

## **Photogrammetrie Asset Erstellung**

Welche Möglichkeiten bietet Texture-Delighting mittels HDRI?

Bachelorarbeit im Studiengang Audiovisuelle Medien

vorgelegt von Adrian Liedtke  
(Matrikel-Nr.: 30415, Kürzel: al091)  
an der Hochschule der Medien Stuttgart  
am 08.04.2019  
Erstprüfer: Prof. Katja Schmid  
Zweitprüfer: Prof. Jan Adamczyk

## Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Adrian Liedtke, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Photogrammetrie Asset Erstellung – Welche Möglichkeiten bietet Texture-Delighting mittels HDRI?“ 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 ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§ 26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 24 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester), § 23 Abs. 2 Master-SPO (3 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO (4 Semester und berufsbegleitend) der HdM) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

## Kurzfassung

Photogrammetrie ist eine von mehreren Möglichkeiten, die Geometrie realer Objekte zu erfassen und ein 3D-Model daraus zu erstellen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Herausforderungen bei der photogrammetrischen Asset Erstellung. Weil das Entfernen von Lichtinformation aus der Textur des 3D-Models ein wichtiger Bestandteil des Workflows ist, um die gewonnenen Assets vielfältig einsetzen zu können, soll dieser Aspekt einen besonderen Schwerpunkt erhalten. Der Einsatz von HDRI ist eine der Methoden, um eine Textur zu delighton. Diese Technik wird in der Arbeit getestet und es werden deren Einschränkungen und Möglichkeiten erläutert.

## Abstract

Photogrammetry is one of several possibilities of capturing an object's geometry and turning it into a 3D-Model.

The following thesis addresses the challenges of photogrammetrical asset creation. Since the removal of lighting information from the 3D-Model's texture is a crucial part of the workflow in order be able to use the assets in a variety of situations, this aspect will be in the main focus. The use of HDRI is one oft the methods to delight a texture. This technique is tested in practical tests and its limitations and possibilities are explained.

# Begriffserklärungen

## **Baked Lighting**

Jegliche Lichtinformation, die in der der Surface Color Textur integriert ist. Beim De-lighting wird versucht, diese möglichst gut zu entfernen

## **Baking**

Erstellen bzw. Rendern von Texturen und Utility Maps im UV-Layout

## **Delighting**

Das Entfernen von Lichtinformationen aus einer Textur

## **Dynamikumfang**

Verhältnis (häufig in Blenden angegeben) zwischen dem hellsten und dunkelsten Punkt einer Szene oder eines Bildes; wird auch für andere physikalische Größen verwendet

## **Edge Bleeding**

Dabei wird die Farbe der Pixel am Rand von UV-Inseln um einige Pixel nach außen „geschmiert“, um sichtbare Nähte in der Textur eines 3D-Models zu vermeiden

## **Features**

Im Zusammenhang dieser Arbeit: Merkmale in der Textur eines Objekts, anhand derer die Photogrammetrie Software eine Point Cloud errechnet

## **HDRI** (High Dynamic Range Imaging)

Bilder mit erhöhtem Dynamikumfang

## **Highpoly/Lowpoly Asset**

Um Renderzeit und Performance zu verbessern, wird von gescannten Assets mit einer hohen Anzahl an Polygonen häufig eine Version mit weniger Polygonen erstellt.



**LatLong Map** (Latitude Longitude Map)

Bild mit Seitenverhältnis 2:1, bei dem die geographische Länge und Breite einer Kugel auf die Bildkoordinaten linear abgebildet wird.

**Mesh**

Polygonnetz

**Normal Map**

Gibt Auskunft über die Ausrichtung der Normalen eines Objekts

**PBR** (Physically Based Rendering)

Das Modell versucht, Szenen physikalisch möglichst korrekt darzustellen. Das bezieht sich sowohl auf Oberflächeneigenschaften als auch auf Licht etc.

**Polycount**

Anzahl der Polygone eines Meshs

**Relighting**

Die Beleuchtung eines 3D-Modells, das zuvor unter anderen Lichtbedingungen gescannt wurde

**Subdivision**

Unterteilung von Polygonen

**Surface Color Textur**

Die Originaltextur des Scanobjekts, in die das Baked Lighting integriert ist

**Utility Map**

Textur, die zusätzliche Informationen über das 3D-Model enthält wie z.B. die Geometrie

## **UV**

Koordinatensystem zur zweidimensionalen Repräsentation von dreidimensionalen Geometrien

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung .....</b>	<b>3</b>
1.1 Ziel der Arbeit.....	3
1.2 Motivation für Photogrammetrie .....	3
<b>2 Theorie .....</b>	<b>6</b>
2.1 Definition Photogrammetrie .....	6
2.2 Geschichtlicher Überblick und Bedeutung der Photogrammetrie .....	7
2.3 Arten und Anwendungsgebiete.....	10
2.3.1 Luftbildphotogrammetrie.....	10
2.3.2 Nahbereichsphotogrammetrie .....	10
2.4 Methoden zu Erstellung von 3D-Scans .....	12
<b>3 Photogrammetrie: Grenzen und Probleme in der Anwendung sowie deren Lösungsmöglichkeiten .....</b>	<b>15</b>
3.1 Generelle Einschränkungen .....	15
3.1.1 Realität als Vorlage.....	15
3.1.2 Oberflächeneigenschaften.....	15
3.1.3 Homogene Flächen .....	17
3.1.4 Repetitive Textur .....	18
3.1.5 Dünne Objekte .....	18
3.1.6 Überlappung .....	19
3.2 Probleme beim Workflow.....	19
3.2.1 Änderungen der Lichtbedingungen .....	19
3.2.2 Kompression.....	20
3.2.3 Dynamikumfang/Belichtung .....	20
3.2.4 Unschärfe.....	22
<b>4 Ablauf der Photogrammetrie Asset Erstellung.....</b>	<b>24</b>
4.1 Aufnahme der Bilder .....	24
4.1.1 Anforderungen an Kamera und die Bildqualität .....	24

4.1.2 Benötigtes Equipment.....	26
4.1.3 Aufnahmetechnik.....	28
4.2 Verarbeitung der Bilder.....	31
4.2.1 RAW Entwicklung .....	31
4.2.2 Focus Stacking .....	32
4.3 Pointcloud- und Modelberechnung in Agisoft PhotoScan.....	33
4.4 Assetoptimierung .....	36
<b>5 Delighting der Textur .....</b>	<b>40</b>
5.1 Gründe für das Delighting.....	40
5.2 Möglichkeiten zum Delighting.....	41
5.2.1 Bearbeitung durch Tonwertanpassungen und Filter .....	42
5.2.2 Unity Delighting Tool .....	43
5.2.3 Environment HDRI.....	44
<b>6 Delighting mittels HDRI .....</b>	<b>45</b>
6.1 Grundlagen HDRI und IBL .....	45
6.2 Praktische Tests in dieser Arbeit.....	47
6.3 Erstellung der Environment HDRI .....	49
6.4 Baking der Schattentextur und Delighting.....	51
6.5 Auswertung und Vergleich.....	54
<b>7 Fazit.....</b>	<b>62</b>

# 1. Einleitung

## 1.1 Ziel dieser Arbeit

Die Möglichkeit, aus Fotos von realen Objekten nahezu identische digitale Abbilder zu erschaffen, stellt für die VFX- und Gamesbranche vielfältige Chancen dar. Eine dieser Techniken zum Scannen von realen Objekten ist die Photogrammetrie. Der mathematische Aspekt dabei wird bereits seit über einem Jahrhundert erforscht und die Algorithmen werden auch heute noch weiterentwickelt und in neuer bzw. verbesserter Software auf den Markt gebracht. Seit einigen Jahren schon wird die Technik auch stark vermehrt in der Unterhaltungsindustrie eingesetzt.

Während der mathematische Aspekt demnach schon gut erforscht und dokumentiert ist, gibt es bei der 3D-Assesterstellung durch Photogrammetrie speziellere Herausforderungen. Diese Arbeit zeigt einige davon auf und widmet sich anschließend dem Delighting der Textur, das nötig ist, um das Asset in einem anderen Setting zu verwenden. Dafür werden verschiedene Methoden vorgestellt, die an eigens für diese Arbeit erstellten 3D-Assets getestet werden. Es soll dabei besonders darauf eingegangen werden, wie die Textur mithilfe eines Environment HDRI des Aufnahmeortes delighted werden kann, wo dabei Probleme entstehen und welche Vorteile diese Technik bringt.

Viele der eigenen Erfahrungen, die durch die Tests im Vorlauf gesammelt wurden, fließen ebenfalls in die Arbeit ein.

## 1.2 Motivation für Photogrammetrie

Es stellt sich die Frage, warum Photogrammetrie überhaupt in VFX- und Games-Industrie verwendet wird und in welchen Situationen sie sinnvoll eingesetzt werden kann.

Der Anspruch von visuellen Effekten in Filmen ist oft der Fotorealismus. Die Qualität der Effekte verbessert sich von Jahr zu Jahr durch die wachsende Erfahrung der Branche sowie der technischen Verbesserungen der Renderer etc. Auch wenn Games aufgrund der Echtzeitberechnungen noch etwas vom Fotorealismus entfernt sind, gibt es auch hier riesige Fortschritte.

VFX-Artists sind in der Lage beeindruckende Abbilder der Wirklichkeit zu schaffen und doch hat man manchmal das Gefühl, dass etwas nicht stimmt oder nicht echt aussieht, ohne es wirklich benennen zu können. Neben Faktoren wie Integration, Shading und Lighting etc. kann das auch Gründe wie fehlende Willkür oder Detailgenauigkeit usw. in den Assets und deren Textur haben.

Damit ist in diesem Fall nicht die Software oder Rechenleistung das Problem, sondern das Vorstellungsvermögen von uns Menschen bzw. den Artists. Auch wenn wir nicht die Vorstellungskraft haben, um uns ein fotorealistisches Objekt zu erzeugen, erkennt unser Gehirn dennoch aufgrund der Erfahrung schnell Fehler im Bild und der Eindruck von Fotorealismus ist verloren.

Es ist also fast unmöglich oder sehr aufwändig, die Realität zu 100% zu reproduzieren, da sie einfach zu komplex ist und extrem viele Faktoren zum Gesamtbild führen. Besonders der Zeitaufwand spielt oft eine wichtige Rolle.

Darum ist die Idee, Photogrammetrie zur Assesterstellung einzusetzen, naheliegend. Neben der Geometrie ist auch die Textur ausschlaggebend, die direkt auf das 3D-Model projiziert wird, da hier die Details und Willkür den Unterschied ausmachen können.

Besonders bei Objekten aus der Natur sowie bei verwitterten, gealterten und abgenutzten Objekten ist es schwierig und zeitaufwändig, davon realistische, digitale Abbilder zu erstellen. Genau in diesen Bereichen lohnt sich deshalb der Einsatz von Photogrammetrie.

Days	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Classic workflow	High Mesh					Texturing			Retopology		UV + baking	Material	Import IG	LOD
Photogrammetry workflow	Photos	HM + T	Retopology	UV + baking	Material+ Delighting	Import IG	LOD	Time saved						

Abbildung 1: Potenzielle Zeitersparnisse beim Einsatz von Photogrammetrie gegenüber dem konventionellen Workflow



*Abbildung 2: Details und Unregelmäßigkeiten wie vom Regen hochgespritzter Dreck, Verfärbungen durch UV Licht, beliebige Gegenstände auf dem Boden usw. geben dem Mesh bzw. der Textur den nötigen Realismus*

## 2. Theorie

### 2.1 Definition Photogrammetrie

Photogrammetrie beschreibt im Allgemeinen Methoden, aus einem oder mehreren Bildern eines Objektes indirekt dessen Form und Position anhand von Bildmessungen zu bestimmen. Ziel einer photogrammetrischen Messung ist es, mit zweidimensionalen Bildern eine dreidimensionale geometrische Rekonstruktion des Objektes zu erschaffen. Das Ergebnis davon kann sowohl digital durch Koordinaten als auch in grafischer Form wie Bildern und Plänen modelliert und dokumentiert werden. [Luhmann, Thomas 2003]

Das Prinzip dahinter ist im Grunde das gleiche, welches unser Sehapparat anwendet: das stereoskopische Sehen. Wenn wir zwei oder mehr Fotos desselben Objektes, aufgenommen von verschiedenen Positionen, haben, können wir damit jeden Punkt berechnen, solange dieser auf beiden Fotos zu sehen ist.

Dies erfolgt auf Grundlage von Triangulation, einer Berechnung, um anhand zweier bekannter Positionen einen beliebigen dritten unbekannten Punkt ermitteln zu können. Durch die Überlappung von Bildpunkten auf zwei oder mehr Fotos können die Gleichungen der Strahlen von den beiden Kamerapositionen zum gesuchten Punkt aufgestellt werden und so deren Überschneidung und damit die Koordinaten des gesuchten Punkts errechnet werden. [Lindner, Wilfried 2016]

Bei Photogrammetrie wird das Prinzip auf viele Punkte gleichzeitig angewandt, die zu einem Gesamtmodell verknüpft werden und so die dreidimensionale Rekonstruktion ermöglichen.

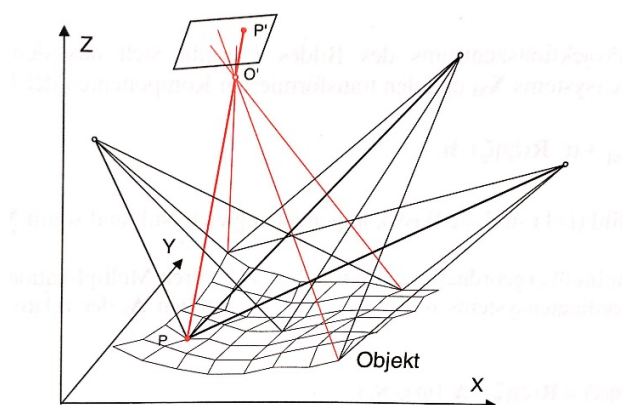


Abbildung 3: Mehrbildtriangulation



## 2.2 Geschichtlicher Überblick und Bedeutung der Photogrammetrie

Obwohl Photogrammetrie Fotografien benötigt, um exakte Abmessungen berechnen zu können, haben bereits Mitte des 2. Jahrtausends Wissenschaftler wie Da Vinci an Experimenten zur Erforschung von Perspektive und Projektion gearbeitet und damit sogar schon die Basis für die photogrammetrische Theorie gelegt. Auch Albrecht Dürer hat an Instrumenten gearbeitet, die die Gesetze der Perspektive benutzen, um Bilder zu erstellen, die Gegenstände in exakter Perspektive darstellen können.

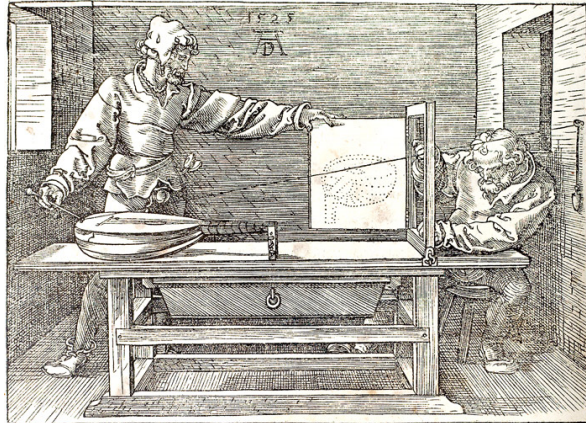


Abbildung 4: Albrecht Dürer: „Der Zeichner der Laute“ (1525), Holzschnitt einer Konstruktionsanordnung zum Zeichnen von Perspektive

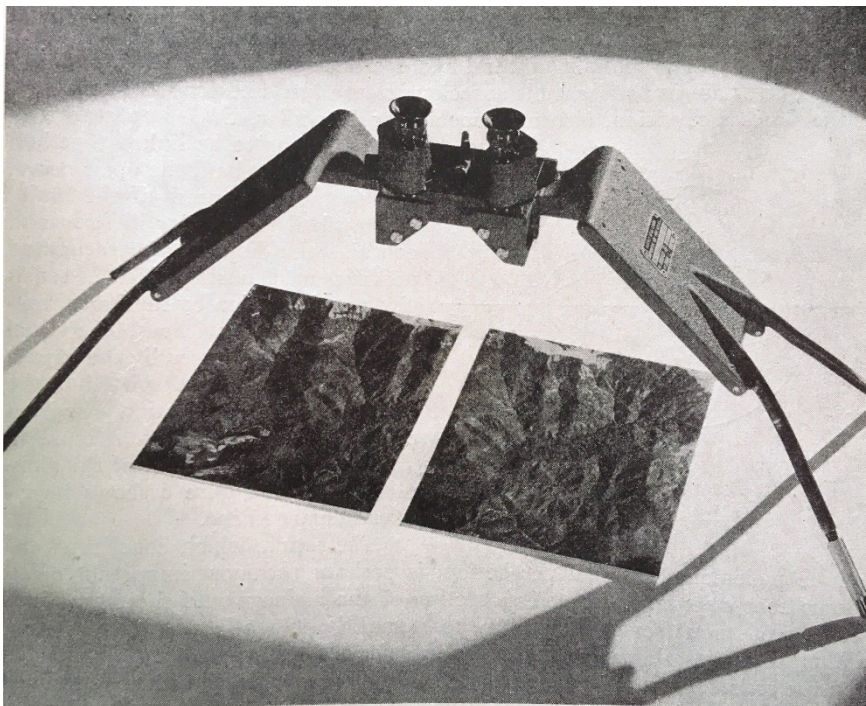
Mit der Verbreitung von Fotoapparaten Mitte des 19. Jahrhunderts

kam es auch zügig zur Grundidee der Photogrammetrie. Albrecht Meydenbauer, der sich nach seinem Studium an der Bauakademie in Berlin auf Gebäudevermessung spezialisiert hatte, bekam als einen seiner ersten Aufträge die Aufgabe, den Wetzlarer Dom zu dokumentieren. Als er im Zuge der Messungen fast vom Seitenschiff fiel, kam ihm die Idee, die Messungen nicht am Gebäude selbst vorzunehmen, sondern stattdessen an indirekten Messungen durch Fotografien des Gebäudes. Damit war der Grundgedanke der Photogrammetrie geboren. [Albertz 2001]

Etwa zeitgleich entwickelte der Franzose Aimé Laussedat eine Methode zur Erstellung topographischer Karten, die er zunächst als „Métrophotographie“ bezeichnete. 1859 wurde dann die erste topographische Kamera nach Laussedats Vorstellungen gebaut. Durch diese neue Technik konnten in den folgenden Jahrzehnten neue Karten erstellt werden und auch erste Versuche von Luftphotogrammetrie mithilfe von Ballonen wurden gestartet, die allerdings vorerst scheiterten [The Center for Photogrammetric Training 2008]. Auch Meydenbauer entwickelte in dieser Zeit neue Kameras für terrestrische Photogrammetrie.

