Repräsentation von Computergrafik Szenen. Alembic beschränkt sich auf die generischen Bausteine einer Szenerie, wie Geometrie, Kurven oder Kameras. Ein Alembic Archiv besteht aus vielen einzelnen Samples, die den Istzustand zu einem bestimmten Zeitpunkt repräsentieren.

Alembic wurde von Lucasfilm und Sony Pictures Imageworks entwickelt und 2011 der Öffentlichkeit als Open Source Projekt zugänglich gemacht. In den gängigsten Softwarepaketen für Animation und VFX ist Alembic integriert. Es hat große Popularität als einheitliches Austauschformat zwischen Arbeitsschritten und Softwarepaketen erlangt. Beispiel dafür ist das Exportieren von animierten Szenen, um sie an das Lighting and Shading Department weiterzugeben. Animierte Charaktere oder Assets können als Alembic gespeichert werden, um sie zum Beispiel in einem Simulationsprogramm weiter zu verarbeiten. Die Simulationsergebnisse können als Alembic wieder zurück in die Shading/Lighting/Rendering Pipeline geführt werden. Dafür unterstützt Alembic animierte Geometrie, auch wenn diese ihre Topologie über die Zeit ändert.

Bei einem Polygon Objekt besteht ein Sample<sup>2</sup> zum Beispiel aus mehreren Listen mit Daten. Eine Liste dient der Zuordnung aller Vertex IDs zu den entsprechenden Polygonen, eine andere definiert alle Vertex Positionen. Viele dieser Samples werden zeitlich geordnet zu einem Objekt zusammengefasst. Mehrere dieser Objekte können wiederum in ein Alembic Archiv geschrieben werden. Da Animationskurven beim Export verloren gehen, unterstützt Alembic Framesamples. Diese Samples beinhalten Informationen über den Zustand zwischen zwei Frames, der in der Regel über Animationskurven definiert wird. Temporales Supersampling bietet die Grundlage für einen konsistenten Motionblur Workflow in der gesamten Produktionspipeline, da für die Berechnung von natürlich aussehendem Motionblur eine größere temporäre Auflösung vorliegen muss, als die Abspielgeschwindigkeit.

## 2.7 Subdivision und Reverse Subdivision Algorithmen



**Abbildung 2.6:** Ein geometrisches Objekt in verschiedenen Subdivision Stufen. Links: Ausgangsgeometrie, Mitte: einmalige Unterteilung, Rechts: dreifache Unterteilung mit Catmul Clark Algorithmus

In der Computer Grafik werden, um die Auflösung von Geometrie zu erhöhen, **Subdivision Algorithmen** angewandt. Dabei werden Polygone nach bestimmten Schemas unterteilt und neue Vertexpunkte hinzugefügt. Die neuen Vertex Positionen werden so festgelegt, dass Kanten und Ecken in der Ausgangsform durch das Unterteilen abgerundet werden. Algorithmen unterscheiden sich darin, auf welche topologischen Strukturen sie angewandt werden können und wie sie diese verändern. Ein großer Unterschied ist

<sup>2</sup> Ein Sample beschreibt die Geometrie zu einem bestimmten Zeitpunkt.

hierbei die Anzahl an Vertexpunkten, aus denen ein Polygon gebildet wird und ob sich innerhalb einer Geometrie die Anzahl an Vertex Punkte pro Polygon unterscheidet.

Ein Beispiel hierfür wäre, dass der Loop Subdivision Algorithmus nur auf Geometrien, welche ausschließlich aus Dreiecken bestehen, angewandt werden kann[5]. Der Catmul Clark Algorithmus ist hingegen auf viereckige Polygone ausgelegt.

Alle Subdivision Algorithmen haben die Eigenschaft, dass sie sich bei rekursiver Anwendung einer Grenzfunktion annähern. Daher eignen sie sich um aus einer niedrig aufgelösten Geometrie, die ein kantiges Erscheinen hat, eine glatte Form zu bilden[11]. Das ermöglicht insbesondere organische Formen, mit wenig Vertexpunkten abzuspeichern um Speicherplatz zu sparen. Erst bei der Darstellung wird die Geometrie wieder unterteilt und in seiner hoch aufgelösten Form dargestellt.

Ein **Reverse Subdivision Algorithmus** ist die Invertierung eines Subdivision Algorithmus. Dabei wird das Subdivision Schema zur Unterteilung und Gewichtung der Punktpositionen rückwärts angewendet. Somit verringert sich die Anzahl an Vertexpunkten und dadurch auch der Speicherbedarf.

## Kapitel 3

# Theorie des Reflectance Transformation Imaging Verfahrens

Reflectance Transformation Imaging ist ein Aufnahmeverfahren für die Erfassung von Oberflächenreflexionseigenschaften. Dabei wird ein vierdimensionaler Datensatz erfasst, der die Oberflächenerscheinung aus verschiedenen Lichtrichtungen beschreibt.

1. Dimension: Bildbreite in Pixeln.
2. Dimension: Bildhöhe in Pixeln.
3. Dimension: Polarwinkel der Lichtrichtung von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$ .
4. Dimension: Azimutwinkel der Lichtrichtung von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$ .

Jeder Wert dieses Datensatzes beschreibt die Helligkeit eines Pixels abhängig der Lichtrichtung. Da es sich um RGB Bilder handelt, wird dieser Datensatz für jeden Farbkanal erhoben. Die Auflösung des Polar- und Azimutwinkel hängt von der Anzahl der aufgenommenen Lichtrichtungen ab. Aus der Gesamtheit lassen sich Informationen über Farbe, Reflexionen, Selbstbeschattung und Interreflexion<sup>1</sup> gewinnen.

Es wurde entwickelt, um das fotorealistische Erscheinen von konventionellen Diffus- und Bump Texture Maps zu verbessern. Bei konventionell Bump- und Diffustexturen wird der Schattenwurf und Reflexionen mit in die Textur kodiert. Das stellt vor allem bei der Anwendung in realistischen Computer generierten Grafiken ein Problem dar, da hierbei die Lichtrichtung und damit der Schattenwurf, zum Rendern der Grafiken frei gewählt

---

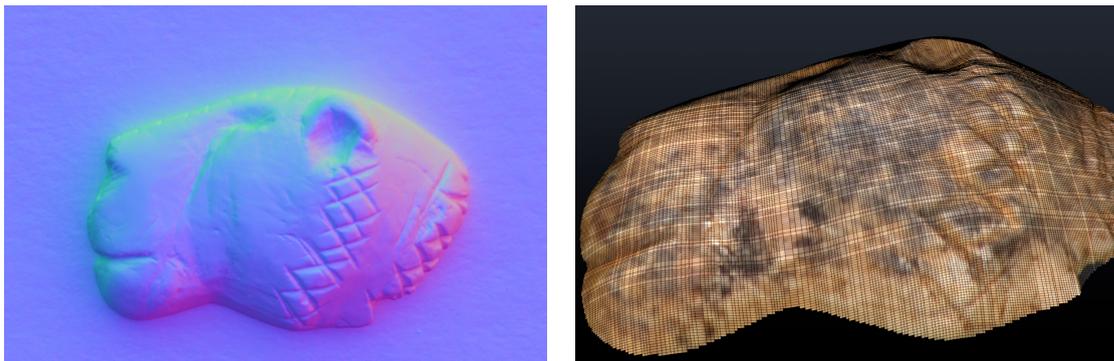
<sup>1</sup> Interreflexionen bezeichnet Reflexionen zwischen zwei Punkten auf der selben Oberfläche.

wird. Dabei entsteht in einer Szene eine Unstimmigkeit zwischen Schattenwurf von Objekten und Texturen mit eingebackener Selbstbeschattung von Oberflächenstrukturen. Dies erschwert die Generierung von fotorealistischen Bildern.

### 3.1 Oberflächenrekonstruktion

Informationen über die Normalen einer Oberfläche ermöglichen auch die geometrische Rekonstruktion der Oberflächenstruktur durch Oberflächen Orientierung mit Hilfe von Photometrischer Stereografie [3].

Dabei wird der maximale Intensitätswert für jedes Pixels abhängig aller Lichtrichtungen ermittelt und somit jedem Pixel auf der Oberfläche eine Lichtrichtung zugeordnet. Da die Blickrichtung und die Position der Lampen bekannt sind, kann die Orientierung über die Winkelhalbierende des Aus,- und Einfallswinkels bestimmt werden. Durch Bestimmung der Oberflächenorientierung für jedes Pixel erhält man eine Normal Map<sup>2</sup>. Über die bekannte Fläche eines Pixels und den Oberflächengradienten der Normal Map, kann die Oberfläche geometrisch konstruiert werden.



**Abbildung 3.1:** Photometrisch generiertes 3D Objekt. Photometrische Stereografie wird verwendet um aus einer Normal Map (links) eine Geometrie zu generieren (rechts).

Da keine absolute Information über die Entfernung eines Punktes auf der Oberfläche zum Betrachtungspunkt vorliegt, bietet dieses Verfahren die besten Ergebnisse mit glatten Oberflächen, welche wenige Diskontinuitäten aufzeigen. Ungenauigkeiten führen zu niederfrequenten Deformationen der originalen Form. Daher liegt die Hauptanwendung dieses Verfahrens in der Generierung von hochfrequenten Details und nicht in der Konstruktion des Volumens eines Objekts [17]. Mit einem weiteren Betrachtungspunkt kann dieses Verfahren allerdings mit traditionellen stereoskopischen Rekonstruktionsverfahren kombiniert werden. Da Parallaxe<sup>3</sup> zwischen zwei Betrachtungspunkten Aufschluss über die Entfernung eines Objektpunkts zum Betrachtungspunkt gibt.

