

Untersuchung von Verfahren zur 3D-Reproduktion von Makrostrukturen

Studiengang Medieninformatik

Bachelorarbeit

vorgelegt von

Tim Zimmermann

geb. in Bad Homburg v.d.H

durchgeführt bei
miB Consult, Consulting Agentur für Onlineshops

Referent der Arbeit:	Prof. Dr. Cornelius Malerczyk
Korreferent der Arbeit:	Hans Christian Arlt, M.Sc.
Betreuer bei miB Consult:	Michael Bröske

Friedberg, 2022

Danksagung

Ich möchte mich bei allen Menschen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Zuerst gilt mein besonderer Dank Prof. Dr. Cornelius Malerczyk, der sich für die Betreuung dieser Arbeit bereit erklärt und diese stets durch konstruktive Kritik gefördert hat. Er und Hans Christian Arlt haben sich die Zeit genommen, mir bei der Themensuche zu helfen und diese zu verwirklichen. Schließlich trugen sie in den vergangenen Jahren meines Studiums durch verschiedene Module dazu bei, mein großes Interesse an der 3D-Computergrafik zu wecken.

Außerdem danke ich meiner Freundin, Antje Heymann, und meiner Schwester, Jenny Zimmermann, sehr dafür, dass sie immer ein offenes Ohr hatten und mich bei der Erstellung dieser Arbeit stets unterstützt haben. Auch für die investierte Zeit in die Korrektur bin ich ihnen sehr verbunden.

Sophia Friedrich, Rebecca Matz, Sandra Trautmann und Paul Wolf möchte ich danken, dass sie mich während des Studiums immer unterstützt haben.

Ein Dank geht auch an meine Kollegen von miB Consult, die ein stetiges Verständnis für mich und meine Arbeit hatten.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, dass sie mich zu jederzeit unterstützt haben und für mich da waren.

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die eingereichte Bachelorarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Friedberg, Februar 2022

Tim Zimmermann

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Selbstständigkeitserklärung	iii
Inhaltsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	x
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Zielsetzung	4
1.4 Organisation der Arbeit	5
1.5 Zusammenfassung der Arbeit	6
2 Grundlagen	7
2.1 3D-Scan	7
2.1.1 Kontaktbasierte Verfahren	9
Koordinatenmessgeräte	9
2.1.2 Aktive nichtkontaktbasierte Verfahren	10
Triangulation	11
Laufzeitmessung	12
Phasenverschiebung	15
Strukturierte Lichtsysteme	16
2.1.3 Passive nichtkontaktbasierte Verfahren	18
Fotogrammetrie	18
2.1.4 Rekonstruktionen aus einer Punktwolke	19
3 Stand der Technik	21
3.1 Einleitung	21
3.2 Erfassung von Objekten	21
3.2.1 Transparente Oberflächen	22

3.2.2	Deep Learning	23
	Rekonstruktionen aus Punktwolken	24
	Rekonstruktionen aus einem Bild	25
3.2.3	Mikroskopische Oberflächen erfassen	25
3.3	Extraktion von Strukturen	27
3.3.1	Erzeugung einer Höhenkarte anhand eines 3D-Scans und eines Kontrollmodells	27
3.3.2	Strukturen anhand von Schatten erfassen	29
3.4	Scans aufbereiten	30
3.4.1	Verwendung von Deep Learning zur Retopologie	30
3.4.2	Quad-Mesh aus Punktwolke generieren	31
4	Analyse der 3D-Scan-Verfahren	35
4.1	Einleitung	35
4.2	Analyse	35
4.2.1	Verfahren	36
4.2.2	Kriterien	36
4.2.3	Analyse der Verfahren	37
4.3	Fazit	39
5	Konzept	41
5.1	Einleitung	41
5.2	Konzept und Idee	41
5.3	Testobjekt	42
5.4	Ablauf der Umsetzung	44
5.5	Auswahl der Scan-Methoden	44
5.5.1	3D-Scan Methoden	44
5.5.2	Scanner mit strukturiertem Licht	44
5.5.3	Fotogrammetrie	45
5.6	Verwendete Hardware	46
5.7	Kreide- und Scanspray	46
6	Prototypen	49
6.1	Einleitung	49
6.2	Erfassung des Testobjektes mit einem strukturiertem Scanner	49
6.2.1	Konfiguration des Scanners	49
6.2.2	Erfassung des Testobjektes	50
Testaufnahmen	50	
Testaufnahmen mit Kreide- und Scanspray	51	
Finale Aufnahmen und Erzeugung des Meshes	52	
6.3	Erfassung des Testobjektes mit Fotogrammetrie	53
6.3.1	Vorbereitungen	53
6.3.2	Testaufnahmen	54
6.3.3	Verarbeitung mit Meshroom	55

Einstellungen	55
Ergebnisse in Meshroom	55
Rekonstruierung des Mesh mit Meshlab	56
6.3.4 Verarbeitung mit RealityCapture	57
Ablauf	57
Ergebnisse	59
6.3.5 Vergleich der Software	59
6.3.6 Finale Aufnahmen und Erzeugung des Meshes	59
6.4 Erstellung der Displacement Map	60
6.4.1 Verwendete Software	60
6.4.2 Ausrichtung	61
6.4.3 Generieren der Displacement Map mit xNormal	62
6.4.4 Displacement Map anwenden	64
7 Ergebnisse	67
7.1 Einleitung	67
7.2 Vergleich der 3D-Scan-Verfahren	67
7.2.1 Qualität	67
3D-Scanner	67
Fotogrammetrie-Verfahren	67
Fazit	68
7.2.2 Arbeitsaufwand	68
3D-Scanner	68
Fotogrammetrie-Verfahren	68
Manuelle Erstellung der Makrostrukturen	69
Fazit	69
7.2.3 Komplexität	70
3D-Scanner	70
Fotogrammetrie-Verfahren	70
Manuelle Erstellung der Makrostrukturen	71
Fazit	71
7.2.4 Kosten	71
3D-Scanner	71
Fotogrammetrie-Verfahren	71
Manuelle Erstellung der Makrostrukturen	72
Fazit	72
7.3 Evaluation	72
7.3.1 Auswertung der Umfrage	73
7.4 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse	73
8 Zusammenfassung und Ausblick	75
8.1 Zusammenfassung	75
8.2 Ausblick	76

Abkürzungen	79
Literaturverzeichnis	81

Abbildungsverzeichnis

1.1	Umsatz durch E-Commerce in Deutschland	2
1.2	komplexe Makrostrukturen	4
1.3	Grobstrukturen - Makrostrukturen - Mikrostrukturen	4
2.1	Punktdarstellung des Stanford-Hasenmodells	8
2.2	Aufbau eines Koordinatenmessgerätes	10
2.3	Grundlagen der Triangulation	11
2.4	Aufbau 3D-Scanner mit Triangulation	12
2.5	Messung der Entfernung durch Verwendung der Laufzeitmessung	13
2.6	Tiefenkarte	14
2.7	Distanz durch Phasenverschiebung ermitteln	15
2.8	Funktionsweise Streifenprojektion	16
2.9	binäre und N-ary Kodierung	17
2.10	Dreieck- und Trapez-Kodierung	17
2.11	kontinuierliche sinusförmige Phasenkodierungen	18
2.12	Anwendung Fotogrammetrie	19
3.1	Verwendung von Scanspray	23
3.2	Herausforderung - Deep Learning und Punktwolke	24
3.3	Ergebnis der 3D-Rekonstruktion aus einem einzelnen Bild	26
3.4	Workflow 3D-Scan zu strukturierem Modell	28
3.5	Workflow hochauflösendes Modell zu niedrig auflösenden Modell	29
3.6	Ergebnisse der Methode von Pan et al	31
3.7	farbkodiertes Beispiel für strukturierte Rekonstruktion	32
3.8	schematischer Ablauf der Lückenfüllung	32
4.1	Auflösung und Genauigkeit der 3D-Scanner	37
5.1	Rasierer R89 ROSEGOLD der Firma Hans-Jürgen Müller GmbH & Co. KG	43
5.2	Rasiergriff R-89 nachmodelliert	43
5.3	Aufbau von EinScan-SE von der Firma Shining 3D	45
5.4	Aufbau des Setups für die Aufnahmen des Rasierers	46
5.5	Mattierung des Griffes mit Kreide- und Scanspray	47
6.1	Kalibrierung-Scheibe des Scanners EinScan-SE	49

6.2	Erfassung des Griffes ohne Anpassungen mit 3D-Scanner EinScan-SE	50
6.3	Artefakte bei der Erfassung mit Hochkontrastbild	51
6.4	fehlerhafte Aufnahme durch falsche Ausrichtung	52
6.5	Ergebnisse des 3D-Scanners mit strukturiertem Licht	53
6.6	Aufnahme mit der Spiegelreflexkamera	55
6.7	Aufbau Meshroom	56
6.8	Ergebnisse in Meshroom	56
6.9	fehlerhafte Rekonstruktion durch Meshroom	57
6.10	Aufbau RealityCaputre	58
6.11	Ergebnis in RealityCapture mit einem hohen Detailgrad	58
6.12	Ergebnisse in RealityCapture	59
6.13	finale Ergebnisse in Meshroom	60
6.14	finale Ergebnisse in RealityCapture	60
6.15	Bearbeitungsschritte in Blender	61
6.16	Aufbau von xNormal	62
6.17	Anpassung der Helligkeit der erstellen Displacement Map	63
6.18	Nachbearbeitung der Displacement Map	64
6.19	Materialeinstellungen in Blender	65
6.20	Ergebnisse des 3D-Scanners	65
6.21	Ergebnisse mit Fotogrammetrie und Meshroom	66
6.22	Ergebnisse mit Fotogrammetrie und RealityCapture	66
7.1	Rasiergriff mit manueller erstellter Makrostruktur als Referenzobjekt	73

Tabellenverzeichnis

4.1	Auswertung der Verfahren anhand der festgelegten Kriterien	39
4.2	Preisbereich für Geräte der einzelnen Verfahren	40
6.1	Durchschnittlich erfasste Punkte	52
7.1	Anzahl erfasster Punkte des Griffes	68
7.2	ungefährer Zeitaufwand der Rekonstruktion von Makrostrukturen	70
7.3	Kosten für das Equipment und Personal	72
7.4	Qualität der Strukturen des Verfahrens	73
7.5	Tauglichkeit für Werbung oder Produktbeschreibung	74

Kapitel 1

Einleitung

Die vorliegende Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Analyse verschiedener Verfahren, mit deren Hilfe es möglich ist, reale 3D-Makrostrukturen auf einem 3D-Modell zu reproduzieren. Es wird untersucht, welche Vor- und Nachteile die verwendeten Verfahren aufweisen und welche am besten für die Reproduktion geeignet sind.