Während vor 1900 hauptsächlich an Messtischen gearbeitet wurde, startet mit Beginn des 20. Jahrhunderts die Phase der Analogen Photogrammetrie. Mit Erfindung der ersten Stereoplotter nach 1900, mit denen man 2 Bilder mithilfe von optischen Instrumenten 3-dimensional darstellen konnte, wurde das Auswerten der Bilder vereinfacht.

Auch Flugzeuge und zugehörige, speziell dafür entwickelte Gimbals und Kamerasysteme wurden vermehrt zur Kartenerstellung verwendet. Vor allem das Militär hatte Interesse an der Technik insbesondere im Hinblick auf die 2 Weltkriege. [McCurdy; Woodward; Davidson; Wilson; Ask 1944].



*Abbildung 5: Stereoskop wie es in den 1940er Jahren im Militär genutzt wurde*

Auch wenn die Übergangsphasen sich etwa über 20 Jahre erstreckten, begann in den 1960er Jahren die Phase der Analytischen Photogrammetrie. Mit der Verbreitung von Computern kam die Möglichkeit auf, das bisher analog erfolgte Vergleichen und Ausrichten der Fotos nun durch Algorithmen zu bewerkstelligen. Allerdings wurden nach wie vor analoge Fotos benutzt und auch auf optisches Werkzeug konnte vorerst nicht verzichtet werden: den analytischen Plotter. [Lindner, Wilfried 2016]

Seit zwei Jahrzehnten befinden wir uns in der jetzigen Phase der digitalen Photogrammetrie. Durch das Vorstoßen von immer leistungsfähigeren Computern in den

Consumerbereich sowie die Verbreitung von Digitalfotos wurde die Rechenarbeit auf spezielle Software für den PC verlagert. Das hat auch den Bereich der Einsatzzwecke und Möglichkeiten von Photogrammetrie erweitert. Neben der ursprünglichen Verwendung für Messungen und Kartographie rückt in den letzten Jahren auch der kreative Aspekt in den Vordergrund. Mit der Erstellung eines 3D-Modells hat man nicht nur das Mittel, um Messungen vorzunehmen, sondern das Modell an sich kann zum angestrebten Endergebnis der Photogrammetrie werden.

Daraus entstehen neue Anwendungsmöglichkeiten wie z.B. im 3D-Druck oder auch für die VFX- und Games-Industrie.

So wird Photogrammetrie in den letzten Jahren vermehrt von Studios eingesetzt, um Film-Sets zu dokumentieren oder auch, um von Vorlagen wie Filmprops anschließend 3D-Modelle erstellen zu können.

In der Netflix Originals Serie „The Crown“ hatte das Londoner VFX-Studio „One of Us“ die Aufgabe, unter anderem den Buckingham Palace digital nachzubauen. Mit dem Anspruch, möglichst nah am Original zu bleiben, wurden Fotos des Gebäudes gemacht und mithilfe von Photogrammetrie ein realistisches 3D-Modell erstellt. Vor allem, wenn Assets in vielen Shots wie in diesem Fall verwendet werden, lohnt sich oft der Einsatz von Photogrammetrie. [CGW, 2017]

Aber nicht nur in großen Produktionen wird Photogrammetrie eingesetzt. Auch zum Erstellen von Assetlibraries für späteren Gebrauch verwenden vor allem 3D-Artists der Gamesbranche die Technik.

Unternehmen wie Quixel gehen einen Schritt weiter und verbinden Scanlibraries mit Software, mit der es möglich ist, aus tausenden von gescannten Oberflächen auszuwählen und diese zu neuen Materialien zu kombinieren.

## 2.3 Arten und Anwendungsgebiete

Grundsätzlich kann man Photogrammetrie in zwei Arten unterteilen, die Luftbildphotogrammetrie und die Nahbereichsphotogrammetrie, auch terrestrische Photogrammetrie genannt.

### 2.3.1 Luftbildphotogrammetrie

Ein immer noch wichtiger Einsatzbereich der Photogrammetrie ist die Luftbildmessung, bei der meistens Flugzeuge oder Satelliten verwendet werden, um topographische Karten zu erstellen.

Dafür werden meist spezielle Kameras und Linsensysteme eingesetzt, die geometrisch möglichst exakt abbilden. Dabei haben die Sensoren nicht selten Seitenlängen von über 20cm, wodurch auch die Brennweiten deutlich steigen: eine Weitwinkelkamera hat bei einem solchen Sensor eine Brennweite von etwa 150mm. [Lindner, Wilfried 2016]

Die in den letzten Jahren immer wieder erweiterte und verbesserte 3D-Ansicht in Google Maps und Google Earth wird ebenfalls durch Luftbildphotogrammetrie erreicht. Allerdings bestehen die Aufnahmen, die für die Berechnung des Models benutzt werden, nicht aus Satellitenbildern, sondern werden von kleinen Flugzeugen mit mehreren, in verschiedene Richtungen zeigenden Kameras aus gemacht. [Nat and Friends 2017]

### 2.3.2 Nahbereichsphotogrammetrie

Die Nahbereichsphotogrammetrie unterscheidet sich von der Luftbildmessung durch andere Aufnahmekonzepte und eine geringere Aufnahmeentfernung, die zwischen wenigen Zentimetern und einigen hundert Metern liegen kann.

Daraus ergeben sich auch deutlich vielfältigere Anwendungsgebiete, darunter fallen unter anderem:

- Automobil-, Maschinen- und Schiffsbau (z.B. Fertigungsmesstechnik, optische Formkontrolle, Auswertung von Crashtests)

- Architektur, Denkmalpflege und Archäologie (z.B. Baugeschichtliche Dokumentation, Rekonstruktion zerstörter Gebäude, Kartierung von Ausgrabestellen)
- Ingenieurbau (z.B. Erfassung von Großbauwerken, Deformationsmessungen, Bergbau)
- Medizin (z.B. Zahnvermessung, plastische Chirurgie)
- Polizei (z.B. Tatortvermessung, Beweissicherung, Tätervermessung)
- Naturwissenschaften (z.B. Strömungstechnik, Wellentopographie)
- Unterhaltungsindustrie (VFX, VR, Games)
- 3D-Druck

Die meisten Einsatzgebiete der Nahbereichsphotogrammetrie haben ähnliche Anforderungen an Aufnahme- und Auswertungsmethoden:

- Leistungsfähige analoge oder heute überwiegend digitale Aufnahmesysteme
- beliebige Aufnahmeanordnungen mit nahezu unbegrenzter Anzahl von Bildern (im Gegensatz zur Luftbildphotogrammetrie, wo Gebiete meist in Streifen systematisch abgeflogen werden, sind zu scannende Objekte in der Nahbereichsphotogrammetrie vielfältig und können sehr unterschiedliche Aufnahmeanordnungen erfordern)
- Orientierung der Bilder mit Hilfe des Verfahrens der Bündel-/Mehrbildtriangulation
- Ergebnisdarstellung als 3D-Koordinaten-Dateien, CAD-Dateien, Bilder oder Zeichnungen

Je nach Anwendungsgebiet können die Anforderungen an die Genauigkeit variieren.  
[Luhmann, Thomas 2003]

Teilweise verschwimmen die Übergänge zwischen Luftbildphotogrammetrie und Nahbereichsphotogrammetrie, besonders durch den deutlich vermehrten Einsatz von UAVs (umgangssprachlich und im Folgenden Drohnen genannt) kann es Aufnahmeentfernungen von mehreren hundert Metern geben, es sind aber auch Aufnahmen nur wenige Meter vom Objekt entfernt möglich.

In der VFX-Industrie gibt es vor allem Anwendungen von Photogrammetrie, die eher der Nahbereichsphotogrammetrie zuzuordnen sind.

Zum einen muss vor allem bei großen Produktionen sehr viel dokumentiert werden. Dies geschieht meist durch LiDAR Scans oder durch Photogrammetrie. Gerade bei Filmsets von großen Ausmaßen werden Drohnen eingesetzt, um das Gebiet zu überfliegen und Aufnahmen zu machen. Diese können verwendet werden, um ein grobes Mesh des Sets zu generieren, das in der Postproduktion hilft, um zum Beispiel Matchmove-Kameras richtig zu positionieren oder ein generelles Verständnis für die Umgebung und Entfernungen zu erhalten. Hierbei muss die Auflösung des Meshs meistens nicht sehr hoch sein, da es noch performant sein soll und nur als Referenz dient.

Zum anderen können ebenfalls Drohnen eingesetzt werden, wenn es darum geht, ganze Fassaden oder Gebäude als fotorealistisches Asset zu gewinnen, vor allem, wenn auch eine Ansicht von oben benötigt wird. Dafür muss sowohl die Textur als auch die Meshauflösung deutlich besser sein als bei Scans, die nur als Referenz dienen. Dies benötigt den Einsatz einer hochqualitativen Aufnahmekamera.

Daneben gibt es ebenfalls Situationen, die eine deutlich geringere Aufnahmeentfernung erfordern, wie zum Beispiel das digitale Nachbilden von Filmprops oder anderen Gegenständen. Diese Art der Assemblerstellung wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit dargestellt.

## 2.4 Methoden zu Erstellung von 3D-Scans

Wenn es darum geht, aus realen Objekten einen digitalen, dreidimensionalen Scan zu erschaffen, gibt es neben Photogrammetrie auch weitere Methoden, wie zum Beispiel:

### **Time of Flight (ToF):**

Lichtimpulse werden ausgesendet, um zu messen wie lange diese brauchen, bis sie zum Objekt und wieder zurück gelangen (ähnlich dem Radar-Prinzip). Diese Technik wird vor allem für Echtzeitanwendungen eingesetzt wie in Fahrerassistenzsystemen,

aber auch im Gaming-Bereich wie beispielsweise bei der Microsoft Kinect. Dafür ist die Technik aber nur auf wenige Zentimeter genau.

### **Structured Light/ Streifenlichtprojektion**

Es wird eine zeitliche Sequenz von Lichtstreifen auf das zu scannende Objekt projiziert, wodurch jeder Punkt der Oberfläche eine eindeutige Kodierung erhält. Da der Winkel zwischen Kamera(s) und Projektor bekannt ist, können so die Punkte auf der Oberfläche bestimmt werden. Mit dieser Technik können extrem hohe Genauigkeiten erreicht werden. [Fuchs, Jochen 2018]

### **Lichtfeld**

Die Lichtfeld-Technik ist ein Teilbereich der Photogrammetrie, der neben der Gewinnung von Tiefeninformation bei Bewegtbildaufnahmen, auch mehr Details zu einem photogrammetrisch erstellen Model hinzufügen kann. Durch das Bewegen einer Lichtquelle um das Objekt herum können Normal- und Displacementmaps errechnet sowie Oberflächeneigenschaften ermittelt werden.

### **Lasermesssysteme**

Beim Laserscan wird die Umgebung zeitlich und örtlich versetzt von einem Laserstrahl abgetastet, um so räumliche Polarkoordinaten zu gewinnen und eine Pointcloud zu erstellen.

LiDAR-Scanner (Light Detection and Ranging) stellen in der Praxis zunehmend ein Konkurrenzverfahren zur Photogrammetrie dar. Allerdings bietet die Kombination der beiden Verfahren auch Vorteile und hat auch in der Zukunft Potenzial. [Luhmann, Thomas 2003]

An Filmsets ist es neben der Photogrammetrie das gängigste Verfahren zur Dokumentation sowie zur Gewinnung von 3D-Models.

Jede der beiden Scan-Methoden hat ihre Vor- und Nachteile sowie Einsatzzwecke, für die sie besser geeignet sind.

Folgende Tabelle stellt einige Merkmale gegenüber:

Laserscan	Photogrammetrie
Hohe Kosten (mehrere 10000 €)	Relativ niedrige Kosten (abhängig von benutzter Kamera und Software)
Unabhängig von Lichtsituation	Lichtsituation hat Auswirkungen auf die Qualität des Models und Textur
Sehr hohe Genauigkeit	Bessere Genauigkeit als beispielsweise Infrarot-Scanner, allerdings nicht so exakt wie ein Laserscan
Schweres Equipment, längerer Aufbau	Relativ mobil, schneller Einsatz
Geeignet für homogene Flächen	Häufig Probleme bei homogenen Flächen ohne erkennbare Merkmale
Scans sich schnell bewogender Objekte kaum möglich	Kameraarrays können auch sehr schnelle Objekte erfassen
Es gibt zwar Scanner, die auch Farbe aufnehmen und den Punkten zuteilen kann, allerdings wird die Textur nicht so gut wie durch Photogrammetrie [Kleinkemper, Larry 2014]	Realistische Textur

[Adam Technology 2017]



## **3. Photogrammetrie: Grenzen und Probleme in der Anwendung sowie deren Lösungsmöglichkeiten**

Wie jede andere Technik hat auch Photogrammetrie einige Grenzen und kann nicht uneingeschränkt überall und immer eingesetzt werden.

Diese können zum einen durch die Technik selbst entstehen, aber auch erst im Verlauf und der Umsetzung des Workflows aufkommen und somit das Endergebnis verschlechtern oder sogar komplett zerstören. Dabei beziehen sich die folgenden Punkte im Speziellen auf den Einsatz von Photogrammetrie für die Asseterstellung für VFX- und Games-Anwendungen.

### **3.1 Generelle Einschränkungen**

#### **3.1.1 Realität als Vorlage**

Der Punkt ist eigentlich trivial, soll aber dennoch kurz erläutert werden.

Die Verwendung von Photogrammetrie beschränkt sich auf Objekte, die in der Realität existieren und von denen ein digitaler Zwilling erstellt werden kann. Zwar kann aus vielen einzelnen photogrammetrisch erstellten Objekten eine Welt erschaffen werden, die so nicht real existiert, dennoch sind damit bereits viele Elemente vorgegeben.

Für viele Anforderungen, bei denen nicht real existierende Objekte erstellt werden müssen, fällt der Gebrauch von Photogrammetrie also komplett weg.

#### **3.1.2 Oberflächeneigenschaften**

Eine weitere große Einschränkung bei der Auswahl von Objekten ist die Beschaffenheit der Oberfläche. Während matte Oberflächen meistens keine Probleme machen, kommt es bei stark glänzenden und transparenten Oberflächen fast immer zu Problemen bei der Berechnung der Pointcloud. Die Features, nach denen die Software sucht, befinden sich bei reflektiven und transparenten Oberflächen zwischen den verschiedenen Aufnahmen nicht mehr auf der gleichen Ebene, wodurch es zu Fehlern in der Pointcloud kommt. Die Software kann zum Beispiel nicht zwischen einem weißen

Punkt auf einer glänzenden Oberfläche und der Reflektion eines Lichtpunktes auf der gleichen Oberfläche unterscheiden. [Blizard, Brandon 2014]

Konkret zeigt sich dies vor allem bei Aufnahmen von Gebäuden mit Fenstern. Während die Fassade keine Probleme bereitet, ist die Pointcloud an den Fenstern nur sehr dünn und es gibt viele falsch berechnete Punkte. Hier sollte man die Punkte der Fenster bereits vor der Meshberechnung in der jeweiligen Software entfernen und erst ganz am Ende bei der Weiterverarbeitung des Assets die Fenster von Hand modellieren und einfügen.

Glatte Plastik- oder Metalloberflächen sowie Gegenstände komplett aus Glas sind ebenfalls kaum ohne Hilfsmittel zu scannen. Um das Problem zu umgehen, muss man zunächst aus der reflektiven oder transparenten Oberfläche eine matte machen und diese anschließend mit Features versehen. Dazu präpariert man das Objekt vor dem Scan mit einem matten, wieder entfernbaren Spray und spritzt anschließend z.B. mit einer Bürste schwarze Farbe auf (Abbildung 6). Damit ist das Objekt einwandfrei zu scannen. [Busby, James 2016]

Der Nachteil ist, dass jegliche Textur verloren geht, allerdings haben glänzende Oberflächen (Plastikteile, Metall) häufig auch eine simple und homogene Textur, sodass man diese danach auch von Hand texturieren und shaden kann. Ein weiterer Nachteil ist, dass es oft nicht möglich ist, das zu scannende Objekt derartig zu präparieren.

Falls die Reflexion nur schwach ist, kann sich auch der Einsatz eines zirkularen Polarisationsfilters lohnen, um die ungewollten Features einer Reflexion abzuschwächen. Häufig können bei Gegenständen mit in verschiedene Richtungen zeigenden Flächen aber nicht alle Reflexionen entfernt werden.



*Abbildung 6: Reflektive und transparente Oberflächen wie dieses Glas lassen sich nur scannen, indem man sie vorher entsprechend präpariert*

### 3.1.3 Homogene Flächen

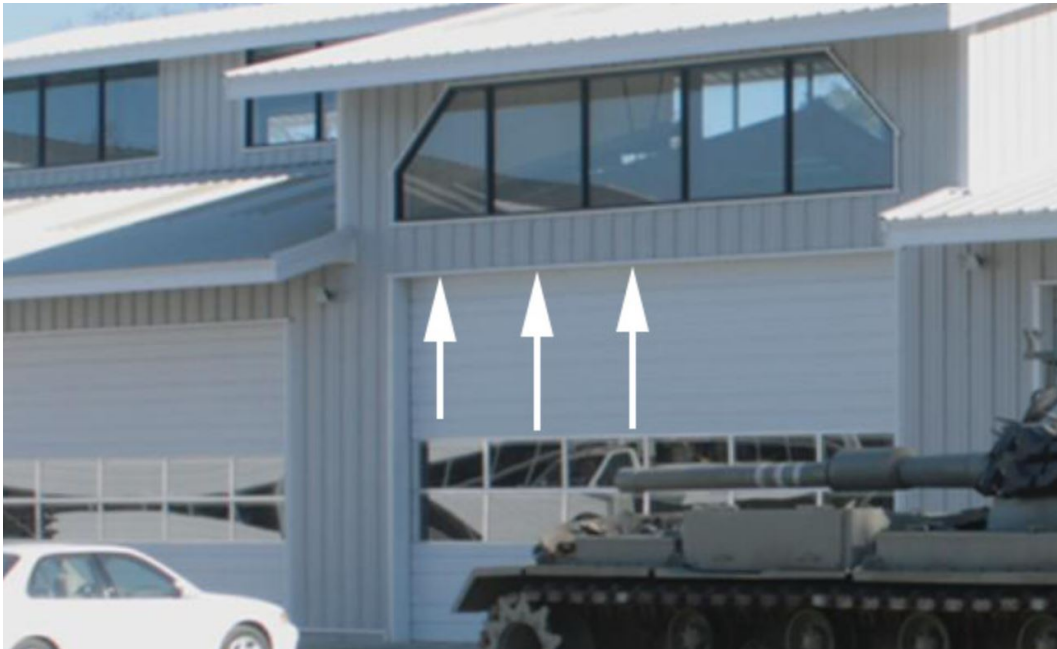
Hat ein Objekt eine sehr gleichmäßige Oberfläche, hat die Software Probleme, markante Punkte auf der Oberfläche zu finden. Da der Algorithmus keine Features findet, die sich zwischen den Bildern verschieben, werden auch kaum Punkte in der Pointcloud generiert und die Geometrie wird fehlerhaft. Deshalb kann zum Beispiel die Rekonstruktion von gleichmäßig gestrichenen Wänden scheitern.