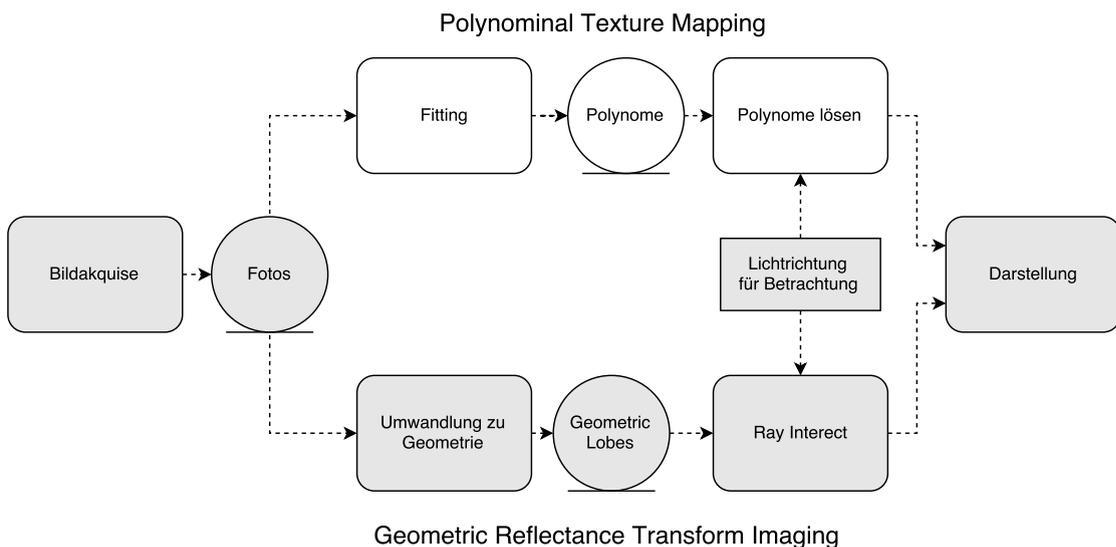
<sup>2</sup> Eine Normal Map repräsentiert die Normalen einer Oberfläche

<sup>3</sup> Unterschied der sich durch die Betrachtung einer Szene aus zwei Positionen ergibt.

## 3.2 Polynomiales Texture Mapping

Ein gängiges Verfahren für RTI Anwendungen, ist das von Malzbender im Jahre 2000 bei HP erforschte Polynomiale Texture Mapping [16].

Die Helligkeitswerte eines Pixels werden durch eine polynomiale Funktion ersetzt. Diese beschreibt die Helligkeit eines Pixels in Abhängigkeit eines Parameters für die Lichtrichtung. Diese sogenannten Polynomfunktionen stellen nur eine Annäherung an die gemessenen Werte da. Ihre Abbildungsgenauigkeit hängt davon ab, wie hoch der Polynomgrad gewählt wird [20]. Bei Erhöhung des Polynomgrades der Funktion steigt der Speicherbedarf und die Laufzeit für die Berechnung der Interpolationsfunktion und der Wiedergabe. Da die Polynomfunktion für jede Lichtrichtung identisch gewählt wird, können lokale Frequenzänderungen oder Extremwerte nicht optimiert werden. Dabei gehen in der Wiedergabe hauptsächlich Glanzlichter verloren und lassen ein Material diffuser erscheinen als es unter realer Beleuchtung ist. Daher eignet sich Polynomial Texture Mapping (PTM) hauptsächlich für die Darstellung von Diffusfarbe einer Oberfläche, allerdings nicht für den Erhalt von Reflexionen und spekularen Glanzlichtern.



**Abbildung 3.2:** RTI Prozesse im Vergleich. Weiß hinterlegt das PTM Verfahren, in Grau das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren. Beide Verfahren basieren auf denselben Ausgangsdaten und generieren Bilder unter neuen Lichtsituationen. Sie unterscheiden sich jedoch in der Verarbeitung und Speicherung der Bildinformationen. Bei Polynomial Texture Mapping werden Bildinformationen mit Polynomfunktionen angenähert und deren Koeffizienten abgespeichert. Bei Geometric Reflectance Transfer Imaging werden Bildinformationen hingegen in Intensitäts Lobes kodiert und als Geometrie abgespeichert.

Für Anwendungsbereiche in denen die natürliche Wiedergabe von Oberflächen mit realistischen Reflexionseigenschaften nötig ist, verzichtet Geometric Reflectance Transform Imaging daher auf das Fitten von polynominalen Basisfunktionen. Das ermöglicht den

Erhalt von mehr Informationen und erlaubt daher eine natürliche Darstellung von Oberflächen. In Abbildung 3.2 sind beide Verfahrensabläufe illustriert, die Ausgangsdaten und das Ergebnis für die Darstellung sind jeweils die gleichen. Der Unterschied zwischen Polynominal Texture Mapping und dem in dieser Arbeit vorgestelltem Geometric Reflectance Transfer Imaging, liegt in der Verarbeitung und Speicherung der RTI Daten. Bei GRTI werden die Helligkeitsinformationen nicht von Polynomfunktionen beschrieben, sondern durch die geometrische Repräsentation der Helligkeits Lobes<sup>4</sup>. Diese geometrischen Lobes können mit einem beliebigen Detailgrad geformt werden und somit Extremwerte oder hochfrequente Änderungen abbilden. Diese gehen bei der Modellierung mit Basisfunktionen verloren.

### 3.3 Bildakquise

RTI ist eine photographische Aufnahmemethode, bei der ein statisches Objekt aus einer Blickrichtung unter vielen Lichtrichtungen aufgenommen wird. Die Aufnahme dieser Ausgangsbilder ist der erste Schritt in der Erstellung eines RTI Datensatzes. Die Qualität der Aufnahmen beeinflusst maßgeblich die Qualität des Endergebnisses. Es haben sich zwei verschiedene Methoden zur Akquise der nötigen Bilder entwickelt.

#### Light Stage

Für die Bildakquise wird oft eine Light Stage verwendet [12, 16]. Wie schon erwähnt, bietet eine Light Stage oder ein Light Dome sehr gute Kontrolle über die Lichtverhältnisse bei der Aufnahme. Die für die Aufnahmen in dieser Arbeit verwendete Light Stage besteht aus 240 hemisphärisch angeordneten Lampen. Im Zenit befindet sich eine Spiegelreflexkamera mit einem Telezoomobjektiv, was die Beschränkung des aufgenommenen Ausschnitts erleichtert. Das abzubildende Objekt oder die Oberfläche wird unter der Kamera im Mittelpunkt der Hemisphäre mit gleichem Abstand zu allen Lampen platziert. Daneben wird eine Chromkugel gelegt welche später als Referenz für die Berechnung der Lichtrichtungen dient. Nun wird sequenziell für jede Lichtrichtung ein Foto aufgenommen.

#### Highlight RTI

Eine zugänglichere Alternative zu einer Light Stage ist die Aufnahme von Highlight RTIs. Vor allem bei Archäologen hat sich das Highlight RTI Verfahren stark verbreitet, da es die Aufnahme von großen und nicht beweglichen Objekten ermöglicht. Das Highlight

<sup>4</sup> Die Beschreibung eines Helligkeits Lobe findet sich in Kapitel 2.5



**Abbildung 3.3:** Teil der Light Stage an der Hochschule der Medien, mit 240 Lampen die an einer Stahlkuppel befestigt sind. Darunter ein Tisch zur Platzierung des aufzunehmenden Objekts. Mittig über dem Tisch ist im Zenit der Kuppel eine Kamera angebracht.

RTI Verfahren wird unter dem Anwendungsgebiet Archäologie, in Abschnitt 3.5, näher beschrieben.

Die Blickrichtung spielt hierbei eine untergeordnete Rolle, da nur die Reflexionseigenschaften unter sich ändernder Lichtrichtung aufgenommen werden. Allerdings ist es nötig die Lichtrichtung relativ zur Blickrichtung zu kennen.

### 3.4 Überblick Geometric Reflection Transfer Imaging Workflow

Nach der Aufnahme der Ausgangsbilddaten, sind alle nötigen Daten für den RTI Prozess vorhanden.

Im nächsten Schritt müssen die Lichtrichtungen berechnet werden. Dafür werden die Positionen der einzelnen Reflexionen auf der Chromkugel ermittelt. Durch Kenntnis der Kameraposition und der Geometrie der Kugel kann die einfallende Lichtrichtung zu jedem Bild bestimmt werden. Durch die hemisphärische Form einer Light Stage, haben alle Lampen den selben Abstand zum Objekt. Mit dem Wissen über den Durchmesser können somit die Positionen aller Lampen anhand ihrer Lichtrichtung bestimmt werden. Die Lampenpositionen werden für die spätere Verwendung mit einer Referenz zu dem

jeweiligen Foto in einer Liste abgelegt.

---

```

1 240
2 bmp-gedreht-Klein/Loewenkopf_klein_0001.bmp -0.0019356994 -0.14720464
   0.98910415
3 bmp-gedreht-Klein/Loewenkopf_klein_0002.bmp -0.09754593 -0.11556031
   0.98849916
4 bmp-gedreht-Klein/Loewenkopf_klein_0003.bmp -0.14730124 -0.016368905
   0.9889562

```

---

```

239 bmp-gedreht-Klein/Loewenkopf_klein_0238.bmp 0.84473616 -0.53035885 0.0716961
240 bmp-gedreht-Klein/Loewenkopf_klein_0239.bmp 0.68151927 -0.7288655 0.06547195
241 bmp-gedreht-Klein/Loewenkopf_klein_0240.bmp 0.5131325 -0.8559397 0.06373645

```

---

**Aufistung 3.1:** Ausschnitt eines Light Position Files. Es besteht aus allen Dateipfaden der Ausgangsfotos und der jeweiligen Lampenposition.

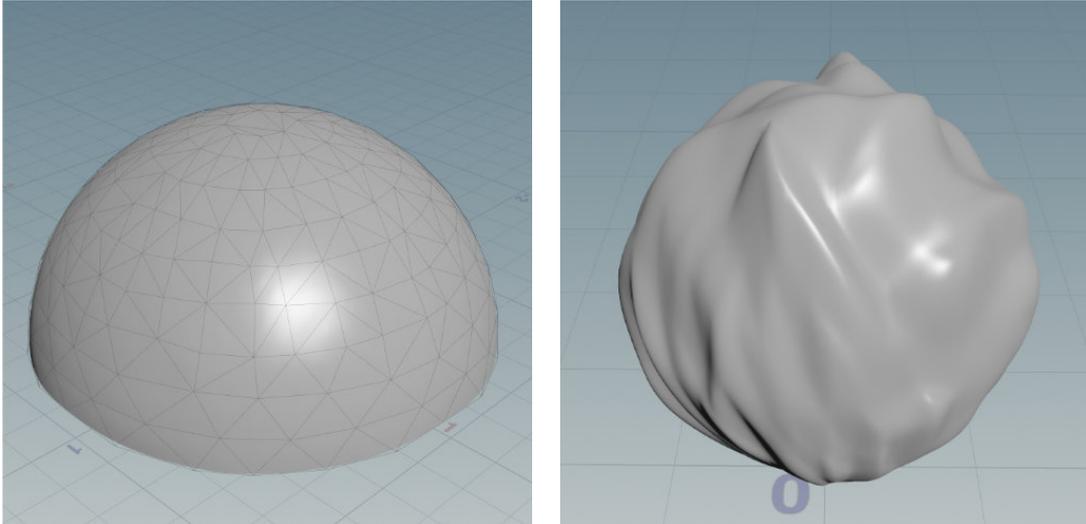
Die Positionen der Lampen werden zur Generierung einer Geometrie verwendet bei der jeder Vertexpunkt eine Lampe und damit eine Lichtrichtung verkörpert. Um eine Geometrie zu erhalten, müssen Vertex Verbindungen festgelegt werden um Polygone zu bilden. Die Anzahl der Vertices eines Polygons definiert eine wichtige topologische Eigenschaft und damit die Möglichkeiten topologische Algorithmen anzuwenden. Zum Beispiel dürfen bei einer Geometrie, auf die ein Loop Subdivision Algorithmus angewendet werden soll, Polygone nur aus drei Vertices gebildet sein. Eine solche Geometrie, wie sie in Abbildung 3.4a zu sehen ist, wird als Trimesh bezeichnet und eignet sich durch seine Einfachheit für die Anwendung in GRTI sehr gut.