1.1 Motivation

Die Verwendung von 3D-Scan-Verfahren findet heutzutage in vielen industriellen Bereichen Anwendung. Laut Javaid et al. (2021) werden 3D-Scans beispielsweise in der Medizin genutzt, um hochwertige und passgenaue Implantate und andere Apparaturen für Patienten zu erstellen. Als weitere Anwendungsbereiche geben sie unter anderem die Entwicklung von industriellen Werkzeugen und Prototypen an. Zusätzlich zu den genannten Themengebieten ist auch die Digitalisierung von physikalischen Objekten zu nennen, die mit dessen Hilfe wirklichkeitsgetreue 3D-Modelle von realen Objekten erstellen kann. Laut Javaid et al. (2021) sei es wesentlich einfacher ein Objekt zu scannen, als es in einer 3D-Software zu modellieren [JHPS21]. Durch die Vielzahl der Anwendungsbereiche und den technischen Fortschritt wird 3D-Modellierung immer häufiger genutzt.

Der Verkauf von Produkten über das Internet steigt immer weiter an. Wie in Abbildung 1.1 zu sehen ist, ist der Umsatz, der über Onlinehandel generiert wurde, in den letzten 20 Jahren um 83,4 Milliarden Euro gestiegen. (erhoben von HDE; IfH Köln, Mai 2021) Um sich die Kosten für lokale Geschäfte zu sparen, setzen einige Einzelhändler ausschließlich auf den Verkauf über das Internet. Dadurch haben potenzielle Kunden allerdings nicht die Möglichkeit die Produkte real zu begutachten. Damit der Kunde einen möglichst genauen Eindruck von einem Produkt erhalten kann, kann der Einzelhändler Produktinformationen über Werbung, Text, Bilder und Videos zur Verfügung stellen. Zu der bestehenden Verwendung von Foto- und Videomaterial als Informationsmedium werden seit einigen Jahren immer öfter auch 3D-Modelle und -Animationen verwendet. Laut Enthed (2013) seien bereits 75 % der Produktbilder und 20 % der im IKEA-Katalog dargestellten Raumsets ausschließlich computergenerierte Bilder. [Ent13]

herkömmlichen Methode, die manuelle Erstellung der Modelle in einer 3D-Software, entsteht je nach Größe, Komplexität des Objektes oder der Oberflächenstrukturen ein großer Zeitaufwand [HSC02]. Dieser Aufwand wird auch durch Verwendung von aktueller Hard- oder Software lediglich minimal verringert. Zwar kann damit die Berechnungszeit verkürzt werden, trotzdem muss der Ersteller den Aufbau oder die Struktur aufwendig händisch nachmodellieren.

Einer der Hauptanwendungszwecke von 3D-Scan-Verfahren ist die komplette Rekonstruktion von Objekten mit Struktur und Feinheiten [JHPS21]. Die erzeugten Resultate müssen in der Regel nachträglich korrigiert und bearbeitet werden. Durch ungünstige Voraussetzungen, wie beispielsweise schlechte Lichtverhältnisse, spiegelnde oder transparente Oberflächen, kann es zu ungenauen Berechnungen kommen. Diese führen zur Entstehung von Löchern oder Unebenheiten, die nachträglich korrigiert werden müssen.

Eine mögliche Vorgehensweise zur Erzeugung eines realistischen, aber trotzdem strukturierteren Modells ist die Verwendung von Displacement Maps. Das Objekt wird ohne Strukturen per Hand modelliert und die abgetasteten Strukturen werden nachträglich per Displacement Map auf das Objekt gelegt. Dies hat den Vorteil, dass das Objekt sowohl originalgetreu aussieht, als auch eine saubere Struktur hat und zusätzlich weniger Speicherplatz und Vertices benötigt als ein 3D-Scan [HSC02]. Da das Objekt manuell erstellt wurde, ist sichergestellt, dass alle Maße und Flächen korrekt sind. Außerdem ist es so möglich Werbungen für Produkte zu erstellen, die noch nicht existieren, aber für die bereits eine Struktur vorhanden ist. Allerdings wurde diese Vorgehensweise in Bezug auf die Rekonstruktion von Strukturen für die Darstellung von Online-Produkten bisher noch nicht ausreichend untersucht und verglichen.

Ein großes Problem bei der Erstellung von 3D-Modellen ist der hohe Zeitaufwand bei komplexen Strukturen. Die Strukturen müssen händisch erstellt und so angepasst werden, dass sie nahtlos auf dem Modell liegen. [HSC02] In Abbildung 1.2 sind zwei Beispiele von realen Strukturen zu sehen, die aufgrund ihrer Komplexität durch Einscannen einfacher zu reproduzieren wären, als per Hand modelliert zu werden. Einerseits handelt es sich um die feinen Strukturen der menschlichen Haut (Abbildung 1.2a), andererseits um die Schale einer Orange (Abbildung 1.2b).

Das Resultat eines 3D-Scans ist eine unstrukturierte, dreidimensionale Repräsentation eines realen Objektes. Zur Erzeugung von 3D-Drucke oder zur Verwendung als starres Objekt in einer 3D-Szene sind unstrukturierte Meshes nutzbar. Sobald das Mesh oder die dazugehörige Textur angepasst oder das Objekt animiert werden soll, müssen die Meshes aufwendig aufbereitet und in ein strukturiertes Mesh umgewandelt werden [HSC02]. Es ist sehr schwierig bei der Rekonstruktion alle Makrostrukturen zu berücksichtigen, was dazu führt, dass sie teilweise verloren gehen. Dadurch wird der Detailgrad des Objektes verringert, was dazu führen kann, dass Kunden einen falschen Eindruck vom Produkt erhalten.

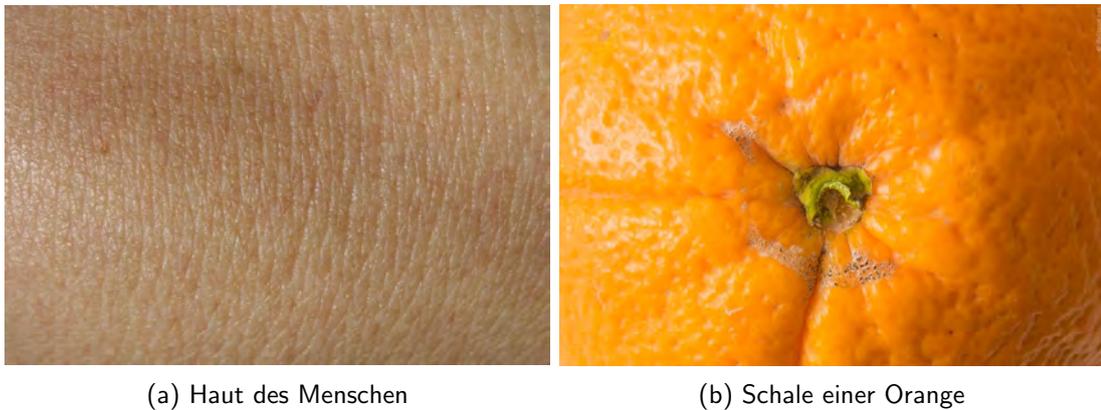


Abbildung 1.2: Komplexe Makrostrukturen (1.2a Quelle: (Quelle: <https://pixnio.com/de/texturen/menschliche-haut>; zuletzt angesehen am: 10.02.2022), (1.2b(Quelle: <https://www.delispot.net/orangen/>; zuletzt angesehen am: 10.02.2022

1.3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es geeignete 3D-Scan-Verfahren zu ermitteln, mit deren Hilfe es möglich ist, die Makrostrukturen eines realen Produktes qualitativ hochwertig in einer 3D-Software zu reproduzieren.

Bei Makrostrukturen handelt es sich um grobe Strukturen eines Materials oder Gewebes, die mit bloßem Auge oder bei sehr geringer Vergrößerung sichtbar sind. In der Werkstoffkunde befinden sich Makrostrukturen im Millimeterbereich [Arn]. Dagegen wird eine Makrostruktur in der Biowissenschaft als Struktur mit einer Größe von mehreren Millimetern bis ganz wenigen Zentimeter definiert [GG]. In Abbildung 1.3 sind die verschiedenen Dimensionen zu sehen.