Um das Problem zu umgehen, kann in einigen Fällen die Aufnahmedistanz verringert werden, sodass die Kamera kleinere Unregelmäßigkeiten auf der Oberfläche wie eine Putzstruktur oder kleine Stellen aus Dreck, Moos o.Ä. auflösen kann. So findet die Software mehr Features und kann die Geometrie berechnen.

Eine deutlich aufwändigere Methode, die man einsetzen kann, falls die Oberfläche wirklich komplett strukturlos ist, ist das Projizieren eines Musters auf die Oberfläche mittels eines Beamers. Dadurch findet der Algorithmus Punkte und die Geometrie kann rekonstruiert werden. Falls neben der reinen Geometrie auch Textur ohne Projektion benötigt wird, kann folgende Technik angewandt werden. Von einem Stativ aus wird jeweils ein Foto mit Projektion, das für die Berechnung der Pointcloud verwendet wird, und ein Foto ohne Projektion für die Erstellung der Textur aufgenommen werden. Nach der Berechnung des Meshes können die Bilder dann ausgetauscht und eine Textur ohne das Muster der Projektion erstellt werden.

### 3.1.4 Repetitive Textur

Wurden bei den soeben genannten Situationen zu wenige Features auf dem Objekt gefunden, kann es auch dazu kommen, dass zwar Merkmale gefunden werden, diese aber in sehr ähnlicher Form auch an anderer Stelle einer Oberfläche vorkommen, sodass Punkte nicht eindeutig zugeordnet werden können und es zu Fehlberechnungen kommt. [Blizard, Brandon 2014]



*Abbildung 7: Bereiche wie diese sehen sich so ähnlich, dass die Software die Features teilweise nicht richtig zuordnen kann*

### 3.1.5 Dünne Objekte

Fehler im Mesh können auch durch dünne Objekte verursacht werden. Bei Dingen wie dünnen Zweigen oder sogar Haaren, die nicht im Closeup gescannt werden, platziert die Software häufig nicht genug Punkte auf dem Objekt, sodass daraus kein gutes Mesh berechnet werden kann. Das Resultat sind oft schwebende Faces, die wenig mit dem eigentlichen Objekt gemeinsam haben.

Aber auch dünne Flächen wie Blätter sind eine Herausforderung. Steht ein einzelnes Blatt nicht im Vordergrund, sondern ist nur Teil einer Szene, reicht häufig die Auflösung oder die Anzahl der verwendbaren Fotos zur Berechnung nicht aus, um das Blatt richtig darzustellen. Dabei entstehen oft zu grobe Formen und die gescannte Geometrie der Blätter ist dicker, als sie es in der Realität ist. Um dem etwas

vorzubeugen, hilft es meist nur, mehr Fotos zu machen und insbesondere Details von den schwierigen Stellen aufzunehmen.

### 3.1.6 Überlappung

Bei sehr komplexen Strukturen wie Laubwerk können große Teile des Objekts von davorliegenden Elementen verdeckt werden. Teile des Scans werden dann fehlerhaft, wenn es nicht genug Bilder des jeweiligen Bereichs gibt, um diesen einwandfrei zu rekonstruieren. Insbesondere Details sind davon betroffen.

Erneut hilft es hier, die Anzahl der Bilder und vor allem der verschiedenen Perspektiven zu erhöhen. Alternativ können auch sich verdeckende Objekte einzeln gescannt und erst im Anschluss zusammengeführt werden. [Blizard, Brandon 2014]



*Abbildung 8: Innenliegende oder verdeckte Bereiche können zu Problemen bei der Mesherstellung führen und sollten besondere Aufmerksamkeit bei der Aufnahme der Bilder bekommen*

## 3.2 Probleme beim Workflow

### 3.2.1 Änderungen der Lichtbedingungen

Optimale Verhältnisse für einen Scan ist eine konstante diffuse Beleuchtung über den gesamten Zeitraum der Aufnahmen hinweg. In viele Fällen sind Objekte nicht bewegbar oder einfach zu groß, um sie unter beeinflussbaren Umständen wie z.B. in einem Studio zu scannen. Das bedeutet, dass die Bilder draußen unter Tageslicht aufgenommen werden müssen.

Dabei ist eine Änderung der Lichtbedingungen während des Scans oft unvermeidbar. Diese können durch ziehende Wolken, den Stand der Sonne aber auch durch Faktoren der Umgebung, wie Hausfassaden oder sich im Wind bewegende Bäume verursacht werden. Je nach Aufnahmeentfernung und Aufnahmetechnik, können sich die Lichtverhältnisse auch durch die Kamera oder die Person dahinter verändern.

Bei starken Änderungen der Beleuchtung kann es zu Ungenauigkeiten bei der Berechnung der Geometrie kommen. In der Textur hingegen können selbst kleinere Änderungen der Lichtbedingungen zu auffälligen Kanten führen, an denen eine Naht zwischen zwei auf das Model projizierten Bildern verläuft.

### **3.2.2 Kompression**

Bilder im RAW-Format liefern die besten Ergebnisse bei der Berechnung der Pointcloud. Die Aufnahmen können aber auch vorher ins JPEG-Format konvertiert werden, allerdings können die so entstehenden Artefakte ausreichen, um das Tracking einzelner Features zu verfälschen.

Bei geringer Kompression der RAW-Dateien lässt sich in der Praxis jedoch selten ein Unterschied im Ergebnis feststellen. Je weiter das Bild komprimiert wird, desto fehlerhafter wird die Pointcloud.

Es muss also abgewogen werden, ob und wie stark die Aufnahmen für die Berechnung komprimiert werden sollen. [Li, Zhilin u.a. 2002]

### **3.2.3 Dynamikumfang/Belichtung**

Die korrekte Belichtung der Bilder ist essentiell, um Details sowohl in den Highlights als auch in den Shadows aufzunehmen und verarbeiten zu können. Vor einem Scan sollte die Lichtsituation von mehreren Seiten überprüft und dabei Testaufnahmen gemacht werden. Es bietet sich an, die in der Fotografie bewährte ETTR-Methode zu verwenden, bei der Bilder genau so hell belichtet werden, dass der hellste Punkt im Bild gerade nicht mehr geclippt wird. Für einen Scan, bei dem alle Bilder mit der gleichen Belichtung aufgenommen werden sollten, wird die Belichtung also auf das Bild mit dem hellsten Punkt eingestellt. Dieser hellste Punkt bezieht sich auf das zu



scannende Objekt selbst und nicht auf das gesamte Bild. Der Himmel oder andere helle Spots im Hintergrund dürfen geclippt werden, da diese keine für das Asset relevanten Informationen beinhalten.

Je höher der Dynamikumfang eines Kamerasensors ist, desto besser natürlich auch für die Details in dunklen Bildbereichen.

Hat ein Objekt eine einheitliche Textur und wird es gleichmäßig beleuchtet, kann auch eine Kamera mit niedrigerem Dynamikumfang verwendet werden.

Ist der Dynamikumfang eines Objektes so groß, dass viele Details verloren gehen, ist auch der Einsatz von High-Dynamic-Range-Fotografie (HDR) möglich. Diese Technik wird in einem späteren Teil der Arbeit weiter erläutert. So wird es möglich, Bereiche, die mit einem einzelnen Foto unterbelichtet wären, richtig zu belichten und Details sichtbar zu machen. [Georgopoulos, Andreas u.a. 2013]

Neben dem deutlich höheren Aufwand, die Belichtungsreihen in der Nachbearbeitung zusammenzuführen, ist zudem auch ein Stativ für jede einzelne Aufnahme des Objekts nötig. Dies ist in einem Studio zwar kein Problem, am Set oder in der Natur aber ein enormer Zeitaufwand.

Ein weiterer Nachteil bei der Verwendung von HDR-Aufnahmen ist, dass nicht nur durch das Licht gegebene Schatten aufgehellt werden, sondern auch dunklere Farben in der Textur. Dabei geht der Realismus der Textur etwas verloren.



*Abbildung 9: In dunklen Bildbereichen sind ohne den Einsatz von HDRI kaum noch Details vorhanden, die Software hat Schwierigkeiten, Features zu finden (Links HDR, rechts Einzelbelichtung)*

### 3.2.4 Unschärfe

Hier muss man zwischen verschiedenen Unschärfen unterscheiden. Allgemein führt Unschärfe zu schlechteren Ergebnissen, sowohl bei der Berechnung der Pointcloud als auch in der Textur.

#### Qualität des Objektivs

Besonders günstige Varioobjektive, die einen größeren Brennweitenbereich abdecken, haben häufig keine gute Auflösung. Das äußert sich sowohl in der Darstellung der Details als auch im Kontrastverhalten. Besonders an den Bildrändern sind Aberrationen stärker ausgeprägt und verschlechtern das Bild.

#### Bewegungsunschärfe

Auch Motionblur kann dazu führen, dass einzelne Bilder nicht verwendbar sind. Falls die Zeit fehlt, um ein Stativ für die Aufnahmen zu verwenden, sollte dennoch darauf geachtet werden, eine ausreichend kurze Belichtungszeit zu verwenden, damit die Bilder scharf werden. Ein Bildstabilisator im Objektiv oder auch in manchen Kameras kann dabei helfen.

#### Tiefenschärfe

Gerade bei kleineren Objekten und damit geringerer Aufnahmedistanz spielt die geringe Tiefenschärfe oft eine Rolle. Die Blende sollte also so gewählt werden, dass ein ausreichend großer Teil des Objektes scharf ist. Zusätzlich verringert eine weit geöffnete Blende auch die Bildschärfe generell. Sollten Teile des Objekts auf allen Bildern außerhalb des Fokus liegen, kann es zu Artefakten in der Textur kommen. (Abb.9)

Lässt die Lichtsituation eine Verkleinerung der Blende nicht zu, kann mit einem Mehraufwand auch Fokusstacking angewandt werden. Dafür werden von einem Stativ aus mehrere Fotos mit unterschiedlicher Fokusdistanz aufgenommen und diese anschließend zu einem über dem ganzen Fokusbereich scharfen Bild zusammengerechnet.

[Santella, Michael u.a. 2017]





*Abbildung 10: Die Textur wird an Teilen des Objekts, die auf keinem der aufgenommenen Bilder auf der Fokusebene liegen, unscharf und es ergeben sich sichtbare Nähte zwischen zwei auf das Mesh projizierten Bildern*

## 4. Ablauf der Photogrammetrie Asset Erstellung

### 4.1 Aufnahme der Bilder

#### 4.1.1 Anforderungen an die Kamera und die Bildqualität

Die Aufnahmen sind Grundlage für das Ergebnis jedes Scans. Deshalb sollten sowohl bei der Auswahl der Kamera und des Objektivs, als auch bei den Einstellungen der Bilder einige Dinge beachtet werden.

Zunächst spielt die Sensorauflösung eine wichtige Rolle. Je höher dieser auflöst, desto mehr Features können erkannt werden und die Geometrie kann exakter berechnet werden. Auch die Textur profitiert natürlich von mehr Detailauflösung. Allerdings steigt mit einer höheren Pixelzahl des Sensors auch die Zeit, die für die Berechnung der Pointcloud benötigt wird. Agisoft empfiehlt eine Mindestauflösung von 5 MP, die von den meisten neueren Kamerasensoren bereits deutlich überschritten werden. Ein Vollformat Sensor bietet durch die größere Pixelgröße und dem daraus resultierenden besseren Rauschverhalten einen Vorteil im Vergleich zu einem APS-C Sensor. Ein Sensor kann aber nur so viel auflösen, wie es das Objektiv erlaubt. Darum macht es keinen Sinn, eine sehr hochauflösende Kamera in Kombination mit einem minderwertigen Objektiv zu verwenden. Beide Komponenten sollten also aufeinander abgestimmt sein.

Das Objektiv sollte demnach möglichst verzeichnungsfrei sein und wenige chromatische und sphärische Aberrationen aufweisen.

Es bietet sich an, Festbrennweiten zu verwenden, da diese in den meisten Fällen eine bessere Abbildungsleistung besitzen. Vario-Objektive der gleichen Preisklasse sind häufig deutlich schlechter und haben zudem den Nachteil, dass sich zwischen den Aufnahmen der Brennweiten-Ring verdrehen kann.

Es empfiehlt sich, Brennweiten zwischen 20mm und 80mm (bezogen auf Vollformat) zu verwenden. [Agisoft LLC 2018]

Ein hoher Dynamikumfang der Bildsensoren ist vor allem bei Objekten mit hohem Kontrast von Vorteil und bedeutet auch bei einem späteren Delighting eine bessere Textur.

Des Weiteren sollte die Kamera manuelle Einstellmöglichkeiten für Belichtungszeit, Blende und Lichtempfindlichkeit haben.

Das Speichern der Bilder im RAW-Format sollte auch möglich sein; so hat man deutlich mehr Möglichkeiten bei der Nachbearbeitung und kann auch den Weißabgleich im Nachhinein perfekt anpassen.

Im Prinzip gibt es keinen Grenzwert, der für einen erfolgreichen Scan entscheidend ist, allerdings äußert sich eine höhere Bildqualität selbstverständlich auch im Ergebnis des Scans durch ein besseres Mesh sowie einer realistischeren Textur.

Dass man durch richtige Anwendung auch mit einer Handykamera beeindruckende Ergebnisse erzielen kann, zeigt Robert Berg – Environment Artist und Senior Level Artist bei DICE – in seinem Scandinavian Forest Project:



*Abbildung 11: Mit einem älteren iPhone gescannte Felsen in Robert Bergs „Scandinavian Forest Project“*

#### 4.1.2 Benötigtes Equipment

Für einen sehr einfachen Scan reicht eine Kamera allein aus; um mehr Möglichkeiten sowohl beim Fotografieren als auch in der Weiterverarbeitung des Assets zu haben, bietet es sich an, weitere Hilfsmittel zu verwenden:

##### **Stativ**

Ein Stativ ist bei dunkleren Bedingungen nötig, um scharfe Bilder mit längerer Belichtungszeit aufzunehmen. Hierfür kann auch bereits ein Monopod hilfreich sein.

Außerdem muss ein Stativ verwendet werden, wenn HDR Aufnahmen entweder für den Scan selbst oder als 360° HDRI-Panorama für ein späteres Delighting gemacht werden sollen.

##### **Colorchecker**

Um den Weißabgleich neutral einstellen zu können und die Farbtreue der Asset-Textur überprüfen zu können, kann ein Colorchecker verwendet werden.

##### **Grey- und Chromeball**

Nimmt man ein HDRI Panorama auf, muss dieses später richtig orientiert und dessen Beleuchtungsintensität festgelegt werden.

##### **Blackflag und Reflektoren**

Muss ein Objekt am Set bei Sonnenschein gescannt werden, können Blackflags und Reflektoren eingesetzt werden, um die harten Schatten wegzunehmen und das Objekt gleichmäßig zu beleuchten.

**Maßband** oder sonstige Hilfsmittel, um das Objekt vermessen zu können

##### **Polarisationsfilter**

[Lachambre, Sébastien u.a. 2017]

##### **Drohne**

Bei sehr großen Objekten wie Gebäuden kommt man ohne kameratragfähige Drohne oft nicht weiter, da die Perspektive von oben für die Ansicht von Dächern etc. fehlt. Consumer-Fotodrohnen haben oft eine schlechtere Bildqualität, sodass mit Qualitätseinbußen gerechnet werden muss. Multicopter mit Aufhängung für eine hochwertigere Kamera produzieren deutlich bessere Ergebnisse. Dabei wird der Scan aber



zu einem größeren Projekt, da ein Pilot engagiert sowie oft eine Aufstiegsgenehmigung eingeholt werden muss.

Für einen Scan in einem Studio kann zusätzlich folgendes Equipment verwendet werden:

**Mehrere Blitz- oder Dauerlichter**

**Lichtzelt**

**Weißer/ Schwarzer/Grüner Hintergrund**

**Drehteller**

Um gleichmäßige Abstände bei den Aufnahmen rund und das Objekt machen zu können, kann der Drehteller mit Winkelmarkierungen versehen werden.

Mittlerweile gibt es auch bereits automatisierte Systeme für die Aufnahme der Bilder in einem Studio. Dafür werden entweder Kameraarrays verwendet, was sehr teuer, dafür aber schneller ist, oder Systeme mit nur einer einzelnen Kamera, wie auf Abbildung 12 zu sehen.



*Abbildung 12: Automatisiertes System mit gekoppeltem Slider und Drehteller*

### 4.1.3 Aufnahmetechnik

Nachdem zufriedenstellende Lichtbedingungen geschaffen wurden und das zu scan-  
nende Objekt von ungewollten Details oder Gegenständen befreit worden ist, sollte  
das Ganze dokumentiert werden.

Dazu werden Referenzbilder mit Colorchecker, Maßband, Chrome- und Greyball ge-  
macht.

Zudem muss auch das 360° HDRI aufgenommen werden, das zum einen als Referenz  
dient, aber auch direkt als Ausgangsbild für das Delighting der Textur verwendet wird.  
In Kapitel 6 wird näher darauf eingegangen.

Möglichst zeitnah, um eine Veränderung der Lichtsituation möglichst klein zu halten,  
werden dann die Fotos für den Scan gemacht.

Grundsätzlich verbessert eine höhere Anzahl an Aufnahmen auch den Scan, aller-  
dings hat eine große Anzahl an Bildern auch Nachteile. Neben höherem Speicher-  
platzbedarf und längerer Zeitdauer bei der Berechnung der Pointcloud, hat eine grö-  
ßere Bilder- und damit Datenmenge auch Auswirkungen auf die Arbeitsspeicher-  
platz-Belegung. Sollten also sehr viele hochauflösende Bilder gemacht werden, muss  
darauf geachtet werden, dass der PC oder Workstation eine ausreichende Menge an  
Arbeitsspeicher hat.