Die Erstellung der Vertexverbindungen kann entweder händisch geschehen oder auch über die Anwendung von Mesh Generierungs Algorithmen<sup>5</sup>. Ein Vorteil der händischen Erstellung ist eine höhere Kontrolle über die entstehende Topologie.

Nachdem die Lampenpositionen verarbeitet wurden, erhält man die grundlegende domförmige Geometrie, aus der die Helligkeits Lobes gebildet werden. In dem jeweiligen Lobe wird die Intensität jedes Pixels in Abhängigkeit der Lichtrichtung kodiert. Jede Vertexposition wird mit der jeweiligen Pixelhelligkeit des korrespondierenden Ausgangsbildes skaliert. Dafür werden die Helligkeitswerte aus den Ausgangsbildern normalisiert und die kartesischen Koordinaten des Vertex damit multipliziert. Somit erhält man einen Lobe, wie er in Abbildung 3.4b zu sehen ist. Dabei entspricht der Oberflächenabstand zum Ursprung (skaliertes Radius der Ausgangsgeometrie), dem Helligkeitswert der jeweiligen Lichtrichtung.

Wenn für jeden Farbkanal jedes Pixels ein Lobe generiert wurde, werden diese gesammelt abgespeichert. Das entspricht dem vollen Informationsgehalt der Ausgangsbilder, da zu diesem Zeitpunkt noch keine Komprimierung stattgefunden hat.

<sup>5</sup> Algorithmen die aus einer gegebenen Menge Vertices eine Geometrie mit Vertexverbindungen generiert. Zum Beispiel Quickhull Algorithmus näher beschrieben in Kapitel 4.2.



(a) Die aus den Lichtpositionen konstruierte Dom Geometrie welche als Basis der Lobes dient. Jedes Polygon wird aus drei Vertexpunkten gebildet und ist damit ein Trimesh. (b) Ein Lobe nachdem die Intensitätswerte abhängig der Lichtrichtung auf die Ausgangs Dom Geometrie angewendet wurden.

**Abbildung 3.4:** Ausgangs Lobe Geometrie und ein daraus entstandener Lobe.

Der Speicherbedarf des vollen RTI Datensatzes ist in den meisten Fällen durch seine Größe ineffizient und unerwünscht. Daher bietet das Vorgehen an dieser Stelle die Möglichkeit die Menge an gespeicherten Vertexpunkten zu reduzieren. Mit speziellen Algorithmen, welche sich die topologischen Eigenschaften der Lobe Geometrie zunutze machen, kann die Anzahl der Lobe bildenden Vertices reduziert werden, ohne deren Form stark zu ändern. Ein Beispiel dafür ist die Anwendung von Reverse Subdivision Algorithmen, wie in Kapitel 2.7 beschrieben.

Eine weitere Möglichkeit ist es, eine völlig neue Geometrie mit Remeshing Algorithmen<sup>6</sup> zu generieren, oder ein Subdivision Surface<sup>7</sup> zu fitten[15].

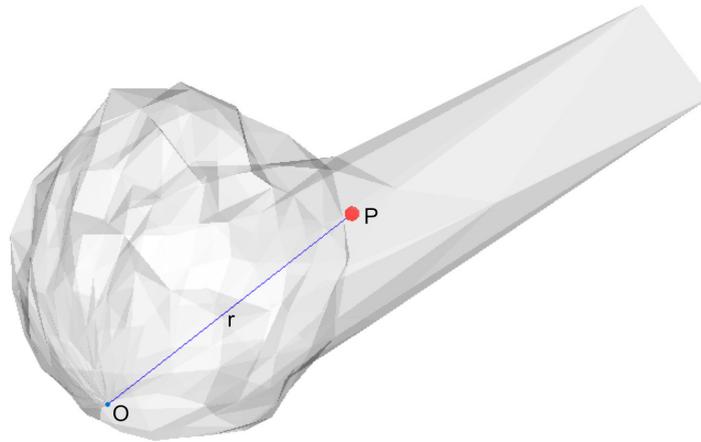
Eine individuelle Anpassung der jeweiligen Lobe-Geometrien ist möglich, da für die spätere Darstellung der Oberfläche, nur der Radius des Lobes zu einer entsprechenden Lichtrichtung ausgelesen wird und dabei die Topologie der Geometrie keinen Einfluss hat. Zusätzlich spielt die Anzahl der Vertices nur einen geringen Einfluss auf die Qualität des RTI Datensatzes. Einen größeren Einfluss spielt die Möglichkeit einer lokalen Anpassung um Extremwerte und hochfrequente Intensitätsänderungen zu repräsentieren.

Zur Darstellung einer neuen Lichtrichtung wird für jeden Farbkanal jedes Pixels der entsprechende Lobe aus den zwischengespeicherten Daten geladen. Der Abstand der Lobe Oberfläche zum Ursprung entspricht dem Helligkeitswert einer entsprechenden Lichtrichtung. Dieser kann ausgelesen werden, indem der Schnittpunkt eines Lichtstrahls zwischen

<sup>6</sup> Remeshing beschreibt das Generieren neuer Vertices und Polygone, die möglichst genau eine ursprüngliche Form repräsentieren.

<sup>7</sup> Ein Subdivision Surface ist der Grenzwert einer unendlichen rekursiven Anwendung eines Subdivision Algorithmus auf eine Ausgangsgeometrie.

Beleuchtungsrichtung und Ursprung, mit der Lobe Geometrie berechnet wird. Der Abstand des Schnittpunktes zum Ursprung entspricht dem Radius der Lobe Geometrie und damit der Pixelintensität der zu berechnenden Lichtrichtung.



**Abbildung 3.5:** Helligkeitsabfrage durch Schnittpunkt Berechnung. Der Radius  $r$ , also die Distanz zwischen Ursprung  $O$  und dem Schnittpunkt  $P$  auf der Lobe Oberfläche beschreibt, die Intensität der Lichtrichtung  $\overline{PO}$ .

Sind alle Schnittpunkt- und Abstandsberechnungen abgeschlossen, werden die dadurch ermittelten Werte als Bild dargestellt. Zusätzlich können über die Kenntnis der Oberflächennormalen (siehe Kapitel 3) Shader angewandt werden, welche in Abhängigkeit der Normalenrichtungen zum Beispiel spekulare Glanzlichter hervorheben. Der Einsatz von Shadern zur Generierung von Falschfarbdarstellungen des Datensatzes, ermöglicht es Feinheiten der Oberflächenstruktur sichtbar zu machen, die unter natürlichen Beleuchtungsbedingungen nur schwer zu erkennen sind. Dieses verhältnismäßig leicht zugängliche Verfahren ermöglicht Wissenschaftlern vorher ungesehene Details in Forschungsobjekten zu entdecken und zu dokumentieren.

## 3.5 Einsatzgebiete

### Archäologie

Von Anbeginn hat RTI in der Archäologie große Beliebtheit gefunden. Schon in der ersten Veröffentlichung schrieb Malzbender, “We have found these particularly useful in the study of ancient archeological clay and stone writings [16].“

Anfänge wurde mit portablen Gegenständen gemacht. Diese können einfach in einer Lightstage aufgenommen werden. Man begann Münzen, tragbare Felsenkunst, Keilschrift, Epigraphie, und Schriftstücke mittel RTI zu untersuchen.

Fotografische Methoden bieten hierbei den Vorteil, dass das zu untersuchende Objekt nicht berührt werden muss und somit die Gefahr von Beschädigung bei der Untersuchung minimiert wird. Außerdem kann der gewonnene Datensatz auf einfache Art Menschen zugänglich gemacht werden, die keinen physischen Zugang zum Untersuchungsgegenstand haben. RTI zeigt kleinste Oberflächendetails die mit herkömmlicher Fotografie nicht sichtbar werden. Das vereinfacht nicht nur die Publikation von Referenzabbildungen, sondern findet auch in der analytischen Erforschung von feinsten Oberflächendetails Anwendung. Insbesondere bei der Erforschung von Inschriften in verschiedensten Materialien, wie prähistorische Felsbildkunst verbessert RTI traditionelle Verfahren wie Raking Light Fotografie<sup>8</sup>. Die Erforschung von Steinartefakten und Münzen profitiert sehr von kleinen Selbstbau Light Domes, die durch die Verwendung von LEDs und Hobby Mikrocontrollern sehr kostengünstig hergestellt werden können[29, 31].

Das Cultural Heritage Institute (CHI) setzt sich stark dafür ein, RTI für die Bewahrung und Digitalisierung von Kulturschätzen zu verbreiten. Das CHI arbeitet mit Experten vieler Disziplinen zusammen, um die Anwendung von RTI für viele Wissenschaftler einfach zugänglich zu machen. Es werden Software, Dokumentationen und Workshops bereit gestellt [22, 24].

### **Highlight Reflectance Transform Imaging**

Highlight RTI ermöglicht auch größere Objekte wie ganze Felsenkunstplatten, Sarkophage und Teile von Architektur mit Hilfe von Highlight RTI aufzunehmen. Bei einem Highlight RTI wird die Light Stage durch eine portable Lichtquelle ersetzt, mit der das Objekt händisch aus vielen Lichtrichtungen abfotografiert wird. Um einen gleichmäßigen Abstand zum Objekt zu halten, dient als Referenz meist ein zwischen Objekt und Lichtquelle gespannter Faden (Abbildung 3.6).

### **Kunst und Museen**

Museen und Restauratoren fertigen RTI Aufnahmen in längeren zeitlichen Abständen an, um natürlichen Zerfall zu beobachten und um rechtzeitig mit Konservierungs- und Rekonstruktionsverfahren eingreifen zu können. Aufnahmen die vor und nach der Ausgabe einer Leihgabe angefertigt wurden, bieten die Möglichkeit Kunstschatze auf eventuellen Schäden zu untersuchen. Auch interaktive Installationen mit Echtzeitwiedergabemöglichkeiten von RTI Aufnahmen können in Museen Besuchern einen intimeren Zugang zu Exponaten geben. Dies bietet sich vor allem bei Objekten an, deren Oberfläche erst durch die Veränderung des Lichteinfalls zur Geltung kommen.