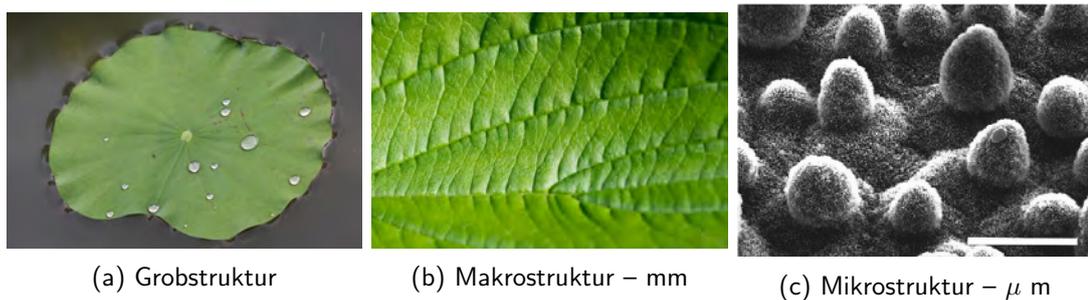


Abbildung 1.3: 1.3a Quelle: ([https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Lotus_Leaf_\(5780807820\).jpg](https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Lotus_Leaf_(5780807820).jpg); Stand 05.02.2022); 1.3b Quelle: (<https://pixabay.com/de/photos/blatt-gr%C3%BCn-makro-struktur-textur-1992/>; Stand 05.02.2022) 1.3c Quelle: (https://www.researchgate.net/figure/The-surface-microstructure-of-the-Lotus-leaf-Nelumbo-Nucifera-Water-repellency-is_fig1_8044676; Stand 05.02.2022)

Um dieses Ziel zu erreichen, werden die gängigsten 3D-Scan-Verfahren analysiert und in Bezug auf die Übertragung von Makrostrukturen auf Tauglichkeit, Dauer und Komplexität verglichen.

Zum Testen der Verfahren wird ein realer Rasierer verwendet, für den bereits ein 3D-Modell existiert. Mithilfe dieses Testobjektes soll ein Leitfaden für die generelle Verwendung von Verfahren zur Rekonstruktion von Makrostrukturen mithilfe von Scan-Verfahren erstellt werden.

Bei Durchführung der Scans wird untersucht, welche Probleme bei den jeweiligen Verfahren auftauchen können. Zusätzlich zu den Vor- und Nachteilen wird eine Übersicht der auftretenden Schwierigkeiten und Probleme bei Verwendung der Technologien, bezogen auf Makrostrukturen, erstellt und Wege aufgezeigt, wie diese gelöst werden können.

Die Ergebnisse werden anhand passender Kenngrößen wie Qualität, Arbeitsaufwand, benötigtes Equipment und Kosten bewertet und miteinander verglichen. Auf dieser Basis sollen geeignete Verfahren ermittelt werden. Abschließend wird das Endresultat mit einem komplett mit Scan-Verfahren erstellten 3D-Modell mit Makrostrukturen und Feinheiten verglichen. Durch diesen Vergleich soll überprüft werden, ob die Verfahren zur Rekonstruktion von Makrostrukturen geeignet sind.

1.4 Organisation der Arbeit

Die Arbeit ist in acht Kapitel unterteilt. Im Kapitel *Einleitung* wird ein Überblick über das Thema der Arbeit gegeben. Es wird auf die Hintergründe zur Wahl des Themas und die zu lösenden Probleme eingegangen. Weiterhin wird ein Überblick auf die Ziele der Arbeit gegeben. Abschließend gibt es eine Zusammenfassung der Arbeit.

Im *Grundlagen*-Kapitel werden dem Leser die nötigen Grundlagen zu dieser Arbeit vermittelt. Der Hauptfokus liegt dabei auf den Funktionsweisen der verschiedenen Scan-Verfahren. Das Kapitel *Stand der Technik* beschäftigt sich mit verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten zu den Themen Erfassung von Objekten, Makrostrukturen und Retopologie von Meshes.

Im Kapitel Analyse der 3D-Scan-Verfahren werden die verschiedenen Scan-Verfahren auf Tauglichkeit für die Erfassung und Rekonstruktion von Makrostrukturen überprüft.

Im Kapitel Konzept wird das Konzept der Arbeit vorgestellt, sowie die ausgewählten Verfahren. Die für die Verfahren verwendete Hardware und Hilfsmittel werden beschrieben.

Die praktische Rekonstruktion von Makrostrukturen wird in Kapitel *Prototypen* erläutert. Zunächst wird die verwendete Konfiguration erklärt. Es werden verschiedene Test mit den Scan-Verfahren durchgeführt, um ein gutes Ergebnis zu erzielen. Abschließend werden von den erfassten 3D-Modellen Displacement Maps erstellt und auf modellierte Modelle gelegt.

Die Ergebnisse der Arbeit werden im Kapitel *Ergebnisse* verglichen, es werden Herausforderungen aufgezeigt und bewertet, ob das Ziel der Arbeit erreicht wurde.

Abschließend wird die Arbeit im Kapitel *Zusammenfassung und Ausblick* zusammengefasst und einen Ausblick über zukünftige Forschungsthemen aufgezeigt.

1.5 Zusammenfassung der Arbeit

In der Arbeit wurde die gängigen 3D-Scan-Verfahren auf Tauglichkeit für die Rekonstruktion von Makrostrukturen analysiert. Bei den Verfahren handelt es sich um kontaktbasierte Scanner wie das Koordinatenmessgerät, Entfernungsmesser, Triangulation, Phasenverschiebung, 3D-Scanner mit strukturiertem Licht und Fotogrammetrie. Dabei wurde die Verfahren auf Auflösung, Genauigkeit, Kosten und auf die Erfassung von transparenten oder reflektierenden Oberflächen überprüft.

In der Arbeit konnte ermittelt werden, dass es grundsätzlich mit allen 3D-Scan-Verfahren möglich ist, Makrostrukturen einer Oberfläche zu erfassen. Allerdings wiesen alle Verfahren Einschränkungen bei bestimmten Oberflächeneigenschaften auf. Kontaktbasierte Verfahren beispielsweise konnten nur schlecht organische oder weiche Oberflächen abtasten. Optische Scanner dagegen hatten die Schwierigkeit, reflektierende oder transparente Oberflächen zu erfassen.

Zusätzlich zu der Analyse wurde durch die Erstellung eines Prototyps, die Tauglichkeit und Qualität von einem 3D-Scanner mit strukturiertem Licht und dem 3D-Scan-Verfahren mit Fotogrammetrie überprüft. Als Testobjekt wurde dafür ein glänzender Rasiergriff mit Gravur und einer wellenförmigen Struktur an der Seite genutzt. Es zeigte sich, dass es weder mit dem 3D-Scanner noch mithilfe der Fotogrammetrie möglich ist, die reflektierende Oberfläche des Testobjektes zu erfassen. Entweder sind viele Fehlinformationen erfasst worden oder es wurden überhaupt keine Punkte ermittelt. Allerdings konnte die Griffoberfläche sowohl mithilfe von Kreide- als auch von Scanspray abgetastet und anschließend rekonstruiert werden. Jedoch ist bei fast allen Scans die Qualität der Ergebnisse nicht ausreichend, da die Makrostrukturen nur sehr schwach erfasst oder durch Verwendung der Sprays bedeckt wurden.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 3D-Scan

”3D-Scannen ist ein Prozess zum Erfassen von Messdaten eines Objektes oder einer Umgebung. Dabei steht das Erfassen von Form und Aussehen im Vordergrund. Die so erfasste Menge an Messpunkten kann anschließend mit geeigneter Software wieder in eine geometrische Form überführt und mit 3D-Anwendungen weiterbearbeitet werden.” (Lukas 2020, S. 3) [Luk20]

Ein 3D-Scan erzeugt eine digitale 3D-Repräsentation eines realen Objektes. Es ist das Gegenteil von einem 3D-Druck, bei dem aus einem virtuellen 3D-Modell ein reales Objekt wird. Für einen 3D-Scan können verschiedene Verfahren verwendet werden, auf die in diesem Abschnitt genauer eingegangen wird. Das Objekt wird mithilfe von verschiedenen Techniken erfasst und dadurch kann für jeden Punkt der Oberfläche die dazugehörige Oberflächenkoordinate ermittelt werden. Die Verwendung von 3D-Scan-Technologie ermöglicht es alle Details und Feinheiten von realen Objekten zu erfassen und somit das Objekt realitätsgetreu zu rekonstruieren. Hinzu kommt, dass Scan-Verfahren nur einen Bruchteil der Zeit benötigen, die es benötigen würde, das Objekt in einem computer-aided Design (CAD)-Programm von Hand zu modellieren.