Anhand der Tabelle auf Abbildung 13 kann in etwa abgeschätzt werden, wie viel RAM  
für die Berechnung in PhotoScan benötigt wird.

Photos	20 - 50	100	200	500
Lowest quality	100 MB - 300 MB	150 MB - 450 MB	300 MB - 1 GB	1 GB - 3 GB
Low quality	500 MB - 1.5 GB	750 MB - 2.2 GB	1.5 GB - 4.5 GB	4 GB - 12 GB
Medium quality	2 GB - 6 GB	3 GB - 9 GB	6 GB - 18 GB	15 GB - 45 GB
High quality	8 GB - 24 GB	12 GB - 36 GB	24 GB - 72 GB	60 GB - 180 GB
Ultra high quality	32 GB - 96 GB	48 GB - 144 GB	96 GB - 288 GB	240 GB - 720 GB

*Abbildung 13: Agisoft PhotoScan: Benötigter Arbeitsspeicher für die Mesh-Berechnung im Arbitrary Mode. Die Bilderanzahl bezieht sich auf eine Auflösung von 12 MP. Die Berechnungsdauer nimmt etwa linear mit der Sensorauflösung zu*

Wie in 3.2.3 (Dynamikumfang/Belichtung) erklärt, wird danach die Belichtung an der  
Kamera eingestellt. Der ISO-Wert sollte dabei so niedrig wie möglich sein, um Bild-  
rauschen zu vermeiden. Die Blende sollte je nach Aufnahmeentfernung zwischen 8

und 16 liegen. Größere Blenden können zwar die Lichtsituation verbessern, dürfen den Fokusbereich aber nicht zu sehr verringern.

Wenn die Kamera es ermöglicht, sollten die Bilder als RAW-Dateien gespeichert werden.

Das Ziel der Aufnahmen ist es, das Objekt vollständig abzudecken. Man fotografiert das Objekt üblicherweise in mehreren Reihen ab. Bei Drehtellern wird häufig eine Drehung des Objekts (bzw. um das Objekt) von  $10^\circ$  verwendet. Diese Daumenregel kann in etwa auch draußen übernommen werden. Photogrammetrie ist ein sehr flexibles Aufnahmeverfahren, auch wenn die Anordnung der aufgenommenen Bilder keinem sichtbaren System folgt, stellt das keine Schwierigkeiten für die Berechnung dar [Pomaska, Günter 2017]. Dennoch ist ein System sinnvoll, um nicht selbst durcheinanderzukommen und möglicherweise Bereiche zu vergessen.

Die Bilder sollten sich um mindestens 60% überlappen.

Manche komplexeren Geometrien erfordern aber auch eine Abweichung von dem System, beispielsweise wenn Teilbereiche verdeckt werden. Es ist also sinnvoll, von kritischen Formen des Objekts mehr Aufnahmen zu machen.

Hat der genutzte Kamerasensor keine hohe Auflösung oder möchte man den Detailgrad des Assets weiter steigern, lohnt es sich, zusätzlich zu den bereits aufgenommenen Bildern weitere Fotos mit geringerer Aufnahmedistanz zu machen. Es sollte aber beachtet werden, dass auch hier möglichst viel des Objekts abgedeckt werden sollte, da es sonst in der Textur sichtbare Unterschiede zwischen Bildern mit unterschiedlicher Aufnahmeentfernung geben kann.

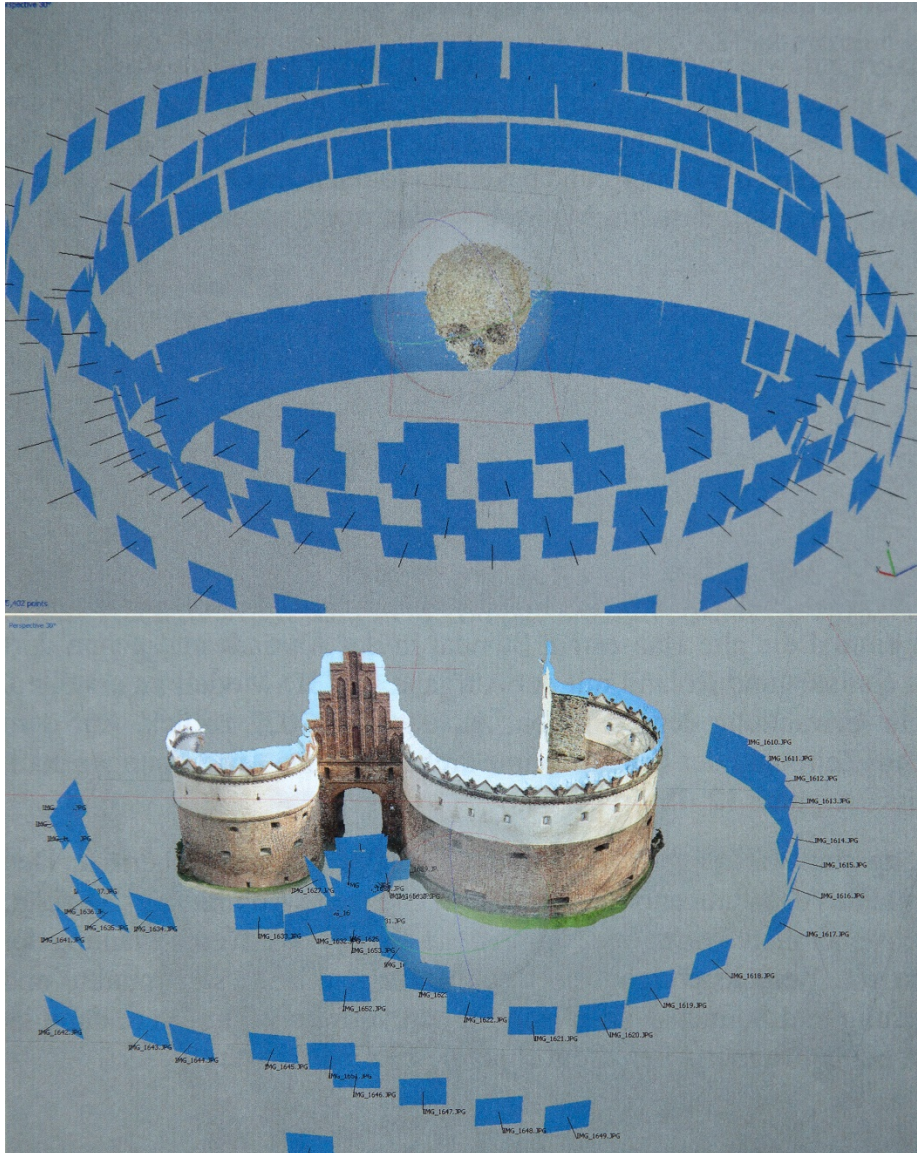


Abbildung 14: Je nach Scanobjekt muss die Anordnung der Aufnahmepositionen angepasst werden, damit es nicht zu Verdeckungen kommt



## 4.2 Verarbeitung der Bilder

### 4.2.1 RAW-Entwicklung

Einige Photogrammetrie-Programme können RAW-Dateien direkt verarbeiten. Um den Weißabgleich richtig einstellen zu können und weitere Anpassungsmöglichkeiten zu haben, sollten Bilder im RAW-Format aber vorher in ein anderes konvertiert werden.

Hierfür gibt es verschiedene RAW-Konverter; deutlich am häufigsten eingesetzt ist Adobe Camera Raw (im Folgenden ACR), welcher auch überwiegend für die Tests in dieser Arbeit benutzt wurde.

Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von DCRaw, wie es im Unity-Workflow gemacht wird [Lachambre, Sébastien u.a. 2017]. Dabei handelt es sich um eine executable Datei, die im gleichen Ordner wie die Bilder abgelegt wird und per cmd-Fenster Befehle entgegennimmt.

Während ACR eine Vorschau über das Bild mit eingestellten Parametern gibt, hat DCRaw diese Funktion nicht. Dafür kann man mit DCRaw eine korrekte lineare Konversion von TIFF- in RAW-Dateien erreichen, was mit ACR nicht möglich ist.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass eine nicht-lineare Konversion in ACR aufgrund eines natürlicheren Looks und mehr Einstellmöglichkeiten ebenfalls geeignet ist.

Für die RAW-Entwicklung der Bilder zur Berechnung der Pointcloud werden die Tiefen etwas aufgehellt sowie die Highlights etwas reduziert, um Details nicht zu verlieren. Es sollte aber darauf geachtet werden, dass das Bild nicht zu viel Kontrast verliert, da die Anzahl der erkannten Merkmale sonst sinken kann und die berechnete Pointcloud ungenauer wird.

Die Nachschärfung sollte niedrig bleiben, damit keine Halos um Kontrastkanten entstehen.

Eine besonders nützliche Einstellung von ACR ist die weitgehende Eliminierung von chromatischen Aberrationen, die bei Objektiven, die der Software bekannt sind, meistens sehr gute Ergebnisse liefert.

Bei einer Weiterverarbeitung in Agisoft PhotoScan sollte die automatische Entfernung von Vignette und Verzeichnung allerdings nicht eingeschalten sein, da die Software

diese – abgesehen von Ultraweitwinkel-Objektiven – selbst berechnet. [Agisoft LLC 2018]

Anschließend werden die Einstellungen für alle Bilder synchronisiert und gespeichert. Für optimale Pointcloud-Ergebnisse wird das TIFF-Format in 16-bit gewählt. Falls nicht genug Arbeitsspeicher zur Verfügung steht oder die Zeit für die Berechnung verkürzt werden kann, können die Bilder auch ins JPEG-Format konvertiert werden (siehe Kapitel 3.2.2). Für gute Bearbeitungsmöglichkeiten der Textur ist es aber dennoch nötig, zusätzlich TIFF-Dateien zu speichern. Diese können in der Bearbeitung von den Bildern zur Pointcloud-Berechnung abweichen, solange sie nicht zugeschnitten werden oder die Verzeichnung geändert wird. Am Ende der Modelberechnung aber vor der Ausgabe der Textur ersetzen diese dann die JPEG-Bilder.

### **4.2.2 Focus Stacking**

Wurden aufgrund einer geringen Tiefenschärfe von jeder Kameraposition aus Bilderserien mit unterschiedlicher Fokusdistanz gemacht, müssen diese nach der RAW-Entwicklung verarbeitet werden. Besonders bei kleineren Objekten und dem Einsatz von Makroobjektiven ist dies oft notwendig.

Dabei kann Software wie Adobe Photoshop, Helicon Focus, Zerene Stacker und Combine ZP eingesetzt werden.

Zu beachten ist aber, dass Focus Stacking einen beträchtlichen Zeitaufwand sowohl bei der Aufnahme als auch bei der Weiterverarbeitung der Bilder bedeutet.

### 4.3 Pointcloud- und Modelberechnung in Agisoft PhotoScan

Für die Berechnung des Models gibt es mittlerweile einiges an Software. In dieser Arbeit werden allerdings keine Programme miteinander verglichen.

Stattdessen sollen hier einige Beispiele aufgelistet werden:

Agisoft PhotoScan ist eine stand-alone Software, die bereits einige Jahre auf dem Markt ist. Sie hat einen recht breiten Einsatzbereich, allerdings gibt es mittlerweile schnellere Software. Dennoch findet es auch noch in größeren Studios wie z.B. Cinecité Verwendung [Failes, Ian 2015]. Aufgrund der Möglichkeit zum Kauf einer Educational Lizenz wurde Agisoft PhotoScan auch für die Tests im Rahmen dieser Arbeit verwendet. Während dem Verfassen dieser Arbeit wurde Agisoft Photoscan in Agisoft Metashape umbenannt.

Reality Capture ist ein sehr umfangreiches Programm, das seit seinem Release 2016 auf dem Vormarsch ist. Neben der Möglichkeit, Laserscans mit Photogrammetrie zu verbinden, punktet es vor allem durch seine Geschwindigkeit im Vergleich zu anderer Software. Der Lizenzpreis ist allerdings sehr hoch.

Autodesk Recap Photo ist eine Software, bei der das Model nicht mit eigener CPU berechnet wird, sondern in einer Cloud, in die man die Bilder hochlädt und anschließend das Model herunterladen kann. So wird die Leistung des eigenen PCs während der Berechnungen nicht beeinträchtigt.

Daneben gibt es auch kostenfreie Programme wie z.B. COLMAP oder Meshroom. Letzteres gibt es auch als Plugin für Autodesk Maya.

Der Workflow in diesen Programmen ist meist ähnlich, manche haben mehr, manche weniger Einstellungsmöglichkeiten bzw. Zwischenschritte.

Der grobe Ablauf der Modelerstellung soll anhand von Agisoft PhotoScan gezeigt werden.

Nach dem Import der Bilder wird zunächst die Sparse Pointcloud errechnet, die die Ergebnisse der Ausrichtung der einzelnen Fotos repräsentiert. Daraus ergeben sich die Kamerapositionen, die Sparse Pointcloud selbst wird aber nicht weiterverwendet.

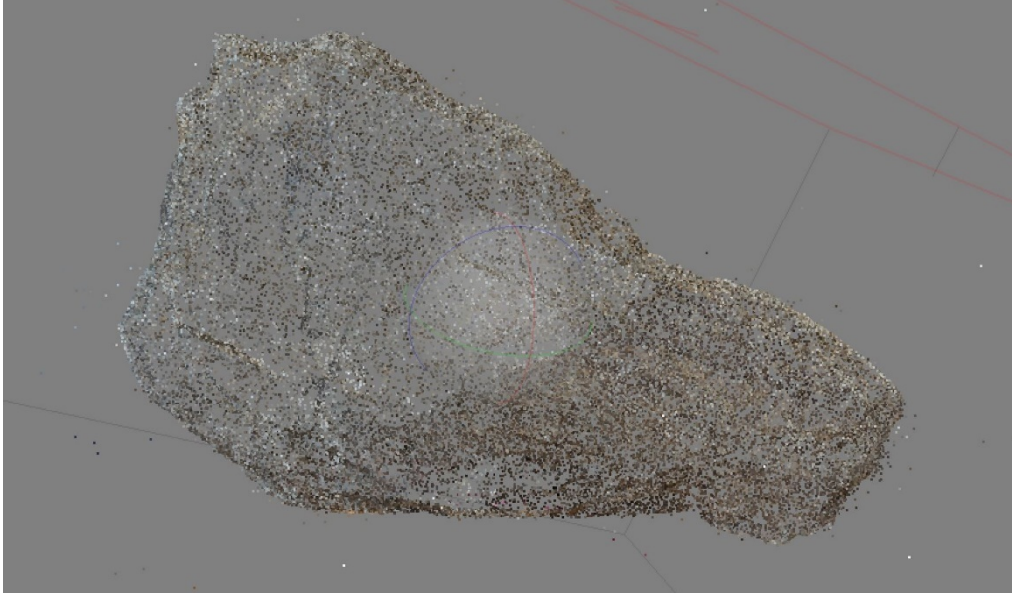


Abbildung 15: Sparse Point Cloud

Im nächsten Schritt wird die Dense Point Cloud berechnet, welcher mit Abstand der zeitaufwändigste Teil ist. Die Einstellmöglichkeiten für die Qualität der Dense Cloud von „Lowest“ zu „Ultra High“ haben enorme Auswirkungen auf die Dauer der Berechnung. Es hat sich gezeigt, dass es zwischen „High“ und „Ultra High“ kaum sichtbare Unterschiede im Ergebnis gibt.

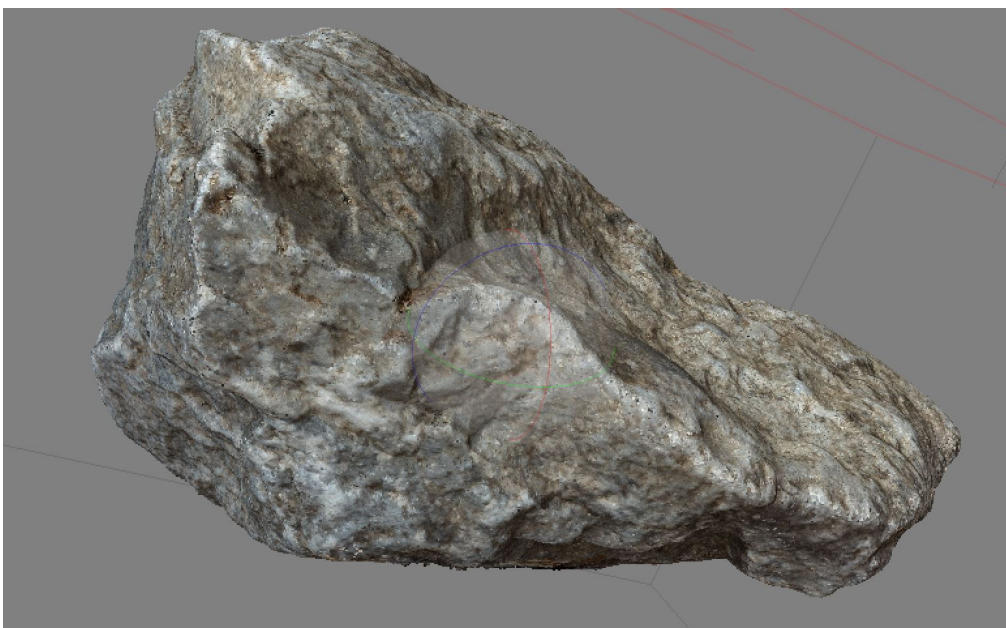


Abbildung 16: Dense Point Cloud

Anschließend wird das Mesh berechnet. Bei flachen Oberflächen wird die „Height field“ Methode verwendet, für alle anderen Objekte muss auf die „Arbitrary“ Methode umgestellt werden. Zudem hat man hier bereits die Möglichkeit, den ungefähren Polycount einzustellen. Es empfiehlt sich, zunächst ein genaueres Mesh zu erstellen und den Polycount erst im Nachhinein zu reduzieren.

Im letzten Schritt wird die Textur auf die Geometrie projiziert. Falls die Bilder zur Texturierung anders bearbeitet sein sollen als die Bilder zur Berechnung der Geometrie, sollten diese jetzt noch ausgetauscht werden.

Es gibt unterschiedliche Mapping Modes zum Erstellen der Textur. Für die meisten Objekte wird der „Generic“-Modus verwendet. Entsteht bei flachen Scanobjekten eine ungleichmäßige Textur, kann auf den Modus „Adaptive orthophoto“ umgestellt werden, bei dem die flachen Teile des Objekts gesondert zu den übrigen vertikalen Flächen texturiert werden [Agisoft LLC 2018]. Der letzte Mapping Mode „Keep uv“ wird in einem der nächsten Kapitel weiter erläutert.

Zusätzlich wird die Auflösung der Textur eingestellt.