---

<sup>8</sup> Fotografische Aufnahmen mit sehr flacher Beleuchtung, um durch Selbstbeschattung Details sichtbar zu machen.



**Abbildung 3.6:** Aufnahme eines Highlight RTI. Die Kamera wird an einer festen Stelle aufgestellt und die unterschiedlichen Lichtrichtungen werden nach der Repositinierung der Lichtquelle aufgenommen. Ein Faden dient als Hilfe um gleichmäßigen Abstand zum Objekt bei jeder Aufnahme zu halten [24].

## Computer Grafik

Ein Teilbereich der Computer Grafik ist die Visualisierung von realen Objekten. Oftmals als Alternative zur Fotografie oder um Darstellungen von nicht existierenden Objekten anzufertigen. Diese Anwendungen profitieren von einer möglichst realistischen Wiedergabe von Oberflächeneigenschaften.

RTI bietet mit interaktiven digitalen Bildern die Möglichkeit dem Betrachter einen genauen Eindruck über die Haptik einer Objektoberfläche zu vermitteln. Zum Beispiel ermöglicht es einem Hersteller oder Verkäufer interaktive Bilder mit veränderbarer Beleuchtung auf seiner Internetseite einzubinden. Eine andere Anwendungsmöglichkeit sind interaktive Galerien auf Tablet Computern. Hierbei ermöglichen Touchscreens dem Betrachter eine intuitive Bedienung und erlauben somit einen vertrauten Zugang zu virtuellen Objekten. In Museen und Galerien erlaubt dass, dem Publikum eine intime Betrachtung von Exponaten ohne mit diesen in Berührung zu kommen.

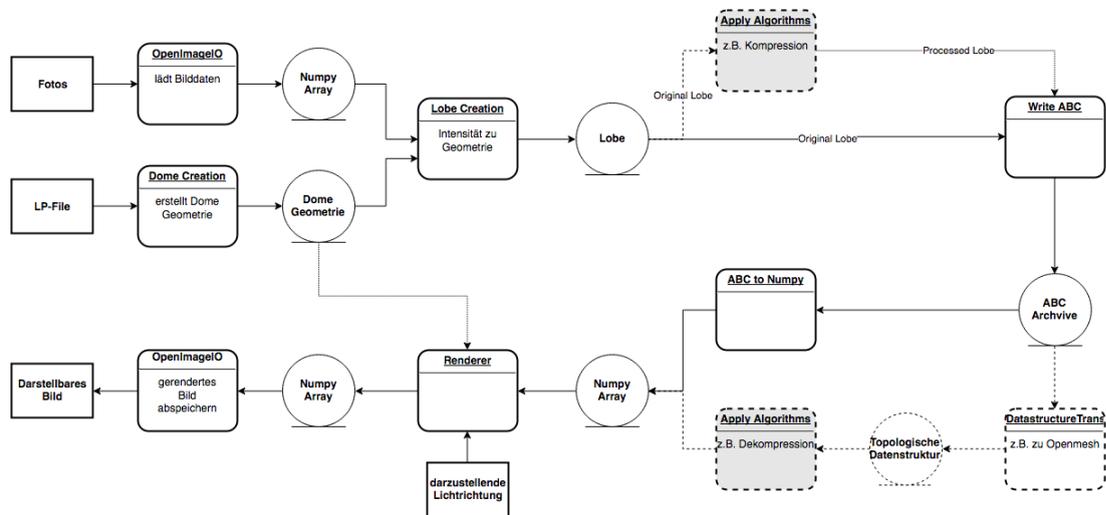
Virtual Reality (VR) Applikationen versuchen den Betrachter in eine künstlich generierten Welt zu versetzen. Die Überzeugungskraft dieser Simulation ist maßgeblich von der Erscheinung der visuell wahr genommenen Umgebung abhängig. Die Erfahrung des Menschen über die Interaktion von Licht mit Oberflächen definiert die Glaubhaftigkeit einer mit Virtual Reality erfahrenen Welt. Daher ist es von immenser Wichtigkeit für

VR Möglichkeiten zu finden realistische Oberflächen mit natürlicher Lichtinteraktion darstellen zu können. Das größte Defizit ist hierbei im Moment die Generierung von realistischen Spiegelungen und Glanzlichtern, da diese in den meisten Echtzeit Render Engines, durch die Annäherung mit allgemeinen Reflexionsmodellen, mit eingeschränkter Anpassbarkeit, berechnet werden.

## Kapitel 4

# Pipeline für den Geometric Transform Imaging Workflow

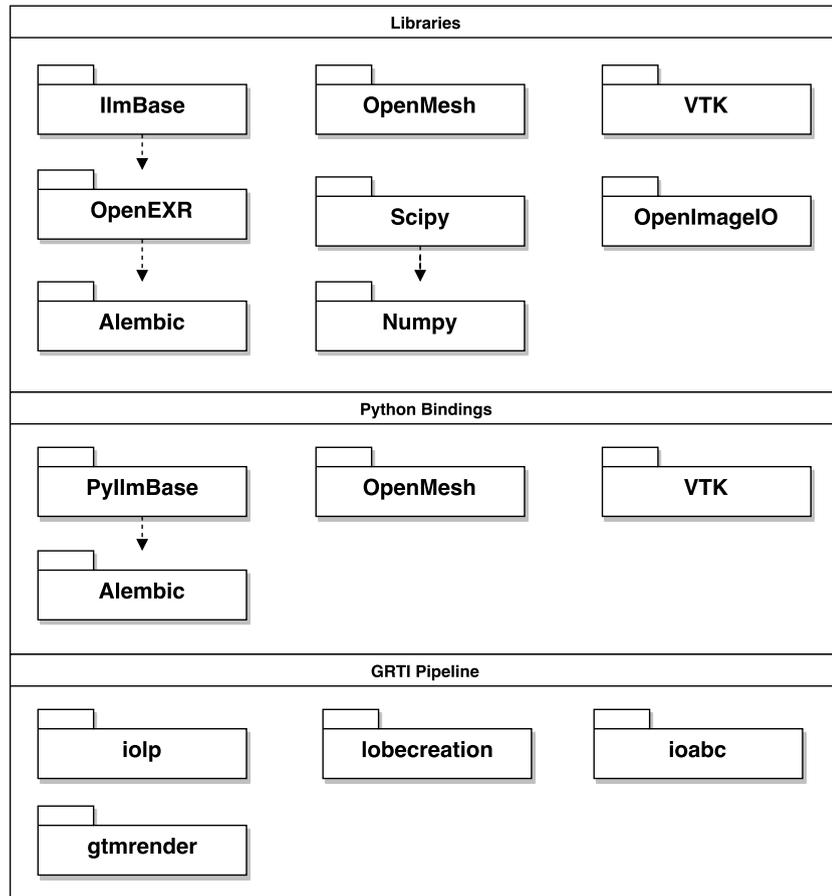
Im Folgenden wird beschrieben, wie die Implementierung einer Pipeline für RTI Anwendungen in dieser Arbeit aussieht. Dabei wird sich am in Kapitel 3 beschriebenen Vorgehen orientiert. Als Erstes findet eine Beschreibung der verwendeten Bibliotheken statt. Daraufhin folgen die einzelnen Schritte der GRTI Pipeline. Begonnen wird mit dem Auslesen der Ausgangsdaten.



**Abbildung 4.1:** Flussdiagramm der Vorgehensweise des Geometric Transform Imaging Workflows. Elemente mit gestrichelten Linien sind mögliche Erweiterungen des Verfahrens. Als Erstes werden aus Bilddaten und Lampenpositionen die Intensitäts Lobes erstellt. Danach können diese verarbeitet und zwischengespeichert werden. Zur Generierung neuer Lichtsituationen werden die Bildinformationen aus den Lobes wieder ausgelesen und dargestellt.

Da viele Arbeitsschritte bei der Erstellung einer Pipeline zum Rendern von Bildern gängige Vorgehensweisen in der Computer Grafik sind, existieren für viele Aufgaben

spezialisierte Bibliotheken. Diese sind, um möglichst effizient zu arbeiten, meist in C++ oder C geschrieben. Die praktische Umsetzung dieser Arbeit wurde allerdings in Python realisiert. Dies war möglich, da die verwendeten Libraries Python Bindings bieten.



**Abbildung 4.2:** Die Codebasis besteht aus drei Teilen. Der erste sind die verwendeten Bibliotheken und ihre Abhängigkeiten. Der zweite sind die Python Bindings für nicht native Bibliotheken. Der dritte Teil sind die GRTI Python Module.

- **Python**, wurde als Programmiersprache gewählt, da sie sich sehr gut für die Entwicklung von Prototypen eignet und in der Computer Grafik Industrie sehr verbreitet ist. Große Visual Effects Firmen wie beispielsweise Industrial Light and Magic (ILM) haben in den neunziger Jahren Alternativen für Unix Shell Scripting gesucht. Python hat sich im Vergleich mit anderen Skriptingsprachen durchgesetzt und konnte sich durch ihre steile Lernkurve schnell weiter verbreiten. Daher wurden viele Bibliotheken, welche in der Computer Grafik Anwendung finden für Python bereitgestellt.
- Die Python-Bibliotheken **SciPy** und **Numpy** erweitern Python um viele fundamentale mathematische Funktionen für wissenschaftliche Anwendungen. Im Speziellen bietet Numpy eine effiziente Implementierung von mehrdimensionalen Arrays

und Operatoren. Numpy Arrays bieten die Grundlage zur Zwischenspeicherung von Informationen während der Laufzeit in der Umsetzung der GRTI Pipeline.

- **OpenImageIO (OIIO)** ist eine Farbmanagement-Lösung die in der VFX und 3D Animationsbranche Anwendung findet. Mit OIIO lässt sich ein einheitliches Farbmanagement zwischen verschiedenen Softwarepaketen erstellen. Es wurde von Sony Picture Imageworks entwickelt und 2010 veröffentlicht. In dieser Arbeit wird OIIO zur Dekodierung und Codierung von Bilddateien verwendet. Es unterstützt eine Vielzahl an Dateiformaten und lässt sich einfach zu Numpy Arrays konvertieren.
- **OpenMesh** ist eine Library, die eine Datenstruktur und Funktionen zur Verwaltung und Manipulation von Geometriedaten bereit stellt. OpenMesh verwendet eine Halfedge Datenstruktur um polygonale Geometrien zu beschreiben. In dieser Arbeit bietet OpenMesh eine Datenstruktur für Geometrie, die einen einfachen Zugriff auf Nachbarschaftsinformationen bietet.
- **The Visualization Toolkit (VTK)** ist ein Open-Source Softwarepaket mit Bibliotheken für 3D Computergrafik-, Bildbearbeitungs- und Visualisierungsanwendungen. Es basiert auf einem C++ Core und stellt Interfaces für Tcl/tk, Java und Python bereit. VTK hat ein breites Spektrum an Visualisierungs Algorithmen für Volumeninformationen und Geometrie integriert. In dieser Arbeit wird es zur Schnittpunkt Berechnung von Geometrie verwendet.
- **Alembic** bietet ein einheitliches Dateiformat für den Austausch von zwischengespeicherten Szenedaten zwischen verschiedenen 3D Software Paketen und deren proprietär Datenstrukturen. Eine detaillierte Beschreibung dieses Datenformates wurde in Abschnitt 2.6 gegeben. Alembic Files werden zur Datenspeicherung der GRTI Datensätze verwendet.