Das Ergebnis von allen 3D-Scan-Verfahren ist eine sogenannte Punktwolke, bei der es sich um die Anhäufung von Oberflächenkoordinatenpunkten in einem dreidimensionalen Raum handelt [Lin01]. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 2.1 zu sehen. Anhand der gesammelten Koordinatendaten können weitere Informationen über das Objekt oder die Szene gewonnen werden. Es kann beispielsweise eine 3D-Repräsentation des Objektes in einer CAD-Software erstellt werden. Dafür werden die Punkte der Punktwolke miteinander verbunden und somit die Oberfläche des Objektes nachgebildet. Die Punkte dienen in diesem Fall als Vertices, die durch Anwendung von Algorithmen zu einem Mesh zusammengefügt werden. Das bedeutet, dass die Anzahl der Messpunkt darüber entscheidet, wie genau und detailreich die Oberfläche des gescannten Objektes dargestellt werden kann. [NL13]

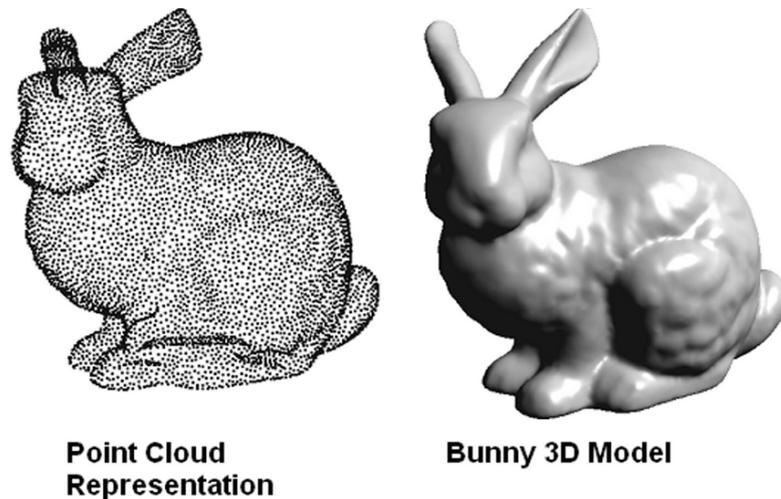


Abbildung 2.1: Punktdarstellung des Stanford-Hasenmodells. (Quelle: https://www.researchgate.net/figure/Point-representation-of-the-Stanford-bunny-model_fig2_224378716; Stand: 17.01.2022)

3D-Scan-Verfahren haben heutzutage schon viele Anwendungsbereiche. Nachfolgend ist eine Auflistung dieser nach Javaid et al. (2021)[JHPS21]:

- Digitalisierung von physikalischen Objekten
- Reverse Engineering
- Entwerfen von komplex gekrümmten Oberflächen
- Überprüfen der Genauigkeit von Produkten
- Werkzeugverschleiß berechnen
- Bildung
- Durchführung von architektonischen Umfragen
- Kunst und Kunstgeschichte
- Gesundheitswesen
- Überwachung
- maßgeschneiderte digitale Nachbildungen
- Luft- und Raumfahrt
- Entwicklung industrieller Werkzeuge
- Prototypenbau

- Qualitätsmanagement
- Metrologie

Die Verfahren zur Erfassung der Oberflächenkoordinaten können in zwei Kategorien aufgeteilt werden. Zu einem gibt es die *kontaktbasierten Verfahren*, wobei der Erfassungsprozess durch Kontakt einer Vorrichtung mit dem Objekt erfolgt. Andererseits gibt es die *nicht kontaktbasierten Verfahren*, wobei das Objekt berührungslos durch aktive oder passive Techniken gescannt wird. Aktive Scanner senden Strahlung oder Licht in die Szene und anhand der reflektierten Strahlen wird das Objekt untersucht. Scanner mit aktiven kontaktlosen Verfahren lassen sich in drei Hauptkategorien unterteilen: Laufzeitmessungen, Phasenverschiebung und Lasertriangulation. Passive Scanner senden kein Licht aus, sondern untersuchen die reflektierte Umgebungsstrahlung. Gängige passive 3D-Scanner sind: Stereoskopische Videoscanner, fotometrische Scanner, Silhouetten-Scanner und bildbasierte Scanner. [Ebr15]

2.1.1 Kontaktbasierte Verfahren

Kontaktbasierte Scanner werden normalerweise auf einer festen und kalibrierten Plattform betrieben. Die Abtastung des Objektes erfolgt durch einen Abtaster, die sich am Ende eines mechanischen Arms befindet, welcher Punkt für Punkt das Objekt abtastet. Der Arm kann sowohl manuell, als auch robotisch bewegt werden und speichert beim Kontakt vom Abtaster und Objekt die dreidimensionalen Koordinaten des Tastkopfs. Durch diesen Prozess entsteht eine Punktwolke, die zur Erzeugung von 3D-Modelle des Objektes genutzt werden können. [Ebr15]

Koordinatenmessgeräte

Mit einem Koordinatenmessgerät (KGM) ist es möglich, Objekte durch einen Abtaster aufmontierten Achsen abzutasten. Das Gerät besteht aus dem Objektisch (Abbildung 2.2 C), drei bewegliche Achsen (Abbildung 2.2 A), dem Abtastsystem (Abbildung 2.2 B) und einem Erfassungssystem (Abbildung 2.2 D) für die gemessenen Werte. Es wird unter anderem zur Messung von Dimensionen, Winkeln, Orientierung, des Profils oder zur Digitalisierung genutzt. KGM können das Objekt sowohl kontaktbasiert als auch kontaktlos abtasten, je nachdem, was für eine Vorrichtung zum Abtasten verwendet wird. [Ebr15]

Die Erfassung der Daten erfolgt über eine Abtastvorrichtung und in vier unterschiedlichen Schritten. Zuerst wird der Abtaster positioniert, wobei entweder das Objekt oder die Vorrichtung bewegt werden kann. Die Bewegung erfolgt dabei auf drei Achsen, die unabhängig voneinander von einem Motor angetrieben werden. Die Steuerung erfolgt durch einen Operator oder eine vom Objekt vorhandenen CAD-Datei. [HP⁺12]

Nachdem der abzutastende Objektpunkt in Reichweite der Abtastvorrichtung ist, erfolgt die Abtastung. Es wird ein physikalischer Kontakt zwischen Objekt und Vorrichtung herge-

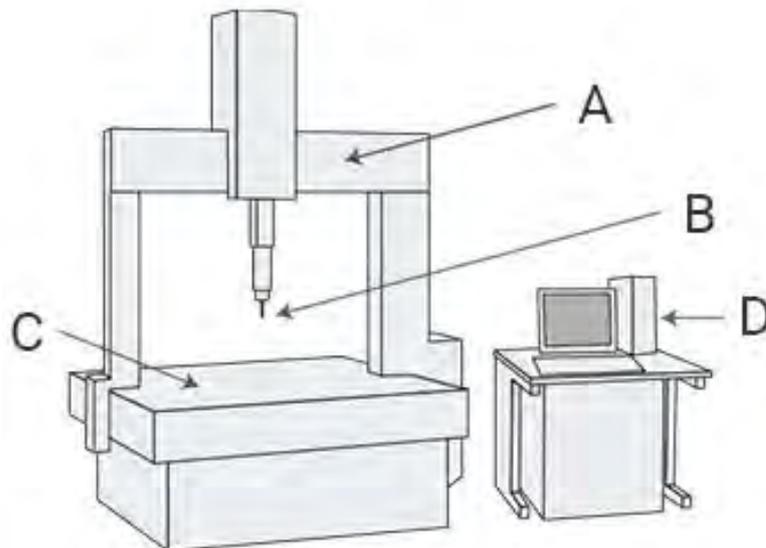


Abbildung 2.2: Aufbau eines Koordinatenmessgerätes (Quelle: <https://www.keyence.de/ss/products/measure-sys/measurement-selection/type/3d.jsp>; Stand: 18.01.2022)

stellt, wobei der Druck bei jedem Objektpunkt gleich und vordefiniert ist. Wird durch den Kontakt der vordefinierte Druck erreicht, erkennt das System den Objektpunkt. [HP⁺12]

Sobald der Kontakt mit dem Objekt hergestellt ist, wird der Objektpunkt gemessen. Abtastvorrichtung, die kontaktlos arbeiten, müssen zunächst die Distanz zwischen Objekt und Vorrichtung bestimmen, um die genaue Position bestimmen zu können. Bei kontaktbasierten Koordinatenmessgerät entfällt dieser Schritt. [HP⁺12]

Im letzten Schritt wird die Position des Objektpunktes im Koordinatensystem des KGM ausgewertet. Das bedeutet, dass der Objektpunkt in das Koordinatensystem des KGM transformiert wird. Das Ergebnis ist eine Punktwolke, die weiterverarbeitet werden kann. [HP⁺12]

2.1.2 Aktive nichtkontaktbasierte Verfahren

Aktive, nicht kontaktbasierte, Scanner projizieren aktiv Licht oder Strahlung in die Szene, um die Oberfläche zu erfassen. Anhand der vom Objekt reflektierten Strahlen, kann unter Verwendung verschiedener Verfahren, die Entfernung zum Objekt und somit die Oberflächen-

koordinaten im dreidimensionalen Raum erfasst werden. Bei den ausgesendeten Strahlen handelt es sich in der Regel um Licht, Ultraschall oder Röntgenstrahlung. Die drei meistgenutzten Methoden zur Bestimmung der Entfernung vom System zum Objekt, sind die Berechnung der Flugzeit, die Anwendung von Triangulation und Phasenverschiebung. Die Techniken werden normalerweise unabhängig voneinander eingesetzt, können allerdings auch kombiniert verwendet werden. [Ebr15]

Triangulation

Allgemein ist Triangulation eine Methode zur Betrachtung eines Forschungsgegenstandes von mindestens zwei Punkten. Der Begriff stammt aus der Landvermessung und Geodäsie, findet aber heutzutage auch in vielen anderen Bereichen Anwendung. In dieser Arbeit wird sich auf die ursprüngliche Bedeutung der Triangulation, der Lokalisierung eines Punktes anhand zwei bekannter Punkte, bezogen. [Fli11]