Anschließend kann das Model als .obj, .fbx etc. exportiert werden. Die Textur wird dabei ebenfalls exportiert, dabei sollte diese als TIFF-Datei gespeichert werden, um möglichst viel Spielraum beim Delighting zu haben.

Es hat sich gezeigt, dass beim Export von JPEG-Dateien ein automatisches Edge-Bleeding der automatisch erzeugten UVs erstellt wird, beim Export von TIFF-Dateien allerdings nicht. Um dennoch eine TIFF-Textur mit Edge-Bleeding zu erhalten sollte zusätzlich ein .jpg exportiert werden, in Photoshop unter die TIFF-Textur gelegt und anschließend als 16-bit TIFF-Bild gespeichert werden.

## 4.4 Assetoptimierung

Bevor es sich in einer 3D-Szene sinnvoll einsetzen lässt, sollte das aus Agisoft oder anderer Photogrammetrie Software exportierte Model vorher optimiert werden.

Das Asset weist häufig noch Fehler auf, wie schwebende Faces und verbundene Geometrien, die eigentlich getrennt voneinander sind („Schwimmhäute“). All diese Fehler müssen in einem 3D-Programm manuell entfernt werden. Bei komplexen Geometrien, bei denen beim Scan viele Ungenauigkeiten entstehen, kann dieser Prozess auch länger dauern.

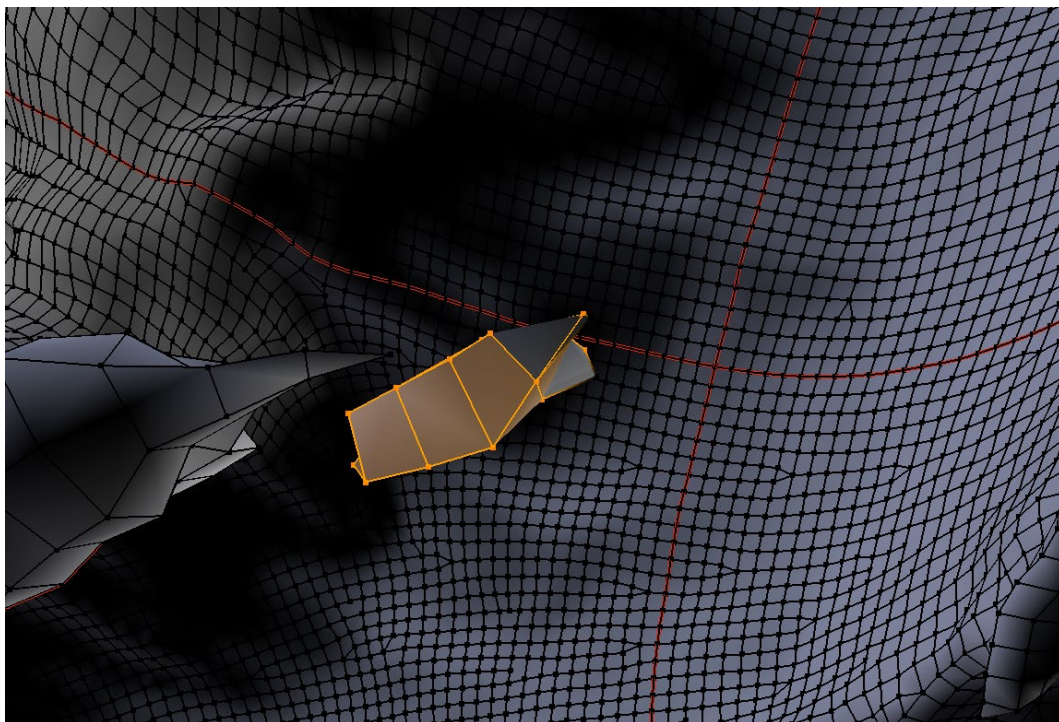


Abbildung 17: Häufiger Fehler im unbearbeiteten Asset: schwebende Faces

Außerdem besteht das 3D-Model noch aus sehr vielen Polygonen und hat sehr ineffiziente UV-Koordinaten.

Die Frage, auf wie viele Polygone das Mesh reduziert (retopologisiert) werden soll, richtet sich nach dem angestrebten Anwendungsbereich. Für Game-Assets muss das Mesh generell stärker reduziert werden als bei Anwendungen für Offline-Rendering. Ein Mesh mit hohem Polycount wirkt sich generell negativ auf die Renderzeit und auf die Performance beim Bearbeiten einer Szene im 3D-Programm aus.



Eine manuelle Reduzierung der Polygonanzahl ist sehr zeitaufwändig, da im Prinzip das komplette Asset nachmodelliert werden muss. Dies lohnt sich dementsprechend nur bei sehr einfachen Geometrien.

Die meisten 3D-Programme haben Features für eine automatische Retopologisierung. Dabei stellt man oft die ungefähr gewünschte Anzahl an Polygonen ein und die Software berechnet dann den Rest. Oft hat man aber kaum Möglichkeiten, weiteren Einfluss auf das Mesh zu nehmen.

Um weiteren Einfluss auf das Mesh nehmen zu können, bietet sich der Einsatz von halbautomatischer Retopologierungssoftware wie Instant Meshes an, welches am Interactive Geometry Lab der ETH Zürich entwickelt wurde.

Neben Angabe der ungefähren gewünschten Polygonanzahl hat man bei Instant Meshes auch die Möglichkeit, sich zwischen Triangles und Quads zu entscheiden. Außerdem gibt es ein Tool, um das Orientation Field zu steuern, an dem am retopologisierten Mesh dann später die Polygonkanten verlaufen.

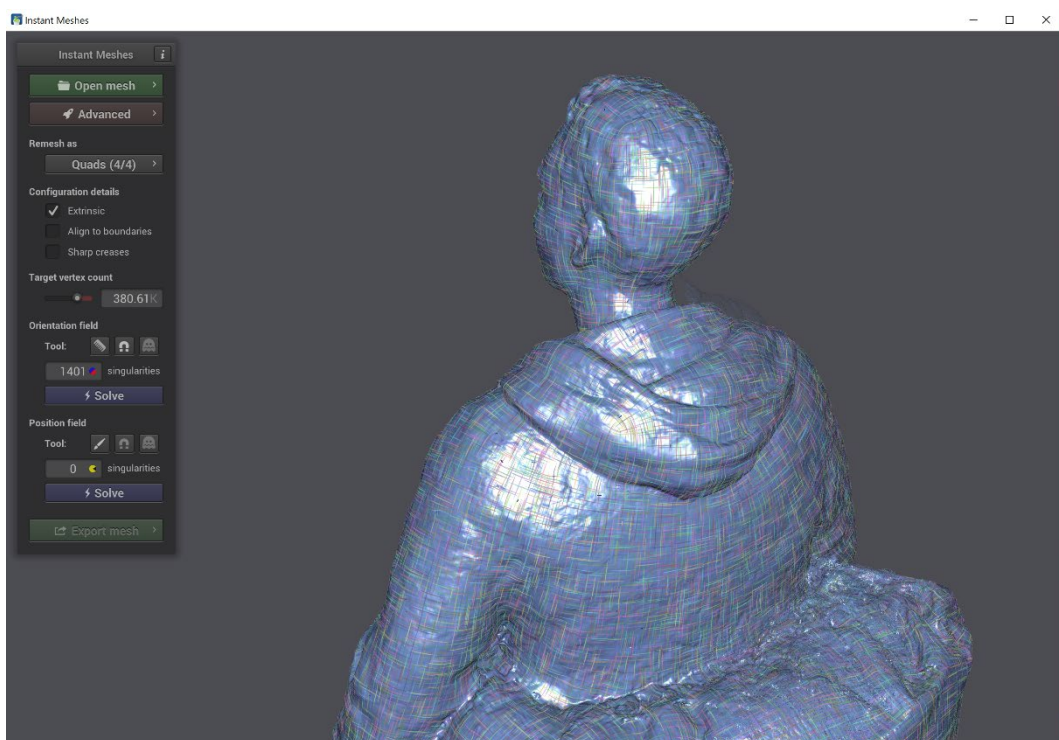


Abbildung 18: In Instant Meshes lässt sich das Orientation Field des retopologisierten Meshes einstellen (farbige Linien)

Eine gleichmäßige Ausrichtung der Kanten ist hilfreich, um das Asset im nächsten Schritt in einem beliebigen 3D-Programm mit vernünftigen UVs auszustatten. Dies ist bei sehr komplexen Objekten zwar manchmal schwer möglich bzw. sehr aufwändig, bei einfachen Geometrien wie der auf Abbildung 18 zu sehenden Skulptur aber sinnvoll, um auch bei einer Weiterbearbeitung der Textur an großflächigeren und strukturierten Bereichen arbeiten zu können.

Der Nachteil bei einer Reduzierung des Polycounts ist, dass Details verloren gehen. Deshalb gibt es Utility Maps, um die am Mesh verloren gegangenen Details über andere Wege zu erhalten.

Am üblichsten ist das Normal Mapping, bei dem eine Textur erstellt wird, die Informationen über die Ausrichtungen der Normalen des High-Poly-Models gibt. Um diese Textur berechnen zu können, wird sowohl die High-Poly-, als auch die Low-Poly-Version des 3D-Assets benötigt. Für das Texture-Baking gibt es dann verschiedene Software wie xNormal (für diese Arbeit verwendet), Knald oder Substance Designer. Die entstandene Normal Map kann dann eingesetzt werden, um bei einer Beleuchtung des Objekts alle kleinen Details zu erhalten. Auf den Umriss des Objekts, also auf die tatsächliche Geometrie, kann eine Normal Map aber keinen Einfluss nehmen.

Sollen auch in der Geometrie keine Details verloren gehen, kann eine Displacement Map berechnet werden. Diese kann Einfluss auf das tatsächliche Mesh nehmen und dieses verformen. Während das Low-Poly-Model in Kombination mit einer Displacement Map im Vergleich zum High-Poly-Model zwar kaum Veränderung bei der Renderzeit bringt, kann eine Displacement Map immerhin die Performance während der Arbeit im 3D-Programm deutlich steigern. Man arbeitet mit dem Low-Poly-Asset, zum Rendern wird das Mesh dann unterteilt (Subdivision) und die Displacement-Map angewandt.

Weitere Utility Maps wie Ambient Occlusion, Curvature, Cavity, Thickness etc können ebenfalls erstellt werden.



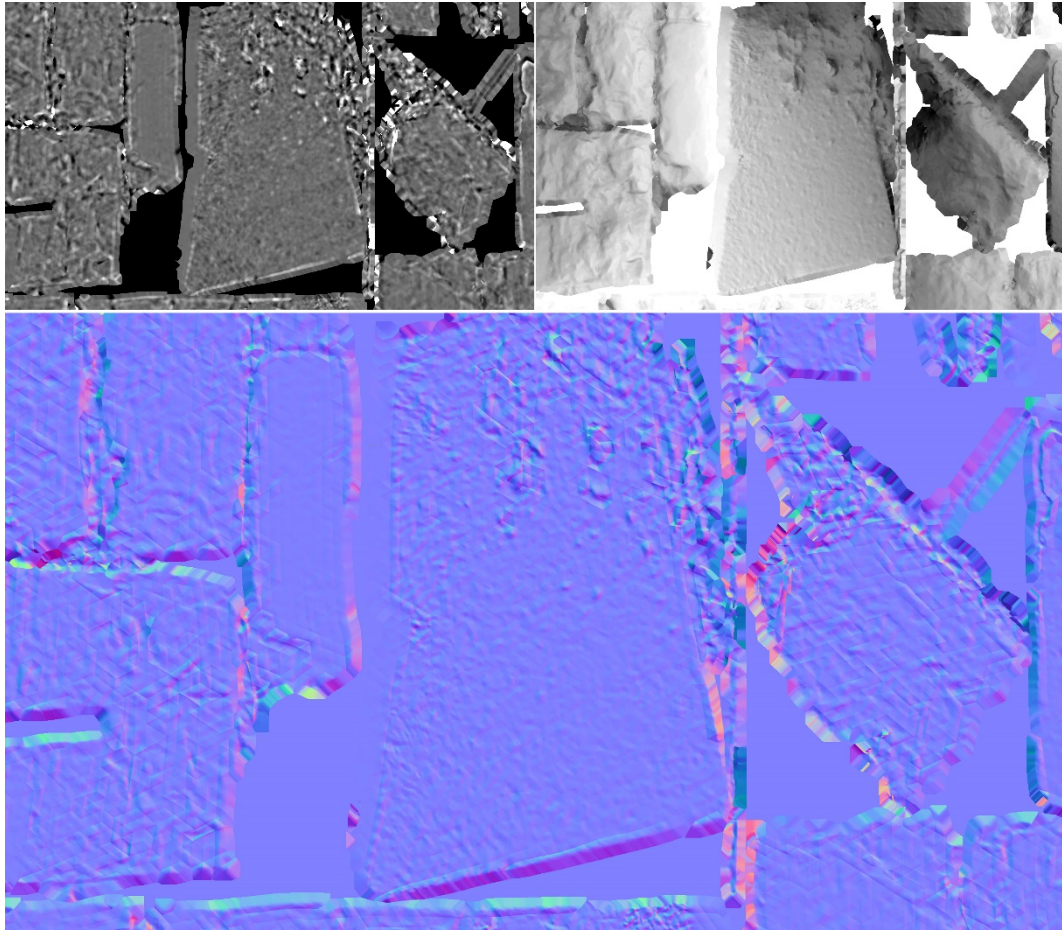


Abbildung 19: Einige Utility-Maps zum Erhalt von Details: Displacement Map (o.l.) Ambient Occlusion Map (o.r.) und Normal Map (unten). (Alle Bilder sind Ausschnitte einer größeren Textur)

## 5. Delighting der Textur

### 5.1 Gründe für das Delighting

Ein großer Vorteil der Photogrammetrie ist die realistische Textur, weil diese unter realen Bedingungen aufgenommen wurde und in direktem Zusammenhang zur Geometrie steht. Diese Tatsache bedeutet aber auch, dass die Textur nur unter den Lichtbedingungen, die bei der Aufnahme geherrscht haben, gut in der Szene funktioniert.

Das liegt an der in die Textur integrierte Lichtinformation (Baked Lighting). Diese zeigt sich bei punktförmiger Lichtquelle in Form von harten Schatten, aber auch bei gleichmäßiger Ausleuchtung ergeben sich Schattierungen durch Umgebungsverdeckung am Objekt (Ambient Occlusion). Da fast jedes Material einen gewissen Reflexionsgrad hat, spielen auch Highlights in der Textur eine Rolle.

Bei vielen Objekten ist nahezu unmöglich, diese so zu beleuchten, dass die Textur kein Baked Lighting enthält.

Bevor die Textur weiterbearbeitet wird, stellt sich die Frage, wofür das Asset erstellt wurde.

Wenn das Objekt z.B. am Set unter den gleichen Bedingungen gescannt wurde wie in dem zugehörigen Shot im Film herrschen, können sich in der Textur enthaltene Lichtinformation positiv auswirken, da das Licht der Assettextur schon zu einem gewissen Grad zu dem in der Szene passt.

Häufiger tritt aber der Fall auf, dass ein Asset einmal gescannt wird und dann mehrmals in verschiedenen Szenarien auftaucht. Gerade für Games werden Assets auch erstellt, um später in beliebigen Lichtsituationen verwendet zu werden.

In diesen Fällen ist eine Textur mit Baked Lighting oft unbrauchbar, da das Asset bei einem Relighting dann unglaublich aussieht. (Abbildung 20)

Um das Asset in anderen Szenen also beliebig einsetzen zu können, muss vorher das Baked Lighting aus der Textur entfernt werden (→Delighting).



*Abbildung 20: Relighting eines Assets mit Textur ohne Delighting. Das Licht beim Scannen kommt von Links oben, das Licht in der 3D-Szene von rechts oben. Der in die Textur integrierte harte Schatten lässt das Ergebnis unrealistisch aussehen*

## 5.2 Möglichkeiten zum Delighting

Ein guter Ausgangspunkt kann schon bei der Beleuchtung des zu scannenden Objekts geschaffen werden. Soll die Textur so weit wie möglich delighted werden, sollte das Objekt gleichmäßig von allen Seiten beleuchtet sein, um einen stärkeren einseitigen Schatten zu vermeiden.

Eine gute Beleuchtung kann einem später also Arbeit abnehmen, hat aber nicht die Möglichkeit, das Objekt komplett vom Baked Lighting zu befreien. Besonders bei komplexeren Geometrien kommt es leicht zu Schattierungen durch Umgebungsverdeckung.

Wenn in der Natur oder am Set die Zeit oder das Equipment nicht aufgebracht werden kann, um eine gleichmäßige Beleuchtung zu ermöglichen, ergeben sich oft auch stärkere Schattierungen.

Es müssen also Möglichkeiten gefunden werden, die Textur in der Nachbearbeitung von Lichtinformation zu befreien.

### 5.2.1 Bearbeitung durch Tonwertanpassungen und Filter

Die enthaltene Lichtinformation in der Textur zeigt sich vor allem durch dunkle (Schatten) und helle Bereiche (Highlights). Um diese Lichtinformation zu reduzieren, liegt es also nahe, die besonders dunklen und hellen Stellen in der Textur anzugleichen.

Der einfachste Weg ist also, die Tiefen anzuheben und die Lichter zu reduzieren (z.B. in Adobe Camera Raw). Dadurch verringert sich der Kontrast der gesamten Textur, subjektiv sind Schatten dadurch schlechter zu sehen. Das Problem dabei ist, dass nicht nur die Schattierungen aufgehellt werden, sondern auch die dunkleren Tonwerte der Albedo-Textur an sich.

Eine weitere Möglichkeit, den Kontrast zu reduzieren, liegt in der Anwendung eines Hochpassfilters mit größerem Radius in Photoshop [Oh, Min 2015]. Dadurch kann der Kontrast lokal besser angepasst werden. Anschließend muss die Farbinformation der Textur allerdings durch eine weitere Ebene im Modus Color wieder zurückgeholt werden.

Diese Technik hat selbstverständlich Nachteile, da sie die Geometrie des Objektes nicht berücksichtigt und damit nicht in der Lage ist, Schatten zu „erkennen“ und effektiv zu entfernen.