## 4.1 Laden der Ausgangsbilder

Die Akquise der Bilddaten und das Erstellen eines Light Position Files (LP File) wurden im Rahmen dieser Arbeit in Kapitel 3 behandelt. Die Bilddaten liegen in üblichen Bildformaten wie JPEG oder TIF Dateien vor. Sie bieten die Grundlage für die weiteren Behandlungen in dieser Arbeit. Die Einzelbilder müssen deckungsgleich und in ihrer Auflösung identisch sein. Das LP File stellt die Verbindung zwischen einzelnen Aufnahmen und deren Lichtposition her.

Im ersten Schritt werden aus dem Light Positioning File die Verknüpfungen der Bilddaten und zugehörigen Lichtpositionen ausgelesen und in zwei Listen abgelegt. Das LP File definiert die Reihenfolge in welcher die Bilddaten in allen weiteren Schritten verarbeitet werden. Die Reihenfolge wird beibehalten, da es die Ablage von Informationen in

Listen erleichtert. Es kann so über einen einheitlichen Listenindex auf die Informationen einer Lichtrichtung zugegriffen werden.

Für das Lesen wurde in **Python** das Comma Separated Values (CSV) Modul verwendet. Alle Bilder werden nun nacheinander mit **OpenImageIO** geöffnet und in einem Mehrdimensionales **Numpy** Array zusammengeführt. Es hat demnach die Form,

$$A = n \times x \times y \times c = (a_{nxyz}) \quad (4.1)$$

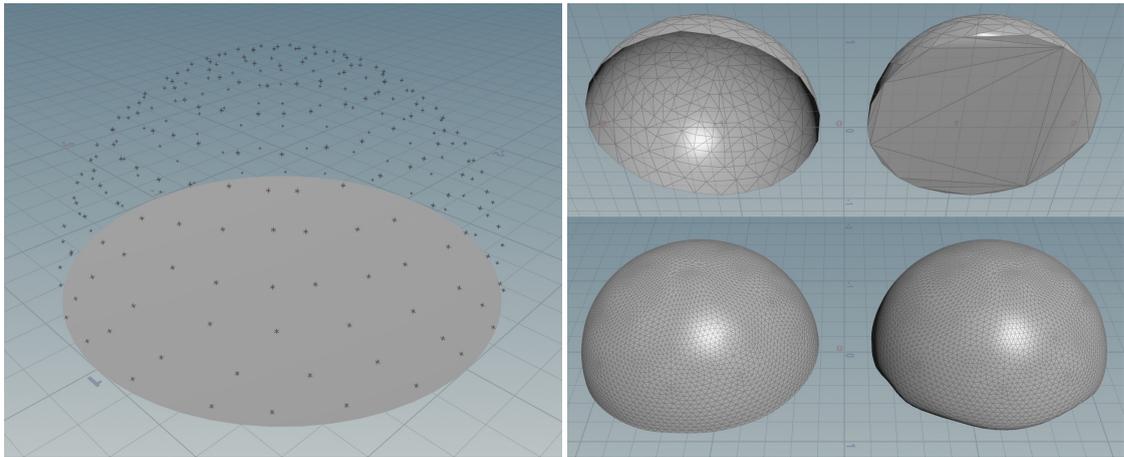
wobei  $n$  der Anzahl aufgenommener Lichtpositionen und damit die Menge geladener Bilder entspricht.  $x$  ist die Bildbreite in Pixeln,  $y$  die Bildhöhe und  $c$  Anzahl der Farbkanaäle, in der Regel drei für RGB. Diese Datenstruktur wurde für alle Arbeitsschritte verwendet, bei denen Zugriff auf den gesamten Datensatz nötig ist.

## 4.2 Meshing

Aus den 240 Lampenpositionen die aus dem LP File ausgelesen wurden, wird eine Dom Geometrie erstellt, bei der jeder Vertex eine Lampenposition in der Light Stage repräsentiert. Die Lampenpositionen liegen vorerst nur als Punktdaten vor. Um allerdings topologische Algorithmen anwenden zu können, müssen die Punkte verbunden und ein trianguliertes Mesh gebildet werden.

Dafür wird mit OpenMesh eine neue Geometrie erstellt. Diese wird als ein, ausschließlich aus dreieckigen Polygonen bestehenden, TriMesh definiert. Die einheitliche Vertexanzahl jedes Polygons erleichtert in späteren Schritten topologische Algorithmen anzuwenden. Die Vertexpunkte der Dom Geometrie werden mit den aus dem LP File ausgelesenen Lampenpositionen initialisiert. Es folgt die Verbindung der einzelnen Vertexpunkten zu einer Geometrie. Eine Möglichkeit dafür ist, alle Punkte auf die Grundebene zu projizieren und darauf eine Delaunay Triangulierung anzuwenden[1, 2]. Dabei werden drei Punkte zu einem Dreieck verbunden, wenn ein Kreis gebildet werden kann auf dem alle drei Punkte liegen und kein weiterer Punkt von diesem umschlossen wird.

Eine Variante davon ist der Quickhull [8] Algorithmus der eine schnelle Berechnung in N-Dimensionen bietet. Topologische Algorithmen verhalten sich oftmals bei umschlossenen Vertexpunkten anders als bei Vertexpunkten an Rändern einer Fläche. Das ist, wie in Abbildung 4.3b, bei dem Loop Subdivision Algorithmus der Fall. Es kommt bei fehlenden Border Edges zu einer Deformierung der Dom Geometrie an der unteren Lampenreihe. Um dies zu vermeiden, müssen die Polygone und Kanten an der Unterseite der Geometrie gelöscht und die unteren Kanten als Borderedges definiert werden. Dies ist nötig, da der Quickhull Algorithmus ein geschlossenes Volumen berechnet. Die Entfernung der Polygone kann abhängig vom Normalenvektor vorgenommen werden.



(a) Alle Lichtpositionen der Lightstage

(b) **L**inks sind die Polygone an der Unterseite gelöscht. **R**echts fehlen die Boundary Edges. **U**nten sieht man die Auswirkung nach der Anwendung des Loop-Subdivision Algorithmus.

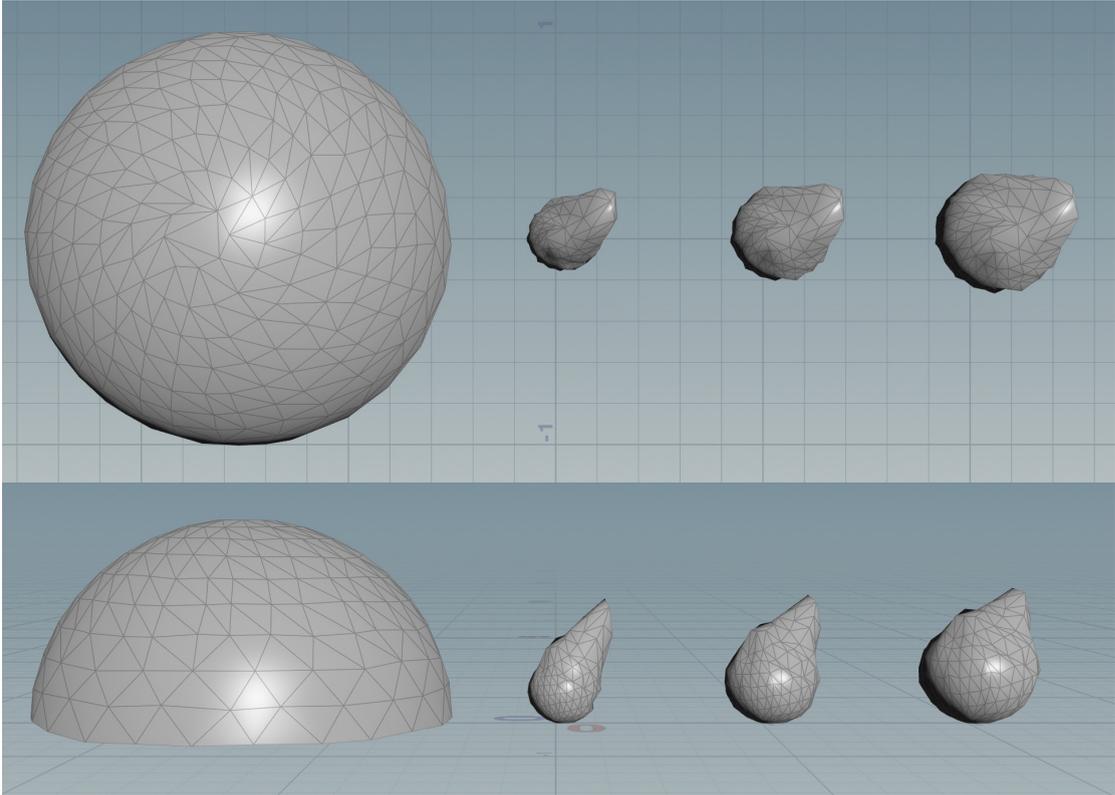
**Abbildung 4.3:** In Abbildung 4.3a sind die Ausgangspunkte für das Generieren der Geometrie eingezeichnet. Abbildung 4.3b zeigt die fertige Dom Geometrie und die Auswirkung fehlender Boundary Edges.

### 4.3 Lobe Generierung

Als nächsten Schritt werden die Helligkeitswerte der Pixel, abhängig von der Lichtrichtung, in ein Mesh umgewandelt. Dieses Mesh wird als Lobe bezeichnet und wird für jeden Pixel pro Farbkanal generiert. In diesem sind die Intensitätswerte aus jeder aufgenommenen Beleuchtungsrichtungen kodiert. Dafür wird die Position, jedes Vertex der Dom Geometrie in Kugelkoordinaten, mit der Lichtintensität multipliziert. Für jeden Farbkanal eines Pixels erhält man somit einen Lobe, welcher die Intensitätswerte der aufgenommenen Lichtrichtung beinhaltet. Die Distanz eines Vertices zum Ursprung beschreibt hierbei die Helligkeit des Pixels bei Beleuchtung aus entsprechender Lichtrichtung.