Dreiecke sind die Grundlage für viele Messverfahren. Schon im antiken Griechenland wurden sie für die Entfernungsmessung verwendet [BBC+03]. Durch die Eigenschaften des Dreiecks kann die Distanz e eines Punktes M zu den anderen Eckpunkten A und B bestimmt werden (Abbildung 2.12). Dafür müssen einerseits die Distanz zwischen A und B , sowie die Winkel α und β bekannt sein. Mithilfe des Sinus- oder Kosinussatzes lässt sich die Entfernung e bestimmen. [HS97]

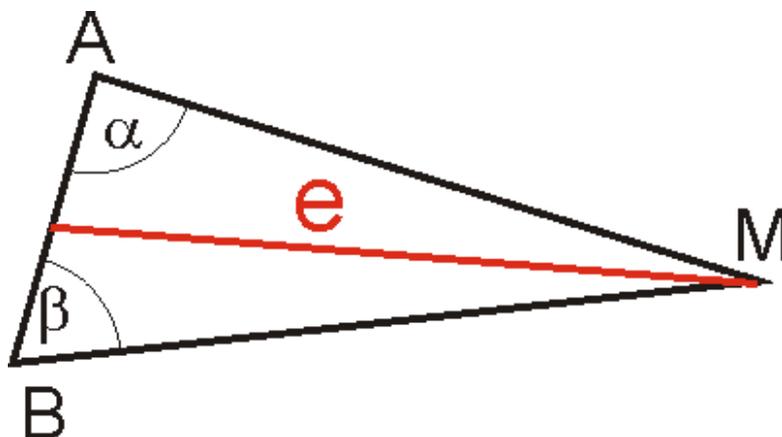


Abbildung 2.3: Grundlagen der Triangulation (Quelle: <https://www.leifiphysik.de/astrophysik/sternbeobachtung/ausblick/mondentfernung-durch-triangulation>; Stand: 19.01.2022)

Triangulation ist die Basis für verschiedene 3D-Scan-Verfahren, sie wird beispielsweise für strukturierte Lichtsysteme (Abschnitt 2.1.2) und Fotogrammetrie (Abschnitt 2.1.3) verwendet.

Der Aufbau von Laser-Scannern auf Basis von Triangulation hat eine oder mehrere Lichtquel-

len, die Laser in Form eines Lichtstrahls auf die Oberfläche des Objekts werfen. Zusätzlich gibt es eine Kamera, welche die Reflexionen des Lasers erfasst. Je nach zurückgelegter Entfernung des Lasers zwischen Quelle und Objekt trifft der reflektierte Strahl an einer anderen Stelle auf den Kamerasensor. Durch die Positionierung von Kamera, Objekt und Laser entsteht ein Dreieck, wodurch die Entfernung zwischen Laser und Objekt ermittelt werden kann. Der Winkel von Kamera zu Objekt kann anhand des reflektierten Lasers berechnet werden. [Ebr15]

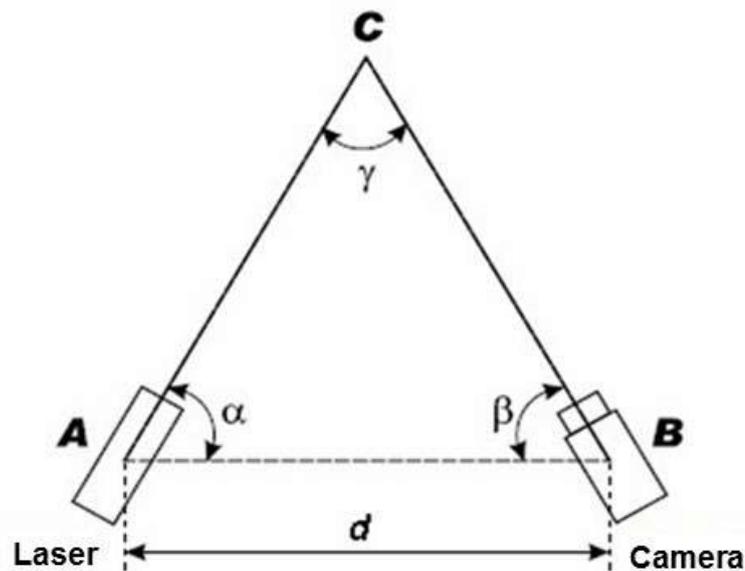


Abbildung 2.4: Aufbau 3D-Scanner mit Triangulation (Quelle: https://www.researchgate.net/figure/Triangulation-method-in-3D-Scanning_fig1_311847623; Stand: 19.01.2022)

Laufzeitmessung

Bei der Laufzeitmessung (englisch: time of flight, ToF) wird anhand der Laufzeit eines Lichtstrahles der Abstand zwischen Objekt und optischen System gemessen. Ein Laser wird auf das Objekt ausgesendet und die Zeit gemessen, bis der reflektierte Laserstrahl auf ein Laser-Entfernungsmesser trifft. Die Entfernung kann schließlich durch Berechnung von Zeit und Lichtgeschwindigkeit errechnet werden. Die Abtastung des Objektes oder der Szene erfolgt Punkt für Punkt, da der Laser-Entfernungsmesser nur den Punkt in seiner Blickrichtung berechnen kann. Zur Berechnung aller Punkte wird entweder das Objekt oder das Erfassungssystem bewegt oder es werden drehbare Spiegelsysteme verwendet. Laufzeit-Scanner können zwischen 10.000 \sim 100.000 Punkte pro Sekunde scannen. [Ebr15]

Laufzeit-Geräte funktionieren auf der Basis des RADAR-Prinzips (Radio Detection and Ranging), welches auf der Tatsache beruht, dass sich elektromagnetische Strahlung in Luft mit Lichtgeschwindigkeit von $\approx 3 \cdot 10^8$ [m/s] bewegt. Unter Anwendung dieser Gegebenheit

kann die Entfernung zum Objekt ausschließlich anhand der benötigten Reisezeit berechnet werden. Die gemessene Zeit des Laser-Entfernungsmessers entspricht dabei der Distanz zum Objekt und wieder zurück zum optischen System. In Abbildung 2.5 kann der Vorgang betrachtet werden. Die Lichtquelle und der Entfernungsmesser müssen für genau Messungen die gleiche Entfernung zum Objekt haben. [PZ16]

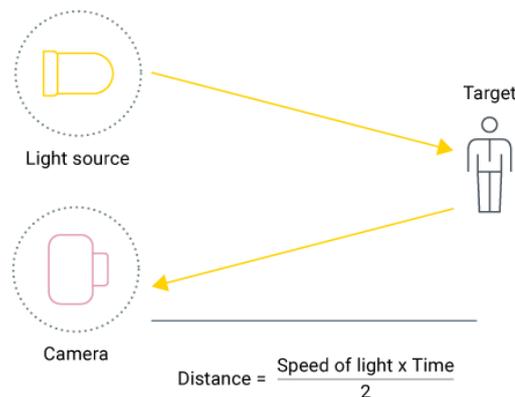


Abbildung 2.5: Messung der Entfernung durch Verwendung der Laufzeitmessung (Quelle: <https://www.avsystem.com/blog/time-of-flight/>; Stand: 18.01.2022)

Die ToF-Tiefenkamera besteht aus einem Sender, der elektromagnetische Strahlung im hohen HF- (16MHz) oder niedrigen VHF-Bereich (120MHz) durch ein optisches System in die Szene aussendet. Der Sender verwendet Laserstrahlen oder LEDs als Lichtquelle, da diese Komponenten preiswert sind und leicht die nötige Frequenz erzeugen können. Die LEDs senden das Licht mit einer Wellenlänge von ca. 850 Nanometer aus, was sich im Nahinfrarot-Spektrum befindet. Der Empfänger ist ein matrixförmiger Sensor, dessen einzelne Elemente unabhängig voneinander die Laufzeitmessungen durchführen können. Jeder Sensorpixel empfängt das reflektierte nahinfrarot-Signal. Das Signal wird von den Pixeln fotoelektrisch umgewandelt und in einer Tiefenkarte abgespeichert. [PZ16]

Tiefenkarten (englisch: Depth Map) sind zweidimensionale Graustufenbilder, in denen jede Raumkoordinate mit dem entsprechenden Tiefenwert verbunden ist [PZ16]. Das bedeutet, dass die Entfernung durch die Intensität der Grauwerte dargestellt wird. Eine solche Tiefenkarte ist in Abbildung 2.6 zu sehen. Links befindet sich das normale Bild und rechts die Entfernungsdarstellung durch eine Tiefenkarte.