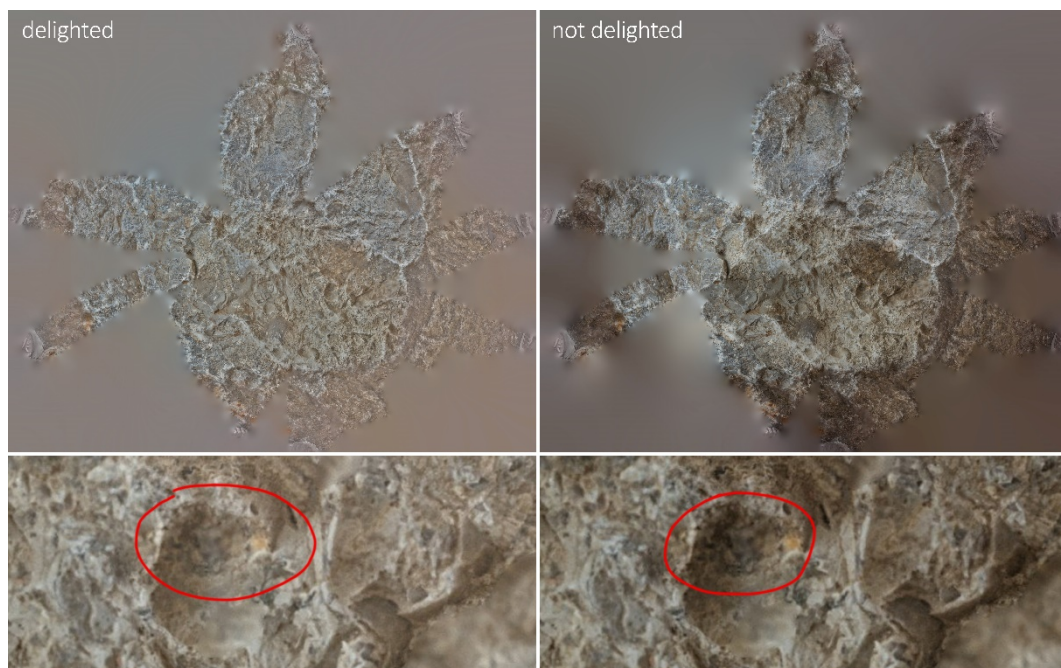


Abbildung 21: Mit in 5.2.1 beschriebener Technik sind Schattierungen zwar schwieriger zu erkennen. Da die Geometrie aber nicht berücksichtigt wird, können Schatten nicht komplett eliminiert werden

### 5.2.2 Unity Delighting Tool

Seit Ende 2017 gibt es ein Tool von Unity Technologies zum Delighting von photographisch erstellten Assets. Das Tool wird über das Asset-Store heruntergeladen und in Unity installiert. Zu beachten ist, dass es im Moment noch nicht auf der Unity Version 2018.x zu funktionieren scheint, was auch von Unity Technical Artist Cyril Jover bestätigt wird [Jover, Cyril 2018]. Es muss also im Moment Version 2017.x verwendet werden.

Das Tool ist auf Game-Assets ausgerichtet, es lässt sich aber genauso für Assets verwenden, die offline gerendert werden.

Grundsätzlich hat man bei einer Textur, die delighted werden soll, drei Parameter: Die Surface Color (Textur mit Baked Lighting), die Albedo-Textur und die Beleuchtungsinformation. Um die Textur zu delighten, wird also die Albedo Textur gesucht und die Surface Color ist bekannt. D.h., dass die Beleuchtungsinformation ebenfalls bestimmt werden muss, um die Albedo Textur berechnen zu können.

Während im nächsten Gliederungspunkt (Delighting mittels HDRI) die Beleuchtungsinformation durch Fotos der Scanumgebung gegeben ist, wird im Unity Delighting Tool eine LatLong Map (von Cyril Jover „Directional Color Map“ genannt) berechnet, um die Beleuchtungsinformation für das Asset zu erhalten.

Für diese Berechnung wird die World Normal Map (alternativ auch Object-Normal-Map), die World Bent Normal Map (ebenfalls auch Object Space möglich) sowie die Ambient Occlusion Map benötigt.

Diese drei Maps werden also zusätzlich zur Surface Color Textur für das Delighting Tool benötigt. Das Tool selbst ist sehr einfach zu bedienen, allerdings sollten die vier Texturen mit der richtigen Dateierweiterung versehen werden, damit das Programm die Maps richtig zuordnen und interpretieren kann.

Anschließend lassen sich noch einige Anpassungen vornehmen. Zum Beispiel können kleinere Bereiche ausmaskiert werden, die ein anderes Material haben wie der Rest der Oberfläche (Beispiel: Bunte Farbflecken auf einem Stein), sodass diese nicht in die Berechnung der Directional Color Map einbezogen werden.

Außerdem kann eine Farbe in der Textur ausgewählt werden, um den Weißabgleich der extrahierten Beleuchtungsinformation richtig einzustellen. Denn selbst bei einem korrekten Weißabgleich vor dem Delighting kann sich dieser aufgrund der automatischen Weißabgleich-Einstellung im Unity Tool verändern.

### **5.2.3 Environment HDRI**

Das Baked Lighting in der Textur des Assets wird durch die Beleuchtungssituation vorgegeben, die beim Scannen des Objekts herrscht. Wenn man also diese Lichtinformation beim Scannen aufgenommen und dokumentiert hat, sollte sich mit dieser Information das Objekt nahezu perfekt delighen lassen.

Dazu wird ein 360°-Grad Panorama des Aufnahmeortes erstellt. Um den gesamten Dynamikumfang der Szene einfangen zu können, werden dabei Fotos mit unterschiedlichen Belichtungen gemacht und anschließend zu einem Bild mit deutlich höherem Dynamikumfang zusammengefügt (HDRI).

Die Idee ist nun, mittels Image Based Lighting (IBL) das Licht der realen Szene durch das HDRI-Panorama in einem 3D-Programm möglichst genau nachzubilden und dieses Setup dann zu benutzen, um das Asset zu beleuchten.

Die so beleuchtete Textur des Models sollte dann möglichst ähnliche Schatten aufweisen wie das Baked Lighting in der Textur. Ist dies der Fall, kann die neu berechnete Schattentextur benutzt werden, um z.B. in Photoshop mit der Originaltextur kombiniert zu werden und damit eine Albedo Textur zu erhalten.

Der genauere Arbeitsablauf bei dieser Delighting Methode sowie deren Grenzen, Möglichkeiten und Unterschiede zu den anderen Methoden werden im nächsten Punkt genauer beschrieben.



## 6. Delighting mittels HDRI

### 6.1 Grundlagen HDRI und IBL

High Dynamic Rang Imaging wird eingesetzt, um Szenen mit sehr hohem Dynamikumfang aufnehmen zu können, ohne Bildinformation zu verlieren. Diese geht bei digitalen Kameras dann verloren, wenn Bereiche entweder zu wenig belichtet sind, so dass diese nicht mehr vom Bildrauschen zu unterscheiden sind, oder Bereiche überbelichtet sind, sodass diese geclippt werden und damit weiß sind.

Besonders bei Tageslicht gibt es überwiegend Situationen, die einen so großen Dynamikumfang haben, dass Kameras, wie sie es im Moment gibt, diesen nicht komplett darstellen können. Soll keine Bildinformation durch rauschende oder weiße Bildbereiche verloren gehen, müssen mehrere unterschiedliche Belichtungen gemacht werden, damit jeder beliebige Bereich des Bildes auf mindestens einem Foto richtig belichtet ist. Die verschiedenen Belichtungen werden dann später verrechnet, damit ein einzelnes Bild mit einem deutlich höherem Dynamikumfang entsteht, das im Idealfall alle Helligkeitswerte der Szene darstellen kann.

Im Fotografie- und Filmbereich ist es natürlich wichtig, dass das aufgenommene Material auf dem Ausgabemedium gut aussieht. Der große Dynamikumfang der realen Szene von 15 Blenden und mehr muss auf den deutlich geringeren Dynamikumfang des Monitors (z.B. 8 Blenden), Beamers etc. herunterskaliert werden. Eine lineare Skalierung bringt aber meist schlechte Ergebnisse, da besonders dunkle Bereiche häufig wenige Helligkeitsabstufungen haben und dadurch Erkennbarkeit in diesen Bereichen verloren geht. Deshalb wird ein Tone Mapping angewandt, dessen Ziel es ist, das Bild so darzustellen, wie die Szene vom menschlichen Auge wahrgenommen wurde.

Für die Anwendung von PBR (Physically Based Rendering) oder den Einsatz von HDR Environment Maps für IBL ist aber weniger die Ästhetik des Bildes wichtig, sondern vielmehr die Pixelwerte, die als lineare Abbildung der einfallenden Beleuchtung gespeichert werden.

Um den großen Umfang an Helligkeitsstufen zu speichern, reichen 8-bit Formate nicht aus. Es gibt deshalb verschiedene weitere Formate, um HDR-Bilder zu speichern, wie z.B. HDR, TIFF oder EXR. Je nach Kodierung haben diese unterschiedliche Bittiefen von bis zu 96-bit/pixel bei IEEE floating point Kodierung (als 32-bit TIFF bekannt). Von der Dateigröße aus gesehen besser zu handhaben ist das HDR-Format mit 32-bit XYZE Kodierung, TIFF-Dateien mit 32-bit LogLuv Kodierung und das EXR-Format mit HALF RGB Kodierung in 48-bit. [Reinhard, Erik u.a. 2010]

IBL eignet sich deswegen so gut für ein Delighting, da die zugrunde liegenden HDR Bilder Informationen über Lichtfarbe und -intensität sowohl von direkten Lichtquellen als auch jegliches indirekte Licht der Umgebung enthalten und so eine optimale Ausgangssituation schaffen für eine globale Beleuchtung des Assets.

Diese globale Beleuchtung (Global Illumination / GI) funktioniert mit Algorithmen, die simulieren, wie sich das Licht von der Lichtquelle aus bewegt und zwischen verschiedenen Oberflächen reflektiert wird. Die meisten dieser Algorithmen beruhen auf dem Prinzip von Ray Tracing.

Bei GI-Algorithmen soll berechnet werden, wie viel Licht der Umgebung sowie dem Rest der Szene auf einem bestimmten Punkt ankommt bzw. wie viel von diesem Licht blockiert wird. Das Umgebungslicht (z.B. HDRI), welches von genau diesem Punkt aus sichtbar ist, wird addiert und die Stellen, an denen das Licht durch andere Gegenstände der Szene blockiert wird, werden ersetzt durch das von diesen Gegenständen reflektierte Licht.

Für die Berechnung eines Bildes wird das Prinzip umgekehrt. Von der Render-Kamera aus wird für jeden Pixel ein Strahl auf die Szene gerichtet. Trifft der Strahl nun auf ein Objekt der Szene, wird dieser davon abgelenkt. In welche Richtung der Strahl abgelenkt wird, hängt von den Oberflächeneigenschaften des Objekts ab. Bei diffusem Material wird der Strahl aufgeteilt in weitere Strahlen, die diffus von der Oberfläche reflektiert werden. Die Strahlen werden dann weiterverfolgt, bis diese auf die Environmap treffen, können vorher aber natürlich auch auf weitere Objekte treffen und ein weiteres Mal reflektiert werden. Die Pixelfarbe ergibt sich dann aus der Gesamtheit der Punkte, auf die der verfolgte Strahl getroffen ist. Damit kann das Prinzip zwar sehr



realistische Beleuchtung schaffen, ist dafür aber sehr rechenaufwändig verglichen mit anderen Render-Methoden. [Reinhard, Erik u.a. 2010]

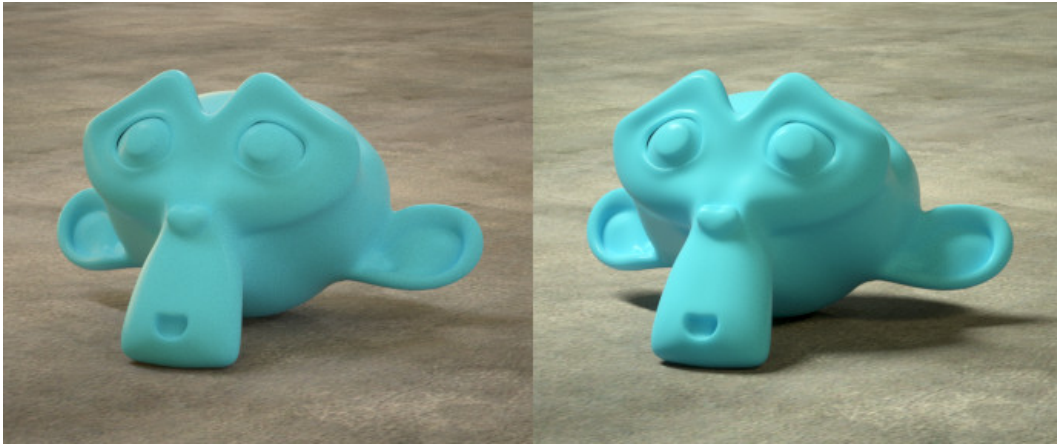


Abbildung 22: IBL mit einem JPEG Format (links) und einem HDR Format (rechts). Die 256 Helligkeitsstufen des JPEGs sind nicht in der Lage, die Beleuchtung realistisch darzustellen.

## 6.2 Praktische Tests in dieser Arbeit

Wie zu Beginn bereits erwähnt, wurden im Rahmen dieser Arbeit einige Photogrammetrie Assets erstellt. Diese dienten zum einen dazu, um bestimmte Programme und Techniken selbst zu testen und damit zu experimentieren und ebenso Bildmaterial zur Veranschaulichung in dieser Arbeit zu produzieren. Außerdem wurden Erfahrungsberichte von VFX- und Game-Artists in der Praxis ausprobiert und validiert. Zum anderen sind die Assets und deren Textur natürlich ein wichtiger Bestandteil für die Tests zum Delighting. Es ist notwendig, den Workflow ganz von Beginn zu durchlaufen, sowohl um die Entscheidung treffen zu können, welche Objekte unter welchen Bedingungen gescannt werden sollen, als auch um die HDR Bilder aufnehmen zu können. So wurde ermöglicht, zu jedem Zeitpunkt des Workflows Einfluss auf das Asset nehmen zu können oder im Nachhinein Dinge anpassen zu können.

Die Scanobjekte in dieser Arbeit weisen Materialien auf, die keine größeren Probleme bereiten, eine gute Textur zu erhalten, an denen die Tests zum Delighting durchgeführt werden können. Ebenso sind die Objekte unterschiedlich groß, da Delighting an Models mit verschiedenen Maßstäben auch unterschiedliche Ergebnisse liefern kann.

Konkret gibt es also drei Testobjekte:

- Ein kantiger Stein von etwa 8cm Länge (auf Abbildung 16 zu sehen)
- Eine etwa 1,5m große Skulptur, die mit Edding beschrieben ist und etwas heruntergekommen aussieht (Abbildung 23)
- Die Ecke einer bemoosten Natursteinmauer (Abbildung 23)

Folglich haben alle drei Objekte raue Oberflächen und eignen sich hervorragend zum Scannen mithilfe von Photogrammetrie.

Wichtig ist natürlich auch die Aufnahme- und Lichtsituation. Der Stein konnte als einziges Objekt bewegt werden und ist somit das einzige Asset, was drinnen unter kontrollierbaren Bedingungen aufgenommen werden konnte. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Stein von allen Seiten möglichst gleichmäßig beleuchtet wurde.

Die zweite Lichtsituation (unter der die Statue gescannt wurde) stellt fast optimale Bedingungen für einen Outdoorscan dar: nahezu gleichmäßig bewölkter Himmel.

Für den dritten Test wurde bewusst eine ungünstige Lichtsituation bei direktem Sonnenlicht gewählt, um die Grenzen des Texture-Delighting ausloten zu können.



*Abbildung 23: Zwei der Testobjekte*

## 6.3 Erstellung der Environment HDRI

Die benötigte Ausrüstung für die Aufnahme der Bilder wurde bereits in einem früheren Kapitel vorgestellt.

Neben der in diesem Kapitel vorgestellten Methode, Environment HDRI zu erstellen, gibt es noch eine weitere. Bei dieser wird eine Belichtungsreihe eines Chromeballs gemacht, eine sogenannte Lightprobe [Reinhard, Erik u.a. 2010]. Diese decken einen Großteil der Umgebung ab, produzieren aber gerade an den Randbereichen der Kugel einige Artefakte. Außerdem müsste die Kugel eine perfekte Oberfläche haben, die entweder schwer zu beschaffen oder teuer sind.

Aufwändiger, aber deutlich besser ist es, viele einzelne HDR Aufnahmen zu machen und diese danach zusammenzufügen. Diese Technik wurde auch für das Delighting der Assets angewandt.

Es gibt Rigs, die aus mehreren Kameras bestehen und so mit einer einzigen Auslösung die komplette Szene abdecken können. Der Vorteil dabei ist, dass der Aufnahmezeitpunkt folglich exakt der gleiche ist und es nicht zu Bewegungen von Menschen und Objekten in der Umgebung zwischen den Aufnahmen kommen kann.

Genauso möglich ist aber auch der Einsatz von nur einer Kamera. Normalerweise wird ein Panorama von einem festen Punkt aus fotografiert, optimalerweise sogar mit Nodalpunktadapter.

Um die Umgebung des Scan-Objekts möglichst von dem Standpunkt des Objekts aufnehmen zu können, sollte die Kamera genau an dessen Stelle stehen. Wenn das Asset allerdings nicht bewegbar ist, muss eine möglichst ähnliche Position gefunden werden. Ist das Objekt nicht besonders hoch, kann die Kamera darüber positioniert werden. Ansonsten wird das Stativ daneben gestellt. Daraus ergibt sich das Problem, dass auf einer Seite des Bildes die Umgebung bzw. das Licht vom Objekt verdeckt wird. Ein Workaround besteht darin, den Aufnahmepunkt zu verändern und die Kamera rund um das Asset herumzubewegen, sodass dieses nicht im Bild ist. Dies kann allerdings auch zu Problemen beim Zusammenfügen der Bilder führen, da sich die Parallaxe verändert und die Software Probleme bekommen kann, die Bilder richtig zu stitchen. Die sicherere Variante ist es, das Scan-Objekt in der Nachbearbeitung aus

dem Bild heraus zu retuschieren. Ziel ist es also, keine falsche Lichtinformationen in der Environment-Map zu haben.

Bei der Aufnahme sollte darauf geachtet werden, dass die Bilder eine ausreichend große Überlappung haben. Die Anzahl der Fotos der einzelnen Belichtungsreihen richtet sich nach dem Dynamikumfang der Umgebung. Ein Speichern der Bilder im RAW-Format führt zu den besten Ergebnissen.

Bewegungen in der Umgebung zwischen den Bildern können zu Fehlern beim Stitching führen, deshalb sollten z.B. am Film-Set wenn möglich keine Personen im Hintergrund der Aufnahmen zu sehen sein.