In Abbildung 4.4 sind die drei Lobes eines RGB Pixels abgebildet. Der Extremwert ist ein spekulares Glanzlicht in den Ausgangsbildern. Nach unten hin verzüngen sich alle drei Lobes stark. Dies ist durch die geringe Beleuchtungsintensität bei flach einfallendem Licht bedingt.

Für eine Aufnahme mit Ausgangsbildern von  $x$  Pixel Kantenlänge werden  $3 \times x^2$  Lobes erstellt. Diese werden in einem Alembic Archiv gespeichert. Jeder Farbkanal als einzelnes Objekt, wobei jede Pixelkoordinate in den Ausgangsfotos einem zeitliche Sample entspricht. Somit sind das in diesem Beispiel, drei Objekte mit jeweils  $x^2$  zeitlichen Samples. Dazu wird der Ausgangs Dom mit einem einzigen Sample als Referenz beigelegt. Mit diesem Schritt wurden die aufgenommenen Rohdaten in eine geometrische Darstellung überführt.



**Abbildung 4.4:** Die ursprüngliche Dom Geometrie, und Lobes aus den RGB Werten eines Pixels aus zwei Ansichten.

## 4.4 Topologische Operatoren

Da nun die RTI Aufnahme als Geometrie Daten vorliegen, bietet das Vorgehen an dieser Stelle die Möglichkeit topologische Algorithmen auf die Geometrie der Lobes anzuwenden. Hier kann zum Beispiel eine Datenkompression auf Basis von Reverse Subdivision Algorithmen angewendet werden [19]. Dabei wird die Vertex Anzahl verringert und somit sinkt die abzuspeichernde Menge an Informationen. Da Subdivision Algorithmen und ihre Umkehr nach einem speziellen Muster vorgehen, kann die Kompression mit geringem Verlust an Informationen bei der Darstellung dekomprimiert werden [23].

## 4.5 Darstellung

Um die in einem Alembic File gespeicherten RTI Daten wieder in Bildform darzustellen, muss aus jedem Lobe der Intensitätswert für die entsprechende Lichtrichtung entnommen werden. Der Intensitätswert ist der Radius des Lobes bei einer bestimmten Lichtrichtung,  $\theta, \phi$  in sphärischen Koordinaten.

Die einzige Information, welche aus der Geometrie abgefragt werden kann, sind kartesische Koordinaten der Vertices und die daraus gebildeten Polygone. Um nun die Distanz

zwischen dem Ursprung und der Oberfläche eines Lobes zu erhalten, muss der Schnittpunkt des Lichtrichtungsvektors mit der Oberfläche der Geometrie bestimmt werden. Dafür wird eine Gerade vom Ursprung aus in Richtung der Lichtrichtung definiert und der Schnittpunkt dieser Gerade mit der Ausgangs Dom Geometrie berechnet.

Es gilt hier drei Fälle zu unterscheiden:

1. Der Schnittpunkt liegt genau auf einem Vertex. Zurückgegeben wird eine Vertex ID mit Gewichtung 1.
2. Der Schnittpunkt liegt auf einer Kante zwischen zwei Vertices. Zurückgegeben werden zwei Vertex IDs und zwei Gewichtungen.
3. Der Schnittpunkt liegt in einem Polygon. Da die Lobegeometrie nur aus Dreiecken besteht, werden die drei Vertex IDs des Polygons, mit den barizentrischen Koordinaten des Schnittpunkts als Gewichtung zurückgegeben.

Die Funktion liefert dabei, die barizentrischen Koordinaten des Schnittpunktes abhängig von den polygonbildenden Vertices, zurück.

Mittels der Schnittpunktberechnung erhält man die barizentrischen Koordinaten des gesuchten Punktes auf dem Polygon. Das ermöglicht die Interpolation einer Lichtrichtung die nicht in den Ausgangsbildern aufgenommen wurde. Mit den gewonnenen Informationen, den Vertex IDs und den barizentrischen Koordinaten, können nun die benötigten Vertexpositionen ausgelesen werden. Um den Intensitätswert eines Vertex abzufragen, muss dessen Abstand zum Ursprung bestimmt werden. Dieser entspricht dem Betrag seiner kartesischen Koordinaten. Die entsprechenden Helligkeitsinformationen können nun, unter Zuhilfenahme der barizentrischen Koordinaten, interpoliert werden und man erhält den Intensitätswert der gesuchten Lichtrichtung. Die errechneten Intensitätswerte können nun zwischengespeichert und als Bilddatei abgelegt werden. Alternativ können die berechneten Gewichtungen und Vertex IDs auch an einen Shader weitergegeben werden, welcher die Intensitätsberechnung und Darstellung des gerenderten Bilds übernimmt.

## Kapitel 5

# Ergebnisse und Vergleich zu PTM

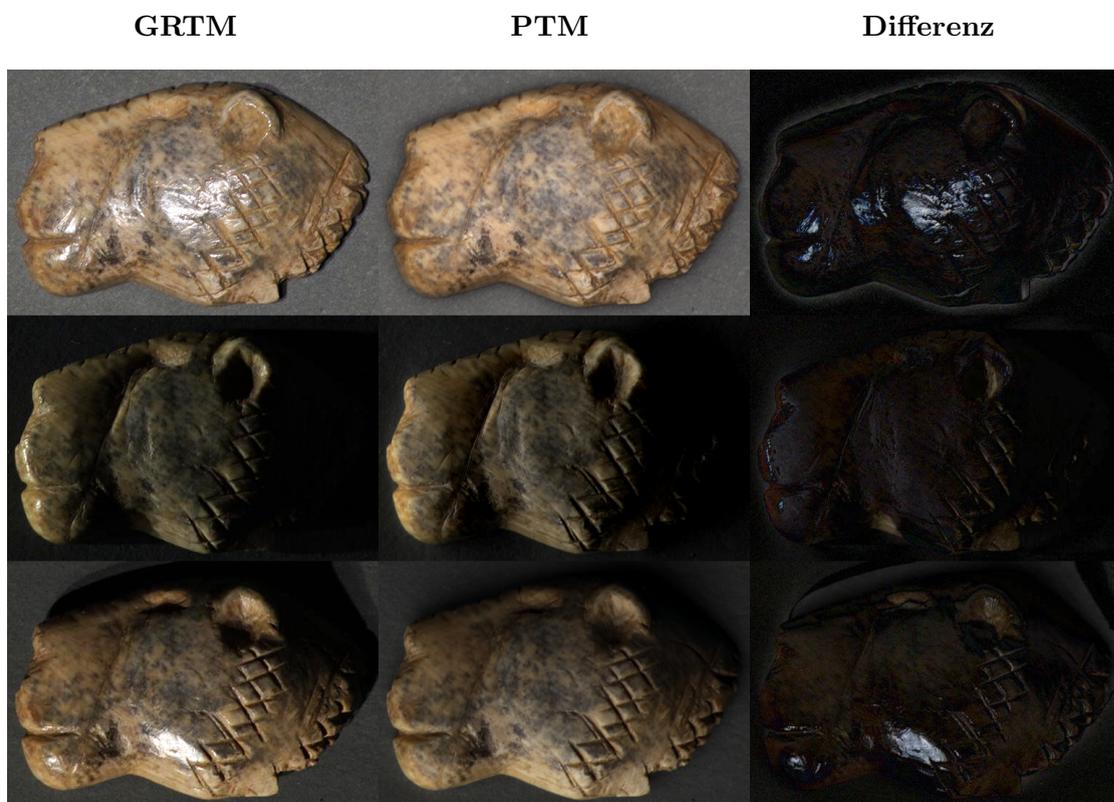
Das Ergebnis dieser Arbeit ist ein neuer RTI Workflow und dessen Umsetzung. Der gewählte Ansatz vermeidet die Nachteile, wie Verlust von Glanzlichtern, des traditionellen PTM Verfahrens. Die Speicherung der Informationen in Form von Geometrie ermöglichen neue Ansätze zur Verarbeitung und Komprimierung von RTI Datensätzen.

Für die Umsetzung wurde eine Pipeline entwickelt, welche vorhandene Fotografien aus einer Light Stage zu einem GRTI Datensatz umwandelt und diesen darstellt. Hierfür werden alle Fotos eingelesen und mit Kenntnis über die originalen Lampenpositionen zu geometrischen Lobes umgewandelt. Die generierten Lobes werden in einem Alembic File gesammelt und als GRTI Datensatz abgespeichert. An dieser Stelle bietet die Pipeline die Möglichkeit den Datensatz weiter zu bearbeiten und zum Beispiel eine Kompression vorzunehmen. Der GRTI Datensatz beinhaltet alle Informationen, um die aufgenommene Oberfläche unter einer beliebigen Beleuchtungssituation wiederzugeben.

Für die Darstellung einer neuen Lichtrichtung, werden die Helligkeitsinformationen aus dem Alembic File ausgelesen. Abhängig der darzustellenden Lichtrichtung werden die Intensitätswerte für jeden Farbkanal jedes Pixels ausgelesen und gesammelt. Die gesammelten Werte werden als Bilddatei abgespeichert und können nun zur Visualisierung des aufgenommenen Objekts, unter einer neuen Lichtrichtung, verwendet werden.

Die Umsetzung des GRTI Verfahrens mit einer experimentellen Python Pipeline ermöglicht einen Vergleich mit PTM. Dabei werden sowohl die durch GRTI und PTM erstellten Datensätze als auch die Darstellung einer neuen Lichtrichtung verglichen.

## Vergleich zu PTM



**Abbildung 5.1:** Vergleich von GRTI und PTM. Die Abbildungen in der linken Spalte sind aus einem GRTI Datensatz generiert. Die mittlere Spalte sind PTM Ergebnisse und in der rechten Spalte ist der Unterschied beider Verfahren visualisiert. Für die oberere Reihe wurde eine Lichtrichtung nah zur Blickrichtung gewählt, um die Fläche mit Glanzlichter zu maximieren. In der Mitte kommt das Licht flach von der linken Seite und verursacht eine generelle Verdunklung des Objekts. In der unteren Reihe wurde eine Lichtrichtung gewählt, die das Objekt plastisch erscheinen lässt und dabei feine Erhebungen und Senkungen der Oberfläche betont.

In Abbildung 5.1 sind drei neu generierte Lichtrichtungen aus denselben Ausgangsfotos dargestellt. In der linken Spalte sind die durch GRTI erstellten Bilder zu sehen. Bei diesen sind deutlich die Glanzlichter der lasierten Oberfläche sichtbar. Die Bilder der mittleren Spalte sind mit PTM zweiten Grades nach Malzbender [16] generiert. Deutlich zu erkennen ist der Verlust von Glanzlichtern. Was in der rechten Spalte, durch die Differenz der beiden Verfahren, visualisiert wird.