Beim Vorgang zur Erfassung einer Szene oder eines Objektes mit einer ToF-Tiefenkamera wird je nach Methode entweder die Kamera, die Szene oder der Spiegel im Raum bewegt, um das Objekt abzutasten. Die ermittelten Entfernungen werden in einer Tiefenkarte gespeichert. Zusätzlich werden die Farbinformationen (RGB) abgespeichert. Durch Aufnahmen des Objektes von verschiedenen Perspektiven kann so nach und nach das komplette Objekt



Abbildung 2.6: Darstellung eines normalen Bildes (links) in einer Tiefenkarte (rechts) (Quelle: <https://www.intechopen.com/chapters/67181>; Stand: 18.01.2022)

erfasst werden. Bei Aufnahmen mit einer Laufzeit-Kamera müssen nicht alle Informationen vom Objekt vorhanden sein, um erste Ergebnisse erzielen zu können. Die fehlenden Abschnitte können nachträglich noch erfasst und verarbeitet werden. [PZ16]

Nach Aufnahme der Tiefenkarten werden diese durch Verwendung von Filtern bearbeitet. Das Ziel hierbei ist die Reduzierung vom Rauschen und die Entfernung von fehlerhaften Punkten, die auch Artefakte genannt werden. Nachfolgend werden aus den bereinigten Tiefenkarten die einzelnen 3D-Koordinaten berechnet. Für jede Karte entsteht eine eigene Punktwolke, die im nächsten Schritt in einem Koordinatenreferenzsystem zusammengebracht werden müssen. Die grobe Ausrichtung der Punktwolken erfolgt dabei durch Berechnung von korrespondierenden Punkten in den verschiedenen Systemen. Diese werden durch verschiedene Algorithmen zur Merkmalsextraktion ermittelt. Eine feinere Ausrichtung erfolgt anschließend durch ICP (Iterative Closest Points)-Algorithmen. [PZ16]

Mit ICP-Algorithmen ist es möglich, die Rotation und Translation zu ermitteln, die eine 2D- oder 3D-Punktwolke zu einer Referenzwolke ausrichtet. Die Algorithmen führen mehrere Schritte aus, die iterativ angewendet werden. Im ersten Schritt wird von der Quellpunktwolke S eine zufällige Teilmenge S_0 der 3D-Koordinatenpunkte ausgewählt. Für die Punkte in S_0 werden in der Zielpunktwolke T die nächstgelegenen Punkte gesucht. Sobald alle Punkte abgearbeitet sind, wird aus den gewonnenen Informationen die Rotation und Translation zwischen den Ansichten mithilfe von Algorithmen geschätzt. Die Quellpunktwolke S wird anschließend anhand der ermittelten Rotation und Translation verschoben. Die Schritte werden so lange wiederholt, bis eine Konvergenz der beiden Punktwolken erreicht ist. Da die Verschiebung nur geschätzt ist, werden nach Abschluss der Ausrichtung globale Optimierungsverfahren angewendet, um die Fehler der Schätzung der ICP-Algorithmen zu beseitigen. Ein globales Optimierungsverfahren ist es, die Punktwolke zu einer Szene zusammen zu setzen und so die Fehler zu bestimmen. Die Fehler werden durch Verwendung von paarweiser Registrierung umverteilt. Nach Abschluss der Prozedur sind ausgerichtete und teilweise überlappende Punktwolken das Resultat, die die Form des erfassten Objektes oder der Szene darstellt. [PZ16]

Phasenverschiebung

Eine weitere Methode zur Entfernungsmessung ist die Untersuchung der reflektierten Laser- oder Lichtstrahlen anhand der Phasenverschiebung. Bei diesem Verfahren wird ein modulierter Strahl auf das Objekt projiziert. Anhand des Phasenunterschiedes zwischen ausgesendeten und reflektierten Lichtstrahl kann die Entfernung gemessen werden. [CSL08] Phasenverschiebung wird sowohl bei strukturierten Lichtsystemen (Abschnitt 2.1.2), als auch bei Laserscannern verwendet. Es wird normalerweise für Reichweiten unter 100 Meter verwendet [ST18].

Der Aufbau ist der gleiche wie bei ToF-Systemen. Es gibt ein digitales optisches System, welches die Strahlen aussendet, ein Objekt, welches die Strahlen reflektiert und ein Kamerasystem oder eine andere Art von Detektor, der das reflektierte Licht erfasst. (Abbildung 2.7)

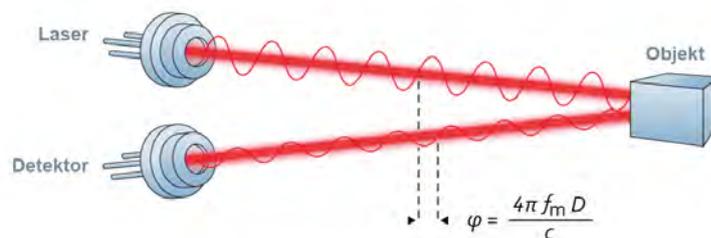


Abbildung 2.7: Erfassung der Distanz mittels Phasenverschiebung (Quelle: <https://www.ipm.fraunhofer.de/en/bu/object-shape-detection/expertise/3d-data-acquisition/optical-distance-measurement.html>; Stand: 21.01.2022)

Der Projektor projiziert einen kontinuierlichen, aus Mess- und Trägerwellen bestehenden, Laserstrahl in die Szene. Sobald der Strahl das Objekt trifft, wird ein Teil des Signals reflektiert und von einer Silizium-Fotodiode erfasst. Das abgeschwächte Signal verstärkt sich und spaltet sich in die einzelnen Bestandteile auf. Das reflektierte Messsignal wird mit dem Referenzsignal verglichen und anhand der Phasenverschiebung kann die Entfernung zum System ermittelt werden. Mittels einer Messung kann das reflektierte Messsignal allerdings nicht genau dem Referenzsignal zugewiesen werden. Die verbreitetste Methode ist, mehrere Frequenzen zu verwenden, um das Signal eindeutig zuordnen zu können. [ST18]

Systeme, die mit Phasenverschiebung arbeiten, sind schneller als ToF-Systeme, allerdings ist das Ergebnis verrauschter als bei ToF-Geräten. [Ebr15] Weiterhin ist anzumerken, dass die Genauigkeit von der Wellenlänge und Auflösung der Phasenmessung abhängt.

Strukturierte Lichtsysteme

3D-Scans mit strukturiertem Licht verwenden kodierte Lichtstrukturen und -muster, um die Tiefeninformationen des Objektes zu berechnen. Die Strukturen oder Muster werden durch einen Projektor auf das Objekt projiziert und anhand der Verzerrung dieser auf dem Objekt kann die 3D-Geometrie des Objektes berechnet werden. Strukturierte Lichtsysteme können das Objekt mit einer großen Geschwindigkeit erfassen, sodass es möglich ist, die Erfassung, Verarbeitung und Visualisierung in Echtzeit durchzuführen.[BLZ16]

Strukturierte Lichtsysteme nutzen das Prinzip des stereoskopischen Sehens aus, um die Tiefeninformationen zu ermitteln. Durch dieses Prinzip wird es ermöglicht, Entfernungen zwischen dem Menschen selbst und Objekten zu schätzen. Dafür verarbeitet das Gehirn die leicht unterschiedlichen Perspektiven, die von den Augen aufgenommen werden. Statt wie bei anderen Verfahren zwei Kameras zu verwenden, wird eine Kamera durch einen Projektor ersetzt. Durch die vom Projektor erzeugten Muster und Strukturen soll das typische Problem von stereoskopischen Systemen behoben werden. Zur Erfassung der Tiefeninformationen sind die Systeme von der Textvariation des zu erfassenden Objekts abhängig. Ist keine große Variation vorhanden, besteht die Problematik darin, entsprechende Punkte zu finden, was die Messgenauigkeit verringert. Die Muster codieren die Oberfläche des Objektes und unter Verwendung von Triangulation, was in Abschnitt 2.1.2 behandelt wird, kann die Entfernung zum Objekt ermittelt werden.[BLZ16]

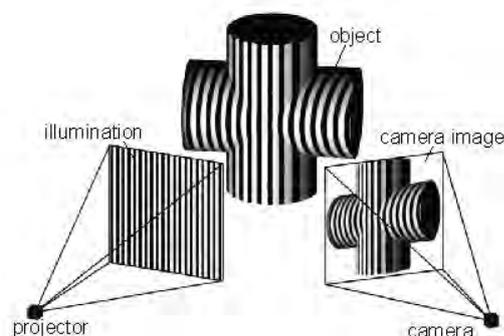


Abbildung 2.8: Funktionsweise des 3D-Scans durch Streifenprojektion (Quelle: <https://www.3dnatives.com/de/streifenprojektion-260720161/>; Stand: 19.01.2022)

Das Ziel der Oberflächencodierung ist, eine Eins-zu-Eins-Beziehung zwischen Projektor- und Kamerapixel herzustellen. Dafür werden ein oder mehrere eindeutige Muster für die Systeme generiert. Anhand der Muster ist es möglich für jedes Pixel ein eindeutiges Codewort zu erzeugen, welches vom Kamerasystem erfasst und ausgewertet wird. Nachdem die Korrespondenz zwischen Projektor- und Kamerapixel hergestellt ist, kann mithilfe der Triangulation zwischen Kamera-, der Projektkoordinate und dem gesannten Punkt die 3D-Koordinaten ermittelt werden. [BLZ16]

Die einfachste Struktur verwendet ein binäres System. Es wird ein Streifenmuster aus den zwei Intensitätswerten schwarz und weiß erzeugt (Abbildung 2.9a). Andere Arten von Mustern verwenden Abstufung der Intensitätswerte in verschiedene Graustufen. So wird beispielsweise bei der N-ary Codierung (Abbildung 2.9b) eine Teilmenge der Werte von 0 bis 255 für die Intensität verwendet. Weitere Muster verwenden ein Dreiecksmuster (Abbildung 2.10a) oder ein Trapezmuster (Abbildung 2.10b). [BLZ16]



(a) binäre Kodierung

(b) N-ary Kodierung

Abbildung 2.9: binäre und N-ary Kodierung (Quelle: Structured Light Techniques and Applications – Tyler Bell et al. (2016))



(a) Dreiecksphasen-Kodierungen

(b) Trapezförmige Phasenkodierungen

Abbildung 2.10: Dreieck- und Trapez-Kodierung (Quelle: Structured Light Techniques and Applications – Tyler Bell et al. (2016))