Im nächsten Schritt wird zunächst aus den Belichtungsreihen ein kombiniertes HDR Bild erstellt. Es gibt dafür eine große Auswahl an Programmen, die aber hier nicht verglichen werden sollen. In dieser Arbeit wurde Adobe Photoshop genutzt. Die Bilder werden dann in einem der in 6.1 genannten Formate gespeichert.

Anschließend müssen die Bilder noch zu einer LatLong Map (die als Environment Map dient) zusammengefügt werden. Dies kann in Stitching-Software wie PTGui, Autopano Pro o.Ä. gemacht werden.

Als Projektionsmodus wird dabei Equirectangular, manchmal auch als Spherical bezeichnet, ausgewählt.

Es soll erwähnt werden, dass kleinere Ausrichtungs-Fehler wie ungenaue Nähte zwischen den Bildern sowie Ghosting, was beim Erstellen der HDR Bilder entstehen kann, kaum Auswirkungen auf die Delighting Resultate haben, weil sich die Beleuchtung der Szene durch solch kleine Fehler kaum ändert.



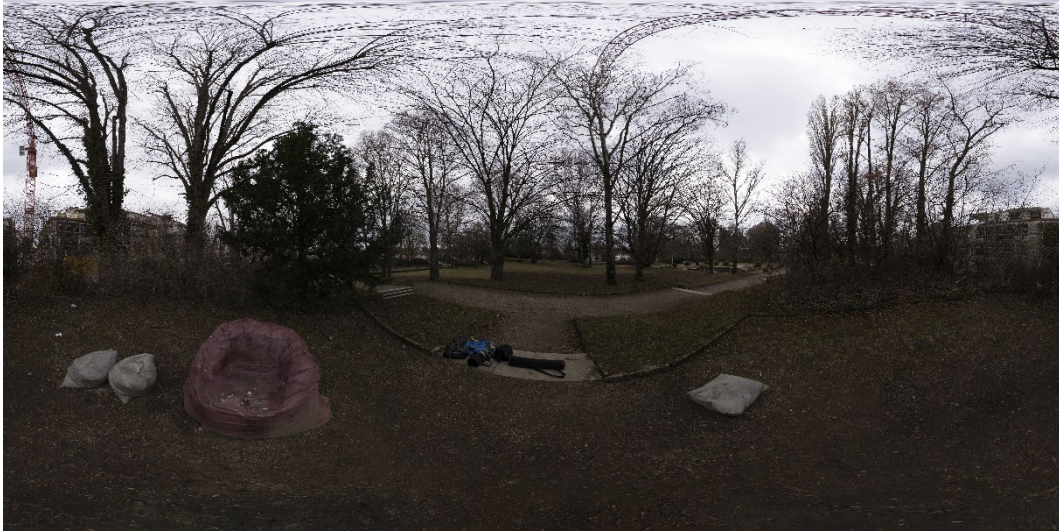


Abbildung 24: Environment Map, die zum Delighting der Statue benutzt wurde

## 6.4 Baking der Schattentextur und Delighting

Das Ziel der zuvor erstellten HDR Environment Map ist es, die Schatten auf dem Asset möglichst so darstellen zu können wie in der Realität.

In dieser Arbeit wurde dafür die OpenSource Software Blender mit integriertem Cycles Path Tracer benutzt. Die Software ist nicht Industrie-Standard, wird aber dennoch von vielen 3D-Artists benutzt.

Zunächst wird das Asset importiert und das HDRI als Environment Texture geladen. Es sollte darauf geachtet werden, dass das Model im richtigen Maßstab in der Szene vorliegt.

Danach wird die Environment-Map ausgerichtet, wofür ein Referenzfoto z.B. auch mit Chromeball verwendet werden kann. Bei diffusem Umgebungslicht ist eine Abweichung von wenigen Grad meist nicht so gravierend, bei direkter Beleuchtung ist eine exakte Ausrichtung des HDRI aber nötig, da der Schlagschatten sonst ungenau ist.

Falls auch ein Bild mit Greyball beim Scan gemacht wurde, wird anschließend eine Sphere in die 3D-Szene geladen in der gleichen Farbe wie der Greyball (optimalerweise 18% grau). Anhand der Referenzbilder wird dann die Lichtintensität der Environment Texture verändert, bis die Sphere in der Szene optisch zum Greyball passt.

Die Sphere kann dann wieder ausgeblendet werden und ein Diffuse Shader mit einem mittleren Grau wird auf das Asset angewandt. Zu diesem Zeitpunkt hat man also die

Lichtbedingungen der Scanumgebung optimalerweise exakt auf die Szene übertragen und kann die Beleuchtung auf dem grauen Model nochmal überprüfen und zum Beispiel auch mit den Scanbildern abgleichen.

Anschließend wird die Lichtinformation beim Baking auf eine 2D-Textur übertragen. Der Bake Type kann dabei je nach Software variieren, in Blender wird nur die Diffuse Map exportiert, in die bereits das Umgebungslicht integriert ist, in Maya wird die Shaded Option verwendet.



*Abbildung 25: UV-Map der Statue mit ausschließlich Lichtinformation*

Da jetzt die beim Scan entstandene Textur sowie eine Textur mit der Lichtinformation vorhanden ist, kann daraus eine Albedo Textur ohne Baked Lighting erstellt werden. Das wird in einem 2D-Bildbearbeitungsprogramm wie Photoshop gemacht, aber auch in Nuke wurde getestet.

Dass man die 2 Texturen nicht einfach bei jedem Asset mit dem gleichen Verfahren kombinieren kann und sofort ein gutes Delighting erhält, hat sich in der Praxis schnell gezeigt.

Zunächst wurde die Formel aus Min Ohs Blog angewandt:

**Original Texture / (Baked Lighting information \* 5) = Delighted Texture**

[Oh, Min 2015]

Diese bringt in vielen Fällen gute Ergebnisse, allerdings müssten häufiger auch noch einige Korrekturen vorgenommen werden.

Ein einigen Fällen funktioniert eine Kombination der beiden Texturen mit dem Overlay-Modus in Photoshop besser. Bei diesem werden Werte unter 0.5 mit dem Hintergrund multipliziert, Werte über 0.5 negativ multipliziert. Wenn nun die Textur mit der reinen Lichtinformation invertiert wird und dann in den Overlay Modus gesetzt wird, werden die Schatten aufgehellt, gleichzeitig die Highlights aber abgedunkelt. Dadurch entsteht eine natürlich wirkende Textur. Dennoch lohnt es sich danach, sowohl mit der Deckkraft der Ebene zu experimentieren als auch Anpassungen an Helligkeit und Kontrast zu machen.

Eine weitere Variante besteht darin, die Texturen (Lichtinformations-Textur vorher ebenfalls invertieren) miteinander zu multiplizieren und anschließend aufzuhellen.

Zusätzlich wurde auch versucht, die Ambient Occlusion Map (die vorher z.B. mit xNormal erstellt wurde) mit einzubeziehen. Es bietet sich an, diese an Stellen zu verwenden, an denen das Delighting mit der ersten Textur nicht ausgereicht hat.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass es schwierig ist, Texturen von unterschiedlichen Assets mit exakt den gleichen Einstellungen und Operationen zu delighten. Mit wenig Aufwand und kleineren Anpassungen lassen sich allerdings zügig gute Ergebnisse erzielen.

## 6.5 Auswertung und Vergleich

In diesem Punkt werden die Testergebnisse dargestellt und kurz miteinander verglichen. Für einige Assets wurde auch ein Relighting durchgeführt, um die Ergebnisse des Delighting unter anderen Lichtbedingungen zu untersuchen.

Die in 5.2.1 dargestellte Delighting-Methode mit einer Tonwertkorrektur und Filtern erlaubt zwar schnelle Resultate, verbessert das Baked Lighting allerdings nur leicht. Ein „richtiges“ Delighting mit Berücksichtigung der Lichtrichtung und der Geometrie des Models ist aber besser durch das Unity-Tool und die Benutzung von HDRI umsetzbar.

Die Qualität und Genauigkeit des Delighting mittels HDRI zwischen den drei Assets war unterschiedlich, was aufgrund der verschiedenen Geometrien sowie Lichtsituationen zu erwarten war.

Das Delighting des Steins war das am wenigsten anspruchsvolle der Assets. Zum einen konnte bereits beim Scan darauf geachtet werden, dass eine gleichmäßige Beleuchtung vorherrscht und damit von Anfang an wenig Lichtinformation in der Textur vorhanden war, zum anderen ist die Geometrie simpel, sodass es wenige Verdeckungen gibt, in denen es zu Abdunklungen kommen könnte. Ein Delighting mit HDRI als auch mit dem Unity-Tool haben ähnlich gute Ergebnisse gebracht. Einzig bei einer kleinen Einkerbung im Stein ist die Geometrie nicht genau genug, wodurch der Bereich nicht stark genug aufgehellte wurde (Abbildung 26). Auch die Highlights an den Kanten wurden effektiv reduziert, ohne manuell noch viele lokale Anpassungen machen zu müssen.



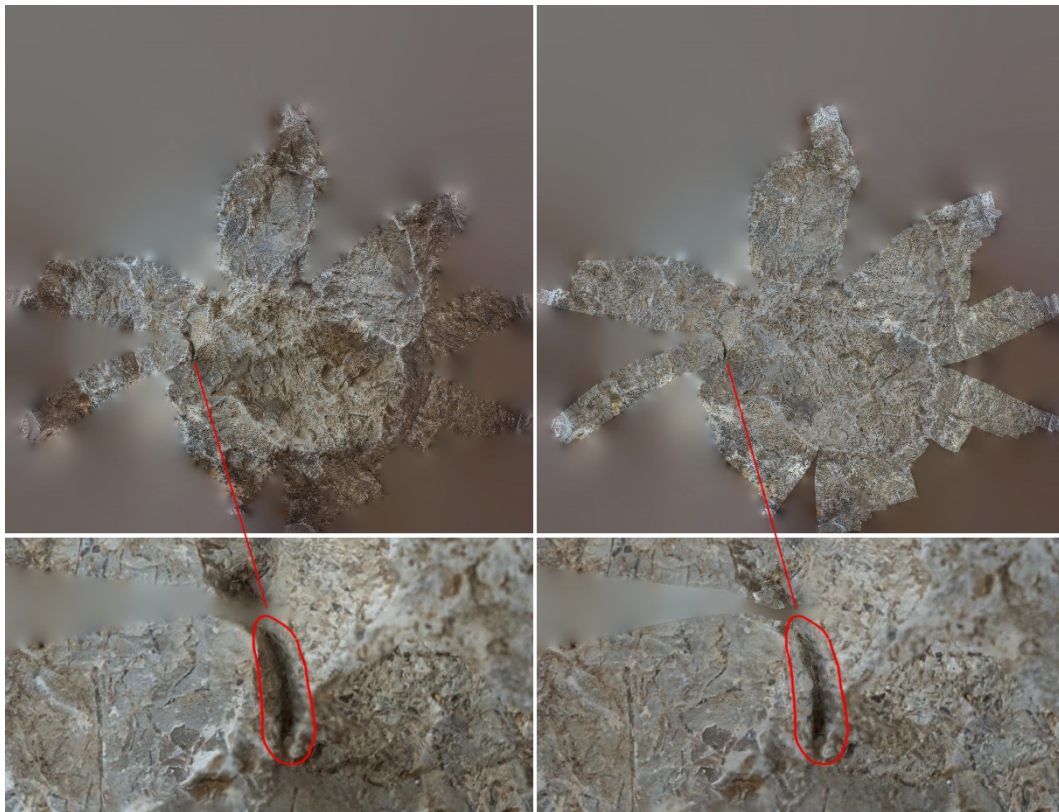


Abbildung 26: Das Delighting der Stein-Textur erbringt bis auf wenige Stellen sehr gute Ergebnisse

Etwas anspruchsvoller ist das Delighting der Skulptur. Wie auf Abbildung 8 zu sehen ist, hat diese einige verdeckte Bereiche, in die wenig Licht dringt. Zusätzlich fand der Scan unter gegebenen Bedingungen statt (bewölkter, aber einseitig etwas hellerer Himmel). Auch die unterschiedlichen Farben in der Textur stellen eine weitere Herausforderung dar.

Das Delighting hat insgesamt auch hier gut funktioniert. Die etwas einseitige Aufhellung konnte durch die HDRI Environment Map ohne weitere Probleme entfernt werden. Auffällig sind jedoch die Falten im roten Kissen der Textur. Diese sind nach dem Delighting zwar leicht aufgehellt, sind aber immer noch gut erkennbar. Das liegt vor allem an der mangelnden Genauigkeit des Scan-Meshs. Ist dieses nicht hoch genug aufgelöst, kann auch das Baked Lighting nicht exakt rekonstruiert werden. Andererseits sind die Falten so dunkel, dass die Textur an diesen Stellen bei einer entsprechend starken Aufhellung einen deutlichen Qualitätsverlust hätte.

In anderen Bereichen ohne feine Details in der Geometrie wie zum Beispiel am Kopf sind die Resultate des Delighting sehr gut.



Abbildung 27: Ausschnitte aus der Textur der Statue: links ohne Delighting, rechts mit. Größere Strukturen werden sehr gut delighted, feinere Details des realen Objekts, die im Mesh nicht mehr vorhanden sind, werden kaum bis gar nicht delighted

Das Unity-Tool zeigt im Vergleich zum Delighting mit HDRI in vielen Bereichen ähnliche Ergebnisse, jedoch müssen die verschiedenen Farben der Textur vorher einzeln maskiert werden, da es sonst zu Farbverfälschungen unter Artefakten kommt. Allerdings wirkt die Textur nicht so natürlich wie bei der der HDRI-Methode und in einigen Bereichen sind dennoch stärkere Farbverfälschungen sichtbar.

Beim dritten Asset – der Mauer unter direktem Sonnenlicht gescannt – sind die Erwartungen an ein gutes Delighting sehr gering. Es wird in der Praxis aber auch seltener vorkommen, ein derartiges Assets delighten zu müssen. Dennoch sollen die Grenzen von Delighting an diesem Model getestet werden.

Aufgrund der harten Schatten ist die exakte Ausrichtung der Environment Map zwingend erforderlich.

Die entstandene Textur mit ausschließlich Lichtinformation war in vielen Bereichen exakt genug, um damit einen Großteil der Schlagschatten als auch Highlights aus der Original-Textur zu entfernen (Abbildung 28). Problematisch erweisen sich aber viele sehr feine Strukturen auf dem Stein (Abbildung 28.2). Während diese bei diffusem Licht nicht besonders gut sichtbar sind, werden sie in der Textur durch das harte Licht deutlich hervorgehoben. Um mit der HDRI-Methode jeden einzelnen Schattenwurf der teilweise unter 1mm kleinen Erhebungen in der Textur entfernen zu können, müsste zum einen die Scan-Geometrie gut genug sein, um diese Erhebungen darstellen zu können, zum anderen müsste auch die Auflösung der Texturen so hoch sein, dass der Schattenwurf der kleinen Strukturen größer als nur 1 Pixel ist.

Ein weiteres Problem stellen die harten Übergänge von Schatten zu direkt von der Sonne beschienenen Bereichen dar. Auch wenn die Schatten korrekt aufgehellt werden, wird die aufgehellte Textur nicht die Qualität der real beleuchteten Textur erreichen. Des Weiteren kommt es an den Übergängen manchmal zu Artefakten (Abbildung 28.1).

Es lässt sich also sagen, dass Delighting mittels HDRI bei derartig ungünstigen Lichtbedingungen zwar in der Lage ist, einen Großteil der Schatten zu entfernen, die entstehende Albedotextur aufgrund oben genannter Probleme aber etwas unrealistisch wirkt und auf Detailebene noch fehlerhaft ist.

Das Unity-Tool hatte wie erwartet größere Probleme, die Schlagschatten zu entfernen. Es enthält zwar ein Feature, bei dem man Bereiche im Schlagschatten markiert, die dann ähnlich dem Content-Aware-Fill in Photoshop gefüllt werden. Bei den meisten komplexeren Geometrien wäre es aber zu zeitaufwändig, jeden einzelnen Schlagschatten zu maskieren.





Abbildung 28: Delighting der Mauer; links ohne, rechts mit Delighting. 1: Artefakte an harten Kanten zwischen Schatten und Sonne. 2: Die vielen kleinen Schattenbereiche, die durch feine Oberflächenstrukturen entstehen, werden durch eine zu grobe Scan-Geometrie nicht delighted.

Um herauszufinden, wie sich die Textur nach dem Delighting in einer anderen Szene verhält, wurde das Asset mithilfe einer anderen Environment-Map neu beleuchtet (Abbildung 29). Auf den oberen Bildern befindet sich die Vorderseite der Mauer auf der Schattenseite und wird damit nur indirekt beleuchtet. Während die Originaltextur links sehr unrealistisch wirkt und eine zweite Lichtrichtung impliziert, sieht das Asset nach dem Delighting im rechten Bild deutlich harmonischer aus, obwohl die oben genannten Probleme immer noch zu sehen sind. Einem Closeup würde das Asset wohl nicht standhalten, ab einer gewissen Entfernung ist die Textur aber durchaus brauchbar.

In der unteren Reihe auf Abbildung 29 wird die Mauer direkt von rechts beleuchtet. Auch hier stellt das Delighting im rechten Bild eine deutliche Verbesserung dar. Allerdings fallen die immer noch in der Textur enthaltenen Schatten der feinen

Oberflächenstrukturen deutlich mehr auf als bei einem Relighting mit diffusem Licht. Insgesamt fällt die zu glatte und detailarme Oberfläche negativ auf.



Abbildung 29: Relighting des Mauer-Assets unter diffusem und direktem Licht

Auch das Model der Skulptur wird in einer neuen Szene relighted (Abbildung 30). Aufgrund des Scans bei diffusem Licht integriert sich bereits die Originaltextur des Assets gut in die neue Szene. Dennoch sind bei direktem Vergleich mit der delighted Textur deutliche Verbesserungen zu sehen. Einige davon sind auf Abbildung 30 markiert. In dieser Arbeit können die Unterschiede leider nur in einem Vergleich nebeneinander dargestellt werden. Deutlicher sichtbar werden die Verbesserungen erst bei einem Wipe oder einem Übereinanderlegen der Bilder.

Einen kleinen Makel stellen die bereits erwähnten Falten im roten Kissen dar, die im Delighting nicht stark genug aufgehellt wurden.





Abbildung 30: Relighting der Skulptur mit warmer Farbtemperatur. Die Verbesserungen durch das Delighting der Textur zeigen sich besonders an den markierten Stellen. Links wurde die Textur ohne Delighting benutzt, rechts mit.

Was ist also das Ergebnis der durchgeführten Tests?