Die Reflexionen und Glanzlichter lassen das dargestellte Objekt plastischer erscheinen und geben die natürlichen Oberflächeneigenschaften besser wieder. Die spiegelnde Lasur mit der die Oberfläche behandelt wurde, ist bei GRTM durch den Erhalt der Glanzlichter deutlich zu erkennen. Diese werden durch das PTM Verfahren nicht abgebildet und lassen das Objekt dadurch matt erscheinen. Die Schatten feiner Furchen und Ritzen

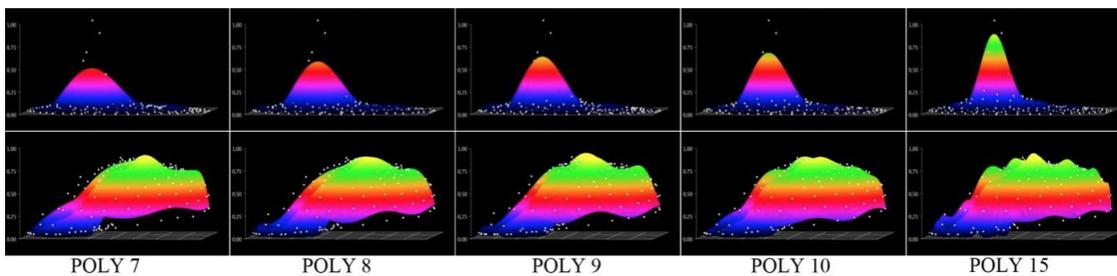
sind bei GRM dunkel und präzise, bei PTM hingegen heller. Im Allgemeinen wirken die Schatten bei PTM ausgewaschen. Daher ist es mit PTM nicht möglich eine realistische Wiedergabe der wahren Oberflächeneigenschaften zu erreichen. GRTI hingegen zeigt die Möglichkeit, ausreichend genaue Informationen zu erfassen, um ein Objekt unter synthetisierter Beleuchtung, realistisch darstellen zu können.

Der unkomprimierte GRTI Datensatz erfasst 240 Werte für jeden Farbkanal, das entspricht einem Wert für jede Lichtrichtung bei der Aufnahme. Eine einmalige Anwendung eines Reverse Loops Subdivision Algorithmus verringert die Auflösung der Lobe Geometrie auf ungefähr ein Viertel der Ausgangspunkte. Damit würde ca 60 Werte für jeden Farbkanal abgespeichert.



**Abbildung 5.2:** Darstellung von PTM Ergebnissen mit steigendem Polynomgrad [25]. Mit der Erhöhung bessert sich der Erhalt von Glanzlichtern und Schatten, allerdings wird eine natürliche Abbildung des Originals nicht erreicht.

Schöll [25] hat in ihrer Arbeit *Untersuchung und Visualisierung von Basisfunktionen für "Reflectance Transformation Imaging"* einen Vergleich mehrerer PTM mit verschiedenen Polynomgraden angefertigt. Für eine PTM mit einer Polynomfunktion 10. Grades braucht es 66 Koeffizienten, was in etwa dem gleichen Speicherbedarf entspricht wie ein GRTI Datensatz mit einmaliger Reduzierung. Wie in Abbildung 5.2 zu sehen ist, genügt ein Polynom 10. Grades allerdings nicht um Glanzlichter realistisch wiedergeben zu können.

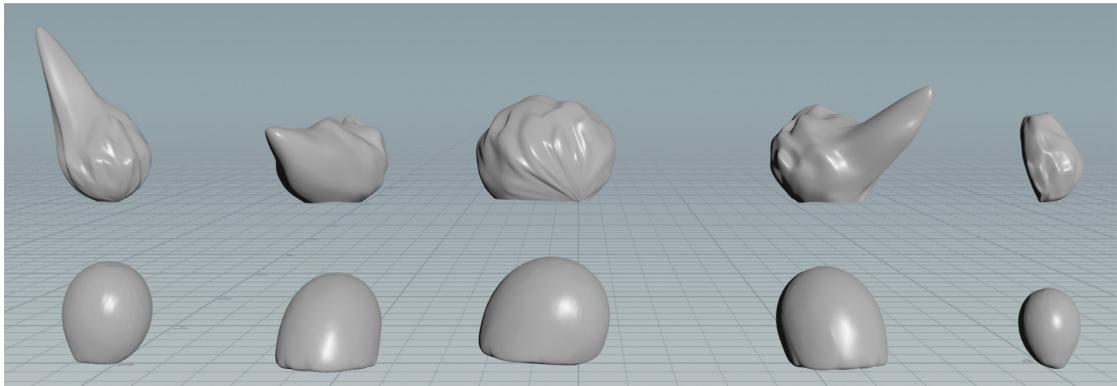


**Abbildung 5.3:** Vergleich von Highlights bei verschiedenen Polynomgraden [25]. Zur Visualisierung wurden die Lampenpositionen auf eine Ebene projiziert. Die vertikale Achse beschreibt hierbei die Lichtintensität der jeweiligen Lichtrichtung.

Schöll's Untersuchung zeigt, dass auch bei einer Erhöhung zu Polynomen 15. Grades, Highlights nicht vollständig abbilden kann. Wie in Abbildung 5.3 rechts oben zu erkennen ist, werden Extremwerte die Glanzlichter darstellen nicht vollständig erfasst. Außerdem kommt es bei zu hohem Polynomgrad zu Overfitting Artefakten, ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 5.3 rechts unten zu sehen. Bei *POLY 15* unten versucht die

angepasste Funktion jeden Messpunkt zu durchlaufen, was zu einer hohen Abweichung zum idealen Verlauf führt.

Um einen Vergleich der Lobes zwischen GRTI und einer klassischen PTM zweiten Grades zu ziehen, wurden die Ergebnisse der PTM auf die selbe Dome Geometrie projiziert, die für die Erstellung der GRTI Lobes verwendet wurde.



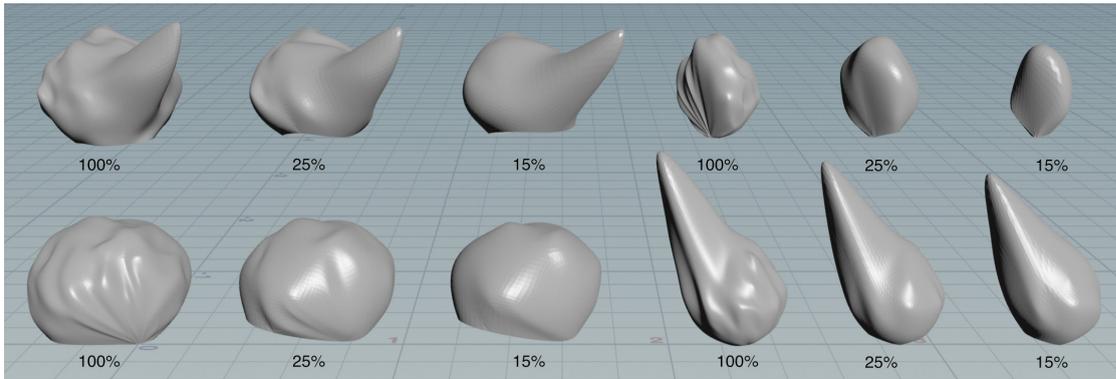
**Abbildung 5.4:** In der oberen Reihe sind GRTI Lobes abgebildet. In der unteren Reihe sind die entsprechenden PTM Lobes zu sehen. Die Lobes oben veranschaulichen den hohen Detailgrad der mit GRTI abgebildet werden kann. Die PTM Lobes der unteren Reihe zeigen den hohen Informationsverlust durch die Abbildung mit Polynomfunktionen zweiten Grades.

In Abbildung 5.4 ist der Unterschied von Glanzlichtern zwischen GRTI (oben) und PTM (unten) zu erkennen. Bei PTM (unten) werden keine Extremwerte abgebildet. Diese sind nötig um Glanzlichter der Ausgangsaufnahmen wiederzugeben. Die GRTI Lobes (oben) zeigen deutliche Spitzen für Lichtrichtungen, die ein Glanzlicht bei der Darstellung wiedergeben.

Der Erhalt von Selbstbeschattung des aufgenommenen Objekts ist wie bei dem Lobe rechts oben zu sehen mit GRTI möglich. Das ist daran zu erkennen, dass ab dem Zenit die Intensität einseitig stark abfällt. Was bei der nahezu konstanter Krümmungsänderung der PTM Lobes zu einem überschießen der Werte an der abgedunkelten Seite kommt.

Die breite Basis der PTM Lobes haben eine Aufhellung von Schatten bei flachem Lichteinfall zu Folge. Durch die Möglichkeit der stärkeren Krümmung und Krümmungsänderung bei GRTI Lobes, ist der Erhalt von Schatten verbessert.

In Abbildung 5.5 wurde eine Reduzierung der Punktzahl der Lobe Geometrie vorgenommen und diese vor der Darstellung mehrfach zur Glättung mit einem Subdivision Algorithmus unterteilt. Dies entspricht dem gleichen Vorgang, wie er zur Komprimierung von GRTI Daten Anwendung finden kann. Dabei ist ein sehr guter Erhalt von Glanzlichtern und Selbstbeschattung zu erkennen. Auffällig ist ein Schwund an Volumen der einzelnen Lobes, was eine Reduzierung der Bildhelligkeit zur Folge hat.



**Abbildung 5.5:** Zu sehen sind vier verschiedene Helligkeits Lobes mit steigender Reduzierung der geometrischen Auflösung. Jeweils links sind die originalen Lobes mit 240 Vertices (100%) abgebildet, in der Mitte reduziert zu ca 60 Vertices (25%) und rechts zu ca 35 Vertices (15%). Bei steigende Reduzierung nimmt das Volumen der einzelnen Lobes ab. Zu einem gewissen Grad gehen durch die Glättung der Lobeoberfläche auch die Extremwerte der Glanzlichter zurück.

Eine PTM Modellierung mit Polynomgrad 7 wie sie in [Abbildung 5.3](#) zu sehen ist, entspricht der gleichen Menge gespeicherten Werten, wie bei den zu 15% reduzierten Lobes aus [Abbildung 5.5](#). Ein Vergleich beider Abbildungen zeigt, dass GRTI Extremwerte besser abbildet, als PTM Grad 7. Ein ähnlicher Erhalt von Glanzlichtern ist in [Abbildung 5.3](#) erst bei Polynomgrad 15 zu erkennen, dafür müssen 136 Koeffizienten gespeichert werden.