Zusätzlich können Muster auch mit einer kontinuierlichen sinusförmigen Phasencodierung (Abbildung 2.11), auch Streifenmuster genannt, erzeugt werden. Es gibt verschiedene Methoden, das Streifenmuster zu erzeugen. Beispielsweise ist es möglich, mit einem digitalen Projektor computergenerierte sinusförmige Muster in die Szene zu projizieren. Mit der sinusförmigen Phasencodierung ist es möglich, schon mit einem projizierten Muster genug Informationen zu erhalten, um einfache Strukturen zu erfassen. Für komplexere 3D-Strukturen müssen jedoch mindestens drei zueinander phasenverschobene sinusförmige Muster vorhanden sein. Der Vorteil von phasenverschobenen Mustern ist, dass sie weniger empfindlich gegenüber den Reflexionsschwankungen der Oberfläche sind und deshalb nicht von externem Licht beeinflusst wird. Weiterhin ist es möglich, dichtere und genauere Scans zu erstellen, da mit Streifenmustern eine räumliche Auflösung auf Pixelebene möglich ist. Das Verfahren

kann einfache Szenen schnell erfassen, da die Szenen nur einmal projiziert und die Daten deshalb nur einmal verarbeitet werden müssen. [BLZ16]

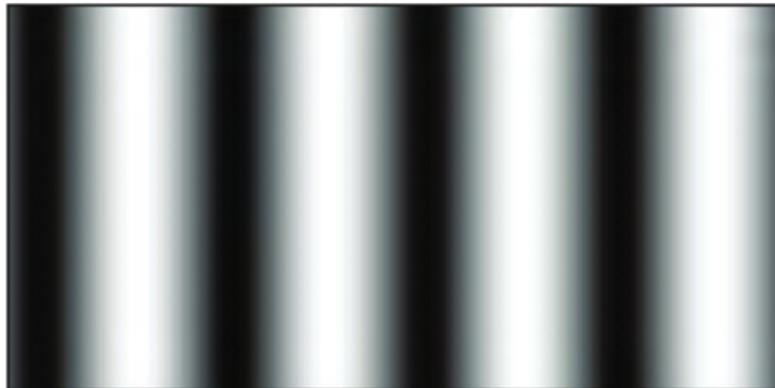


Abbildung 2.11: kontinuierliche sinusförmige Phasenkodierungen (Quelle: Structured Light Techniques and Applications – Tyler Bell et al. (2016))

2.1.3 Passive nichtkontaktbasierte Verfahren

Fotogrammetrie

Ein bekanntes passives nichtkontaktbasiertes Verfahren ist die digitale Fotogrammetrie. Durch Verwendung von Fotogrammetrie ist es möglich, die Position, Form und Ausmaße eines Objektes zu bestimmen, ohne das Objekt zu berühren. Zur Ermittlung dieser Werte werden die Rohdaten aus Bildern genommen, auf denen das Objekt gut erkennbar ist. Das Wort Fotogrammetrie stammt aus dem Griechischen und besteht aus zwei Teilen, den Worten "phaos", was "Licht", und "graphein", was "schreiben", bedeutet. Dieses Verfahren wird unter anderem für die Digitalisierung von Objekten, die Erzeugung von topografischen Karten, die Präzisionsvermessung von Bauten und Deformationsmessungen verwendet. [Kra04]

Es basiert wie andere 3D-Scan-Verfahren auf dem Prinzip des stereoskopischen Sehens, was in Abschnitt 2.1.2 erläutert wird, und dient zur Erfassung der dreidimensionalen Informationen. Fotogrammetrie ermöglicht es, aus mehreren zweidimensionalen Bildern dreidimensionale Informationen zu rekonstruieren. Bei diesem Verfahren wird auch die Triangulation zur Bestimmung der Entfernung verwendet. [LRKB19]

Durch die Rekonstruktion von Strahlungsbündeln können die Position und die Form eines Objektes bestimmt werden. Die dazugehörigen Objektpunkte werden anhand von Schnittpunkten von mindestens zwei korrespondierenden, räumlich getrennten Bildstrahlen bestimmt. Dabei ist die Anzahl der beteiligten Bilder unbegrenzt. [LRKB19]

Der Prozess der Fotogrammetrie besteht aus mehreren Schritten. Im ersten Schritt erfolgt die Bilderaufnahme. Dazu zählt die Auswahl des Objektes, Bestimmung von Kontrollpunkten und Skalierung, wodurch das globale Objektkoordinatensystem definiert wird und die

tatsächliche Aufnahme der Bilder. Im zweiten Schritt werden die aufgenommenen Bilder für die Benutzung vorbereitet. Darunter fällt die Beschriftung der Bilder und die Berechnung von Referenzkoordinaten und/oder die Entfernung aus Vermessungsbeobachtungen durch einen Computer. [LRKB19]

Im dritten Schritt *Ausrichtung* werden die Bilder mithilfe eines Computers miteinander verglichen und verknüpfen. Zuerst die Identifizierung und Messung von Referenzpunkten und Verbindungspunkten. Als zweites erfolgt der Abgleich von identischen Merkmalen in allen Bildern, auch Korrespondenzanalyse genannt. Im dritten Schritt werden die Näherungswerte für unbekannte Größen berechnet, die im nächsten Schritt berechnet werden sollen. Im vierten Schritt der Bündelungsanpassung wird ein Algorithmus verwendet, der sowohl die innere als auch die äußere Orientierung sowie die Objektpunktkoordinaten bestimmt. Abschließend werden die groben Fehler, die bei der Messung entstehen, erkannt und beseitigt. [LRKB19]

Im letzten Schritt *Messung und Analyse* wird je nach Anwendungsfall eine andere Ausgabe erzeugt. Für die Rekonstruktion wird sowohl eine Punktwolke erstellt, aber auch eine 3D-Visualisierung des Objektes. [LRKB19]

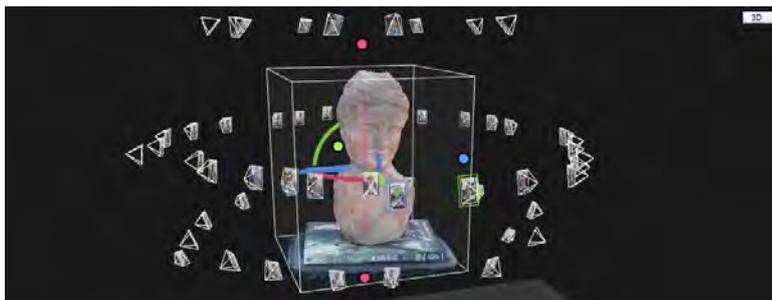


Abbildung 2.12: Anwendung von Fotogrammetrie zur Rekonstruktion eines Objektes (Quelle: <https://3dscanexpert.com/realitycapture-photogrammetry-software-review/>; Stand: 19.01.2022)

2.1.4 Rekonstruktionen aus einer Punktwolke

Das Ziel der Rekonstruktion aus einer Punktwolke ist es, die geometrische Form des erfassten Objektes oder der erfassten Szene wiederherzustellen. Durch Annäherung oder Interpolation kann so eine 3D-Repräsentation erstellt werden. Die Methoden lassen sich in drei Kategorien einteilen. Es gibt Ansätze, die auf Sculpting basieren, andere verwenden Konturverfolgung und schließlich gibt es noch regional wachsende Ansätze.[LTW04]

Bei den Ansätzen, die auf Sculpting basieren, wird zunächst ein Delaunay-Dreieck der Punktwolke konstruiert. Daraus werden anschließend Dreiecke oder dreieckige Felder extrahiert, die die Objektform darstellen. Ein Delaunay-Dreieck ist ein Dreieck mit minimaler Kantenlänge. Ein Beispiel für die Ansätze, die auf Sculpting basieren, ist das Boissonnat's Verfahren

[LTW04]. Dabei wird die 3D-Delaunay-Triangulation verwendet, um das Innere der konvexen Hülle mit Tetraedern zu füllen. Sollten nicht alle Punkte auf der konvexen Hülle liegen, werden Tetraeder eliminiert, bis alle Punkte auf der Begrenzung liegen. Sobald dies der Fall ist, ist der Algorithmus abgeschlossen und es entsteht eine volumetrische Darstellung des Objektes. [Boi84]

Dagegen wird bei den Ansätzen zur Konturverfolgung das dreieckige Mesh durch Konturierung der Nullmenge einer Abstandsfunktion generiert, welche durch die Punktwolke bestimmt ist [LTW04]. Laut Hoppe et al. (1992) handelt es sich bei der Konturverfolgung um die Extraktion einer Isofläche aus einer vorzeichenbehafteten skalaren Funktion. Sie erklären, dass ihr entwickelter Algorithmus zur Konturverfolgung aus zwei Schritten besteht: die Definition einer vorzeichenbehafteten Distanzfunktion und die Verwendung eines Konturierung-Algorithmus, um die geschätzte Oberfläche durch eine vereinfachte Oberfläche zu approximieren. [HDD⁺92]

Die Konstruktion des Meshes durch einen regional wachsenden Ansatz geht von einem Startdreieck aus und fügt nach und nach weitere Dreiecke hinzu. Die Schwierigkeit hierbei, sei laut Lin et al. (2003), die Auswahl es nächsten Punktes zur Bildung eines neuen Dreiecks an den bestehenden Kanten. Eine mögliche Vorgehensweise sei der sogenannte BPA-Algorithmus, bei dem eine Kugel so lange um eine Kante schwenkt, bis diese den nächsten Punkt in der Punktwolke berührt [BMR⁺99]. [LTW04]

Kapitel 3

Stand der Technik

3.1 Einleitung

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Stand der Technik der Themen: Erfassung von Objekten, Rekonstruktion von Makrostrukturen und Verwendung von Retopologie zur Strukturierung von Meshes. Zunächst wird ein Einblick zur Erfassung von transparenten oder spiegelnden Oberflächen gegeben und erläutert, welchen Einfluss "Deep Learning", welches unter Punkt 3.2.2 beschrieben wird, auf die Erfassung hat. Der zweite Teil beschäftigt sich mit der Rekonstruktion von Oberflächenstrukturen. Es werden verschiedene Abläufe aufgezeigt, wie die Strukturen des gescannten Modells auf ein strukturiertes Modell übertragen werden können. Zusätzlich dazu wird eine Möglichkeit aufgezeigt, Strukturen anhand von Schatten in Bilder zu extrahieren und auf ein Objekt zu legen. Schließlich wird im letzte Teil des Kapitels aufgezeigt, wie eingescannte 3D-Modelle strukturiert und für Anwendungen, wie beispielsweise Animationen oder Augmented Reality, aufbereitet werden.