Die Ergebnisse des Delighting mittels HDRI variieren von Asset zu Asset. Bei einfachen Geometrien ist das Delighting weitgehend problemlos, mit zunehmend komplexeren Objekten stellen vor allem die daraus entstehenden dunklen Schattenbereiche eine Herausforderung dar.

Während bei sehr gleichmäßig beleuchteten Assets auch andere Methoden wie das Unity-Tool gute Ergebnisse in kürzerer Zeit erbringen, spielt die HDRI-Methode schon bei nur leicht einseitiger Beleuchtung ihre Stärken aus. Besonders positiv ist, dass die Textur auch nach dem Delighting natürlich wirkt. Das Unity-Tool dagegen hat vor allem bei unterschiedlich farbiger Textur innerhalb eines Assets manchmal Probleme bei der Farbwiedergabe.

Es sollte bereits viel Wert auf die Aufnahme und Bearbeitung der HDRI gelegt werden, da vor allem diese die Qualität des Delighting maßgeblich beeinflussen.

Die HDRI-Methode ist die einzige, mit der auch Schatten bei direktem Licht automatisch entfernt werden können, allerdings stößt die Technik hier auch bald an ihre Grenzen. Maßgeblich für diese Grenzen ist vor allem der Detailgrad des erstellten Meshes. Ist dieses zu grob, gibt es keine Möglichkeit, die vielen Schatten in feinen Strukturen zu delighten. Bei einem Mesh hingegen, das auch die kleinsten Details darstellt, ist ein gutes Delighting selbst bei direktem Licht in der Theorie möglich. Dazu ist aber sehr gute Hardware sowie ein sehr hochauflösendes Aufnahmesystem nötig.

Während bei direktem Licht jeder kleine Schatten das Ergebnis unrealistisch aussehen lassen kann, kann das Delighting bei Assets, die unter diffusem Licht aufgenommen wurden, auch etwas schwächer ausfallen und dennoch einen realistischen Bildeindruck schaffen. Insbesondere Bereiche am Asset (z.B. innenliegende Bereiche), die unter beliebigen Lichtbedingungen immer dunkler als andere erscheinen werden, können bereits mit einem leichten Delighting realistisch wirken. Mit der HDRI-Technik hat man immer Einfluss auf die Stärke des Delighting und kann es an jede Situation anpassen.

Schlussendlich richtet sich die Stärke des Delighting natürlich auch nach dem Verwendungszweck: Game-Asset oder Hero-Asset in einem Film, Closeup oder nur Hintergrund etc.

## 7. Fazit

Photogrammetrie ist aus dem Workflow vieler Studios nicht mehr wegzudenken. Die Vielfaltigkeit der in den letzten Jahren entstandenen Software sowie die kontinuierliche Leistungssteigerung von Computer-Hardware ermöglicht es aber auch einzelnen Artists, Gebrauch von dieser Technik zu machen. Durch die Verbesserungen von Kameras sowohl im Hinblick auf die Auflösung als auch auf den Dynamikumfang werden zukünftig noch genauere Scans möglich sein.

Für den Einsatz von Photogrammetrie besonders in Kombination mit Techniken wie Lichtfeld und Lasercans besteht noch einiges Potenzial. Während diese Technologien weiter erforscht werden, gibt es weitere Aufgaben bei der photogrammetrischen Asseterstellung. So ist Delighting ein wichtiger Aspekt, um das Asset in verschiedenen Situationen einsetzen zu können. Momentan ist die Auswahl an Möglichkeiten dafür aber noch begrenzt. In dieser Arbeit wurde gezeigt, welche Ergebnisse mit Delighting mittels HDRI möglich sind und diese mit anderen Techniken verglichen. So erzielt das Unity-Tool bei gleichmäßiger Beleuchtung ähnliche Ergebnisse bei geringerem Zeitaufwand. Sowohl bei farblich sehr unterschiedlichen Oberflächen als auch bei einseitigem und direktem Licht lohnt sich allerdings der Mehraufwand der HDRI-Methode. Bei dieser besteht die Möglichkeit, Schlagschatten bis zu einem gewissen Grad zu entfernen, die Textur wirkt farblich natürlicher und zudem lässt sich beim Delighting mehr Einfluss auf das Ergebnis nehmen.

Zukünftig könnte eine Kombination aus der exakten Beleuchtungsinformation in Form von HDRI Environment Maps und Tools eine schnellere und genauere Delighting-Technik darstellen. Statt die Environment-Map zu berechnen, wie es das Unity-Tool im Moment macht, könnte ein weiterer Input für ein HDRI hinzugefügt und das Tool daran angepasst werden.

Wie in vielen anderen Bereichen wird auch beim Delighting daran gearbeitet, künstliche Intelligenz einzusetzen. So wurde beim Substance Day in London im Juni 2018 ein AI-gesteuerter Delighter innerhalb des Alchemist Projects vorgestellt, dessen Resultate außerordentlich gut erscheinen. Laut Sébastien Deguy, Gründer und CEO von Allegorithmic, sei dies der beste Delighter auf dem Markt. Allerdings ist das Tool noch



nicht veröffentlicht worden. Sollte sich dieses in der Praxis als so überragend wie in der Präsentation erweisen, könnten die anderen Methoden für Delighting hinfällig werden.

## Literaturverzeichnis

Adam Technology (2017): **Laser Scanning vs Digital Photogrammetry**

online verfügbar: (letzter Zugriff: 05.04.2019)

[https://sme17.mapyourshow.com/7\\_0/collateral\\_redirect.cfm?CollateralID=15](https://sme17.mapyourshow.com/7_0/collateral_redirect.cfm?CollateralID=15)

Agisoft LLC (2018): **Agisoft PhotoScan User Manual: Standard Edition, Version 1.4**

online verfügbar: (letzter Zugriff: 05.04.2019)

[https://www.agisoft.com/pdf/photoscan\\_1\\_4\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/photoscan_1_4_en.pdf)

Albertz, Jörg: **Albrecht Meydenbauer – Pioneer of Photogrammetric Documentation of the Cultural Heritage**. *Proceedings 18th International Symposium CIPA 2001 Potsdam*

Blizard, Brandon (2014): **The Art of Photogrammetry: How To Take Your Photos**

online verfügbar: (letzter Zugriff: 05.04.2019)

<https://www.tested.com/art/makers/460142-art-photogrammetry-how-take-your-photos/>

Busby, James (2016): **3D Scanning Reflective Objects With Photogrammetry**

online verfügbar: (letzter Zugriff: 05.04.2019)

<https://www.3dscanstore.com/blog/3D%20Scanning%20Reflective%20Objects>

Computer Graphics World (2017): **VFX Fit for a Queen**

online verfügbar: (letzter Zugriff: 05.04.2019)

<http://www.cgw.com/Press-Center/In-Focus/2017/VFX-Fit-for-a-Queen.aspx>

The Center for Photogrammetric Training (2008): **History of Photogrammetry**

online verfügbar: (letzter Zugriff: 05.04.2019)

[http://ibis.geog.ubc.ca/courses/geob373/lectures/Handouts/History\\_of\\_Photogrammetry.pdf](http://ibis.geog.ubc.ca/courses/geob373/lectures/Handouts/History_of_Photogrammetry.pdf)

Failes, Ian (2015): **Surviving San Andreas**  
online verfügbar: (letzter Zugriff: 05.04.2019)  
<https://www.fxguide.com/featured/surviving-san-andreas/>

Fuchs, Jochen (2018): **3D-Scan Methoden im Überblick**  
online verfügbar: (letzter Zugriff: 05.04.2019)  
<https://realscan.zeiss.com/blog/3d-scan-methoden-im-%C3%BCberblick>

Georgopoulos, Andreas; Ntragka, Antigoni; Quintero, Mario Santana (2013): **Photogrammetric exploitation of HDR images for cultural heritage documentation**.  
*Conference: XXIV International CIPA Symposium*

Jover, Cyril im Unityforum (2018): **De-Lighting Tool**  
online verfügbar: (letzter Zugriff: 05.04.2019)  
<https://forum.unity.com/threads/de-lighting-tool.482133/page-4>

Jover, Cyril @ Siggraph (2017): **Photogrammetry workflow and the tech behind the de-lighting tool**  
online verfügbar: (letzter Zugriff: 05.04.2019)  
[https://www.youtube.com/watch?v=Ny9ZXt\\_2v2Y](https://www.youtube.com/watch?v=Ny9ZXt_2v2Y)

Kleinkemper, Larry (2014): **The Basics of 3D Laser Scanning**  
online verfügbar: (letzter Zugriff: 05.04.2019)  
<http://lanmarservices.com/2014/04/02/the-basics-of-3d-laser-scanning>

Lachambre, Sébastien; Lagarde, Sébastien; Jover, Cyril (2017): **Photogrammetry Workflow**  
online verfügbar: (letzter Zugriff: 05.04.2019)  
[https://unity3d.com/files/solutions/photogrammetry/Unity-Photogrammetry-Workflow\\_2017-07\\_v2.pdf](https://unity3d.com/files/solutions/photogrammetry/Unity-Photogrammetry-Workflow_2017-07_v2.pdf)

Li, Zhilin; Yuan, Xiuxiao; Lam, Kent W K (2002): **Effects of JPEG Compression on the Accuracy of Photogrammetric Point Determination**. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68(8)

Lindner, Wilfried (2016): **Digital Photogrammetry, A Practical Course.** *Springer 2016, Fourth Edition*

Luhmann, Thomas (2003): **Nahbereichsphotogrammetrie, Grundlagen, Methoden und Anwendungen.** *Herbert Wichmann Verlag 2003, 2. Auflage*

Nat and Friends (2017): **Google Earth's Incredible 3D Imagery**  
online verfügbar: (letzter Zugriff: 05.04.2019)  
[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=154&v=suo\\_aUTUpps](https://www.youtube.com/watch?time_continue=154&v=suo_aUTUpps)

Oh, Min (2015): **Imperfection for Perfection Part 2: Photo Reconstruction/De-lighting**  
online verfügbar: (letzter Zugriff: 05.04.2019)  
<https://www.unrealengine.com/en-US/blog/imperfection-for-perfection-part-2>

P.G. McCurdy; L.A. Woodward; J.I. Davidson; R.M. Wilson; R.E. Ask (1944): **Manual of Photogrammetry.** *New York ; Chicago : Pitman Publishing Corporation. 1944*

Pomaska, Günter (2017): **Bildbasierte 3D-Modellierung – Vom digitalen Bild bis zum 3D-Druck.** *Wichmann Verlag 2016*

Reinhard, Erik; Ward, Greg; Pattanaik, Sumanta; Debevec, Paul; Heidrich, Wolfgang; Myszkowski, Karol (2010): **High Dynamik Range Imaging – Acquisition, Display and Image-Based Lighting.** *Morgan Kaufmann Publishers 2010, 2. Auflage*

Santella, Michael; Milner, Andrew R. C. (2017): **Coupling Focus Stacking with Photogrammetry to illustrate small fossil teeth.** *Journal of Paleontological Techniques*  
online verfügbar: (letzter Zugriff: 05.04.2019)  
[https://www.jpaleontologicaltechniques.org/pasta3/JPT%20N18/Pdf/JPT\\_n018\\_May.pdf](https://www.jpaleontologicaltechniques.org/pasta3/JPT%20N18/Pdf/JPT_n018_May.pdf)

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: *Potenzielle Zeitersparnisse beim Einsatz von Photogrammetrie gegenüber dem konventionellen Workflow*

Lachambre, Sébastien; Lagarde, Sébastien; Jover, Cyril (2017): **Photogrammetry Workflow**

[https://unity3d.com/files/solutions/photogrammetry/Unity-Photogrammetry-Workflow\\_2017-07\\_v2.pdf](https://unity3d.com/files/solutions/photogrammetry/Unity-Photogrammetry-Workflow_2017-07_v2.pdf)

Abbildung 2: *Details und Unregelmäßigkeiten wie vom Regen hochgespritzter Dreck, Verfärbungen durch UV Licht, beliebige Gegenstände auf dem Boden usw. geben dem Mesh bzw. der Textur den nötigen Realismus*

Eigenes Bild

Abbildung 3: *Mehrbildtriangulation*

Luhmann, Thomas (2003): **Nahbereichsphotogrammetrie, Grundlagen, Methoden und Anwendungen.**

Abbildung 4: *Albrecht Dürer: „Der Zeichner der Laute“ (1525), Holzschnitt einer Konstruktionsanordnung zum Zeichnen von Perspektive*

Abbildung 5: *Stereoskop wie es in den 1940er Jahren im Militär genutzt wurde*

P.G. McCurdy; L.A. Woodward; J.I. Davidson; R.M. Wilson; R.E. Ask (1944): **Manual of Photogrammetry**

Abbildung 6: *Reflektive und transparente Oberflächen wie dieses Glas lassen sich nur scannen, indem man sie vorher entsprechend präpariert*

Busby, James (2016): **3D Scanning Reflective Objects With Photogrammetry**

<https://www.3dscanstore.com/blog/3D%20Scanning%20Reflective%20Objects>

Abbildung 7: *Bereiche wie diese sehen sich so ähnlich, dass die Software die Features teilweise nicht richtig zuordnen kann*

Blizard, Brandon (2014):

**The Art of Photogrammetry: How To Take Your Photos**

<https://www.tested.com/art/makers/460142-art-photogrammetry-how-take-your-photos/>

Abbildung 8: *Innenliegende oder verdeckte Bereiche können zu Problemen bei der Mesherstellung führen und sollten besondere Aufmerksamkeit bei der Aufnahme der Bilder bekommen*

Eigenes Bild

Abbildung 9: *In dunklen Bildbereichen sind ohne den Einsatz von HDR kaum noch Details vorhanden, die Software hat Schwierigkeiten, Features zu finden (Links HDR, rechts Einzelbelichtung)*

Archaeology and Heritage Digital Recording: **High Dynamic Range Photography/Photogrammetry – Part 1**

<https://digitalheritagerecording.wordpress.com/2015/11/12/high-dynamic-range-photographyphotogrammetry-part-1/>

Abbildung 10: *Die Textur wird an Teilen des Objekts, die auf keinem der aufgenommenen Bilder auf der Fokusebene liegen, unscharf und es ergeben sich sichtbare Nähte zwischen zwei auf das Mesh projizierten Bildern*

Eigenes Bild

Abbildung 11: *Mit einem älteren iPhone gescannte Felsen in Robert Bergs „Scandinavian Forest Project“*

*Berg, Robert (2017): **Beyond scanning: Recreating a Scandinavian forest with photogrammetry and substance***

Abbildung 12: *Automatisiertes System mit gekoppeltem Slider und Drehteller*

Black Forest Motion: **3D-Photogrammetry Scanning**

<https://blackforestmotion.com/home/applications/3d-photogrammetry-scanning/>

Abbildung 13: *Agisoft Photoscan: Benötigter Arbeitsspeicher für die Mesh-Berechnung im Arbitrary Mode. Die Bilderanzahl bezieht sich auf eine Auflösung von 12 MP. Die Berechnungsdauer nimmt etwa linear mit der Sensorauflösung zu*

Agisoft PhotoScan: **PhotoScan Memory Requirements**

[https://www.agisoft.com/pdf/tips\\_and\\_tricks/PhotoScan\\_Memory\\_Requirements.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/tips_and_tricks/PhotoScan_Memory_Requirements.pdf)

Abbildung 14: *Je nach Scanobjekt muss die Anordnung der Aufnahmepositionen angepasst werden, damit es nicht zu Verdeckungen kommt*

*Pomaska, Günter (2017): **Bildbasierte 3D-Modellierung – Vom digitalen Bild bis zum 3D-Druck**. Wichmann Verlag 2016*

Abbildung 15: *Sparse Point Cloud*

*Eigenes Bild*

Abbildung 16: *Dense Point Cloud*

*Eigenes Bild*

Abbildung 17: *Häufiger Fehler im unbearbeiteten Asset: schwebende Faces*

*Eigenes Bild*

Abbildung 18: *In Instant Meshes lässt sich das Orientation Field des retopologisierten Meshes einstellen (farbige Linien)*

*Eigenes Bild*

Abbildung 19: *Einige Utility-Maps zum Erhalt von Details: Displacement Map (o.l.) Ambient Occlusion Map (o.r.) und Normal Map (unten). (Alle Bilder sind Ausschnitte einer größeren Textur)*

*Eigenes Bild*

Abbildung 20: *Relighting eines Assets mit Textur ohne Delighting. Das Licht beim Scannen kommt von Links oben, das Licht in der 3D-Szene von rechts oben. Der integrierte harte Schatten in der Textur lässt das Ergebnis unrealistisch aussehen*

*Eigenes Bild*

Abbildung 21: *Mit in 5.2.1 beschriebener Technik sind Schattierungen zwar schwieriger zu erkennen. Da die Geometrie aber nicht berücksichtigt wird, können Schatten nicht komplett eliminiert werden.*

Eigenes Bild

Abbildung 22: *IBL mit einem JPEG Format (links) und einem HDR Format (rechts). Die 256 Helligkeitsstufen des JPEGs sind nicht in der Lage, die Beleuchtung realistisch darzustellen.*

Greg Zaal (2016): **How to Create Your Own HDR Environment Maps**

<http://blog.gregzaal.com/2016/03/16/make-your-own-hdri/>

Abbildung 23: *Zwei der Testobjekte*

Eigenes Bild

Abbildung 24: *Environment Map, die zum Delighting der Statue benutzt wurde*

Eigenes Bild

Abbildung 25: *UV-Map der Statue mit ausschließlich Lichtinformation*

Eigenes Bild

Abbildung 26: *Das Delighting der Stein-Textur erbringt bis auf wenige Stellen sehr gute Ergebnisse*

Eigenes Bild

Abbildung 27: *Ausschnitte aus der Textur der Statue: links ohne Delighting, rechts mit. Größere Strukturen werden sehr gut delighted, feinere Details des realen Objekts, die im Mesh nicht mehr vorhanden sind, werden kaum bis gar nicht delighted*

Eigenes Bild

Abbildung 28: *Delighting der Mauer; links ohne, rechts mit Delighting. 1: Artefakte an harten Kanten zwischen Schatten und Sonne. 2: Die vielen kleinen Schattenbereiche, die durch feine Oberflächenstrukturen entstehen, werden durch eine zu grobe Scan-Geometrie nicht delighted*

Eigenes Bild



Abbildung 29: *Relighting des Mauer-Assets unter diffusem und direktem Licht*

Eigenes Bild

Abbildung 30: *Relighting der Skulptur mit warmer Farbtemperatur. Die Verbesserungen durch das Delighting der Textur zeigen sich besonders an den markierten Stellen. Links wurde die Textur ohne Delighting benutzt, rechts mit.*

Eigenes Bild