# Kapitel 6

## Fazit

### 6.1 Zusammenfassung

Zu Beginn wurden Begriffe und Vorgehen für ein grundlegendes Verständnis von RTI eingeführt. Einblicke in Bilddaten basierendes Rendering sowie die Zuordnung von RTI mit Reflectance Transfer Functions ermöglichten eine Einordnung des vorgenommenen Themas. Kernpunkt dieser Arbeit, ist die Konzeption und Umsetzung des Geometric Reflectance Transform Imaging Workflows. Verwendet wurden dazu verschiedene in der Computer Grafik übliche Bibliotheken. Alle Vorgänge, von Verarbeitung des Ausgangsbildmaterials bis hin zur Darstellung einer synthetisierten Lichtrichtung, wurden dargestellt. Abschließend konnten mit der Pipeline GRTI Datensätze generiert und Bilder dargestellt werden. Dies ermöglicht ein Vergleich mit herkömmlichen RTI Verfahren wie PTM. An den Ergebnissen lässt sich der Erhalt von natürlichen Glanzlichtern und Details bei GRTI im Vergleich zu PTM gut erkennen.

### 6.2 Diskussion

Die Anwendung des in dieser Arbeit eingeführten GRTI Verfahrens ermöglicht eine verlustfreie Konvertierung von fotografischen Aufnahmen zu einem RTI Datensatz. Das ermöglicht eine realistische Repräsentation von Spiegelungen und Glanzlichtern die mit PTM nicht möglich ist, da diese bei dem Fitting Vorgang mit einer globalen polynomialen Basisfunktion verloren gehen. Traditionelles PTM eignet sich daher gut in Anwendungen bei denen die Diffusfarbe und formgebende Details in der Oberfläche von Interesse sind. Hierbei werden Oberflächendetails mit künstlicher Glanzlichtgenerierung bei der Darstellung sichtbar gemacht. Sind allerdings die natürlichen Reflexionseigenschaften einer Oberfläche von Interesse, müssen andere Verfahren herangezogen werden, da diese von PTM nicht abgebildet werden.

GRTI ermöglicht das Erfassen von allen natürlichen Reflexionen und Glanzlichtern in einem RTI Datensatz und kann diese realistisch wiedergeben. Der erhöhte Informationsgehalt eines GRTI Datensatzes verursacht einen erhöhten Speicherbedarf. Dieser kann reduziert werden indem die Geometrie der Lobes komprimiert ist. Hierbei können Algorithmen, die auf den topologischen Eigenschaften der Lobe Geometrie basieren, angewendet werden. Reverse Subdivision Algorithmen können hierbei den Speicherbedarf um ein Vielfaches senken und haben einen nur geringen Verlust [19, 23]. Remeshing Algorithmen, die adaptive Anpassungen an den Detailgrad der Lobe Oberfläche vornehmen, sind ebenfalls zu betrachten. Das Fitten eines Subdivision Surface erlaubt eine adaptive Unterteilung des Kontroll-Polygonnetzes bis hin zum Erreichen einer Toleranz zur originalen Lobe Geometrie [15]. Zur Vermeidung des Volumenschwundes bei einer starken Reduzierung der Lobe Geometrie, sollte eine Projizierung der Punktpositionen auf die Grundebene vorgenommen werden. Hierbei entsprechen die Polarkoordinaten auf der Ebene dem Azimut- und Polarwinkel der Lobe Geometrie. Die Höhe eines Punktes über der Grundebene entspricht der Intensität der Lichtrichtung.

Die hier vorgestellte Implementierung greift als Archivierungsformat des RTI Datensatzes auf das Alembic Dateiformat zurück. Dieses hat gewisse Probleme in Bezug auf Speicherbedarf und Zugriffszeit. Es gilt hier zu untersuchen, ob andere Dateiformate sich hinsichtlich Zugriffszeit und Speicherbedarf besser eignen. Außerdem werden die Farbinformationen im RGB Farbmodell abgespeichert. Die Konvertierung in ein YUV Farbmodell bietet die Möglichkeit Chroma Subsampling vorzunehmen. Für die menschliche Wahrnehmung spielt der Helligkeitsunterschied eine größere Rolle als Farbunterschiede. Da Glanzlichter der meisten Materialien farblos sind, kann ein unterschiedlicher Detailgrad der Luma und Chroma Lobes bei einem YUV Farbmodell weiteren Speicherplatz und Rechenzeit sparen. Da sich abhängig der Lichtrichtung hauptsächlich der Luminanzwert eines Pixels ändert, der Chroma Wert allerdings weitestgehend gleich bleibt, wäre es möglich den Chromawert mit einer Konstante zu ersetzen und nur für die sich ändernde Luminanz Lobes abzuspeichern.

Python hat eine schnelle und einfache Implementierung der Pipeline ermöglicht, ist allerdings für die parallelisierte Verarbeitung von großen Datenmengen durch lange Laufzeiten ungeeignet. Die Verwendung von Python Bindings hat die Parallelisierung der Codebase erschwert. Da die meisten verwendeten Libraries allerdings in C++ geschrieben sind, kann die Pipeline ähnlich in C++ realisiert werden.

Abschließend kann gesagt werden, dass eine realistische Wiedergabe von Oberflächen mit dem Geometric Reflectance Transform Imaging Verfahren möglich ist. Im Gegensatz zu traditionellem Polynomial Texture Mapping bleiben hierbei Reflexionen und Schatten in ihrem natürlichen Aussehen erhalten. Die beschriebenen Ansätze zur Optimierung des Verfahrens, versprechen die Möglichkeit einer Darstellung in Echtzeitanwendungen.

# Literatur

- [1] B. Delaunay, „Sur La Sphere Vide“, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk*, Jg. 7, S. 1–2, 793-800 1934.
- [2] D. T. Lee und B. J. Schachter, „Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation“, *International Journal of Computer & Information Sciences*, Jg. 9, Nr. 3, S. 219–242, 1980.
- [3] R. J. Woodham, „Photometric Method For Determining Surface Orientation From Multiple Images“, *Optical Engineering*, Jg. 19, Nr. 1, 1980.
- [4] B. D. Lucas und T. Kanade, „An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision“, in *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1981, S. 674–679.
- [5] C. Loop, „Smooth Subdivision Surfaces Based on Triangles“, University of Utah, 1987.
- [6] E. H. Adelson und J. R. Bergen, „The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision“, in *Computational Models of Visual Processing*, MIT Press, 1991, S. 3–20.
- [7] S. E. Chen, „Quicktime VR: An Image-Based Approach to Virtual Environment Navigation“, in *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM, 1995, S. 29–38.
- [8] C. B. Barber, D. P. Dobkin und H. Huhdanpaa, „The Quickhull Algorithm for Convex Hulls“, *ACM Trans. Math. Softw.*, S. 469–483, 1996.
- [9] M. Levoy und P. Hanrahan, „Light Field Rendering“, in *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM, 1996, S. 31–42.
- [10] R. Szeliski und H.-Y. Shum, „Creating Full View Panoramic Image Mosaics and Environment Maps“, in *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997, S. 251–258.

- [11] T. DeRose, M. Kass und T. Truong, „Subdivision Surfaces in Character Animation“, in *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM, 1998, S. 85–94.
- [12] P. Debevec, T. Hawkins, C. Tchou, H.-P. Duiker, W. Sarokin und M. Sagar, „Acquiring the Reflectance Field of a Human Face“, in *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000, S. 145–156.
- [13] S. B. Kang und H.-Y. Shum, „A Review of Image-Based Rendering Techniques“, Microsoft Research, Techn. Ber., 2000.
- [14] P. Debevec, „A Lighting Reproduction Approach to Live-Action Compositing“, in *ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, 2001.
- [15] N. Litke, A. Levin und P. Schröder, „Fitting Subdivision Surfaces“, in *Proceedings of the Conference on Visualization'01*, IEEE Computer Society, 2001, S. 319–324.
- [16] T. Malzbender, D. Gelb und H. Wolters, „Polynomial Texture Maps“, in *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM, 2001, S. 519–528.
- [17] M. Mudge, J.-P. Voutaz, C. Schroer und M. Lum, „Reflection Transformation Imaging and Virtual Representations of Coins from the Hospice of the Grand St. Bernard.“, in *VAST*, Bd. 6, 2005, S. 29–40.
- [18] G. Müller, J. Meseth, M. Sattler, R. Sarlette und R. Klein, „Acquisition, Synthesis, and Rendering of Bidirectional Texture Functions“, in *Computer Graphics Forum*, Bd. 24, Wiley Online Library, 2005, S. 83–109.
- [19] J. Ma, Q. Chen, B. Chen und H. Wang, „Mobile 3D Graphics Compression for Progressive Transmission over Wireless Network“, in *Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2009*, IEEE, 2009, S. 357–362.
- [20] L. Papula, *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [21] P. Debevec, „The Light Stages and Their Applications to Photoreal Digital Actors“, *SIGGRAPH Asia*, 2012.
- [22] C. Schroer, „Advanced imaging tools for museum and library conservation and research“, *Bulletin of the American Society for Information Science and Technology*, S. 38–42, 2012.
- [23] M. A. Wakrim, „A Compression Algorithm for Image Relighting“, 2013.
- [24] Cultural Heritage Imaging, Hrsg., *RTI Guide to Highlight Image Capture*, 2014.
- [25] L. Schöll, „Untersuchung und Visualisierung von Basisfunktionen für ”Reflectance Transformation Imaging”“, Hochschule der Medien, 2014.

- 
- [26] Ag2gaeh. (2015). „Deutsch: Kugelkoordinaten: Definition“, Adresse: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kugelkoord-def.svg> (besucht am 21.03.2017).
- [27] fxguide. (2015). „Light Fields – the Future of VR-AR-MR“, Adresse: <https://www.fxguide.com/featured/light-fields-the-future-of-vr-ar-mr/> (besucht am 06.03.2017).
- [28] Scratchapixel. (2015). „The Phong Model, Introduction to the Concepts of Shader, Reflection Models and BRDF“, Adresse: <https://www.scratchapixel.com/lessons/3d-basic-rendering/phong-shader-BRDF> (besucht am 30.03.2017).
- [29] T. Kinsman, „An Easy to Build Reflectance Transformation Imaging (RTI) System“, *Journal of Biocommunication*, Jg. 40, Nr. 1, 2016.
- [30] L. Pawlowicz. (2016). „Affordable Reflectance Transformation Imaging Dome“, Adresse: <http://hackaday.io/project/11951-affordable-reflectance-transformation-imaging-dome> (besucht am 15.03.2017).
- [31] Pawlowicz, Leszek. (2016). „RTI For Lithic Imaging — Reflectance Transformation Imaging For Lithics“, Adresse: [http://rtimage.us/?page\\_id=86](http://rtimage.us/?page_id=86) (besucht am 22.02.2017).