3.2 Erfassung von Objekten

Das Scannen von 3D-Formen ist zu einer der wichtigsten Quellen zur Erzeugung von komplexen digitalen 3D-Modellen geworden. In den letzten Jahren wurden verschiedene Scan-Systeme entwickelt. [PMG⁺05] Die gängigsten Scan-Verfahren werden in Kapitel 2 erklärt. Bei fast allen Scannern besteht das Problem, dass sie glänzende oder transparente Objekt-oberflächen nur ungenügend erfassen können. Chen (2008) [Che08] beschäftigten sich mit Verfahren zur Erfassung solcher Oberflächen. Ein weiteres wichtiges Thema bei der Erfassung von Oberflächen ist die Verwendung von "Deep Learning", was seit einigen Jahren immer häufiger verwendet wird [JJC20]. Darunter fällt unter anderem die Rekonstruktion von Objekten anhand einer Punktwolke, aber auch die Rekonstruktion durch ein einzelnes 2D-Bild. Abschließend wird in diesem Abschnitt noch ein Einblick auf die Erfassung von Mikrostrukturen gegeben.

3.2.1 Transparente Oberflächen

Laut Chen (2008) funktionieren die meisten 3D-Scanner unter der Annahme, dass das ausgestrahlte Licht direkt zum Sensor zurück reflektiert wird. In der realen Welt sei diese Annahme aber oft falsch. Viele Objekte seien lichtdurchlässig, hätten eine volumetrische Streuung, indirekte Reflexionen, würden das Licht brechen oder unter der Oberfläche streuen. Es sei deshalb eine Herausforderung, solche Objekte zu erfassen. Es gäbe aber auch Objekte, die das Licht direkter reflektieren, aber trotzdem spiegelnde oder schwach reflektierende Oberflächen hätten, was die Genauigkeit des Scans erschwere. In der Arbeit *New 3D Scanning Techniques for Complex Scenes* beschäftigte sich Chen mit der Lösung dieser Probleme. Dabei wurden drei Aspekte beachtet: erstens die Rekonstruktion von Makrostrukturen, zweitens das Scannen von durchsichtigen Objekten mit Phasenverschiebung und Polarisierung und schließlich eine neue Methode mit modulierter Phasenverschiebung. [Che08]

Durch die spiegelnden Glanzlichter der Makrostrukturen können Informationen über die Objektoberfläche erhalten werden. Dieses Wissen nutzte Chen, um ein System zu entwickeln, welches die Rekonstruktion von Makrostrukturen der komplexen Objekte, die eine signifikante Reflexionskomponente aufweisen, löst. Zunächst wurden mehrere Bilder vom Objekt und vier spiegelnden Kugeln aus verschiedenen Richtungen aufgenommen. Die Kugeln wurden für die Schätzung der Lichtposition benötigt. Anschließend wurden die Regionen, in denen sich die Kugeln befinden, getrennt voneinander lokalisiert und durch Erstellung einer "Specular Map" die Position der Lichtquelle bestimmt. Dadurch, dass die Positionen der Lichtquellen bestimmt wurden und das System kalibriert wurde, konnte der Normalenvektor für jedes Pixel des Objektes berechnet werden. Die erstellte Karte wurde nachbearbeitet und so konnte schließlich durch dessen Integration eine Höhenkarte des Objektes erzeugt werden. [Che08]

Chen (2008) stellte außerdem eine Methode vor, mit deren Hilfe lichtdurchlässige Objekte mit einem 3D-Scanner erfasst werden können [Che08]. Dabei sei die wichtigste Herausforderung die Trennung von direkten Reflexionskomponenten und globalen Beleuchtungseffekten. Aktuelle Trennungsansätze würden entweder auf Polarisation oder strukturierter hochfrequenter Beleuchtung basieren. Letzteres habe allerdings das Problem, dass das beobachtete Signal der Oberflächenpunkte nicht nur die direkte Reflexion, sondern auch verunreinigte Signale beinhalten würde. Diese Signale würden von der Umgebungsbeleuchtung, von Interreflexionen von anderen Bereichen der Szene oder von Streuungen unter der Oberfläche des Objektes stammen. Der Ansatz von Chen (2008) war die Kombination von Phasenverschiebung und Filterung der Polarisation. Bei der Filterung wurde das Licht durch einen Filter polarisiert und die Differenz zwischen Signal und polarisiertem Licht bestimmt, wodurch der Großteil der Mehrfachstreuung entfernt werden konnte. [Wol94, SK05]. [Che08]

Laut Chen (2008) werden bei bekannten Methoden, die mit Phasenverschiebung arbeiten, die verwendbaren Frequenzen durch Kamera und Projektor begrenzt. Diese Einschränkung kann die Fähigkeit von "Descattering" beeinträchtigen. Um das Problem zu verringern, verwendete Chen (2008) eine Methode mit Phasenverschiebung, die auf Modulation basiert.

Damit wird das Streuvermögen verbessert und bessere Leistung bei Szenen mit starkem globalem Lichttransport wie beispielsweise Streuung unter der Oberfläche oder Interreflexion erzielt. Die Herstellung der Korrespondenz von den Pixeln der Kamera und Projektor bei 3D-Scannern mit strukturiertem Licht werde durch globale Beleuchtungseffekte gestört, da es zur Überlagerung von Signalen kommt. Die Methode, die Chen (2008) aufzeigt, verwendet Trennung basierend auf Modulation Trennung, um das Signal korrekt schätzen zu können. Dafür wird das Eingangssignal mit einem verschobenen Hochfrequenzmuster multipliziert, was zu einer höheren Frequenz führt, wodurch eine bessere Trennung von direkten und globalen Anteilen erreicht werden kann. [Che08]

Eine Alternative zu aufwendigen Scan-Verfahren ist die Verwendung eines sogenannten Scan-Sprays. Damit wird die Objektoberfläche diffus reflektierend, ohne das Objekt zu verändern oder die Struktur zu verdecken (Abbildung 3.1). Paulus et al. (2013) führten eine Versuchsreihe durch, bei der sie mit Laser Triangulation Blätter einscannen. Bei einem dieser Tests besprühten sie das Testobjekt mit Scanspray, da dieses die beste Reflexion verursachen würde [PEGK14]. Chen (2008) bestätigte diese Beobachtung, denn unterirdische Streuung könne vollständig ausgeschlossen werden, wenn die Oberfläche lackiert sei [Che08].



Abbildung 3.1: Objekt mit Scanspray besprüht, um Resultate zu verbessern (Quelle: <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/3d-scanner/aesub-blue-white-spray-transparente-objekte-27639683/>; Stand: 29.01.2022)

3.2.2 Deep Learning

„Deep Learning“ ist eine leistungsstarke Form des maschinellen Lernens. Es ermöglicht dem Computer Wahrnehmungsprobleme, wie Bild- und Spracherkennung zu lösen. [Rus16] Durch die Fähigkeit automatisch zu lernen, konnte Deep Learning große Erfolge unter anderem bei Objektklassifizierung, semantischer Segmentierung und Objekterkennung bei Bildern erzielen [LSL⁺19]. Mit Deep Learning können große Datenmengen verarbeitet werden. Es wird in vielen Bereichen der Objekterfassung und -rekonstruktion genutzt. So ist laut Fu et al. (2020)

die Rekonstruktion von Objekten anhand einzelner 2D-Bilder ein viel untersuchtes Thema bei Deep Learning [Fu20]. Einen Überblick über den aktuellen Stand von Deep Learning geben Bello et al. (2020) in ihrer Arbeit *Review: Deep Learning on 3D Point Clouds*. Sie beschreiben, dass Deep Learning auf dem neusten Stand der Technik Ergebnisse erzielt könnte, die teilweise die Leistung menschlicher Experten übertreffen würde. Ein anderes beliebtes Thema ist die Anwendung zur Rekonstruktion von Punktwolken [PPM⁺20].

Rekonstruktionen aus Punktwolken

Die Abbildung von Punktwolken ist eine der wichtigsten Darstellungsformen von 3D-Modellen. Sie findet Anwendung beim autonomen Fahren, in der Robotik und bei Augmented und Virtual Reality. Bello et al. (2020) zeigen in ihrer Arbeit die großen Herausforderungen von der Verarbeitung von Punktwolken mit Deep Learning auf. So sei die Datendichte der Punktwolken in unterschiedlichen Regionen unterschiedlich gedrängt. (Abbildung 3.2 a). Laut Bello et al. (2020) gäbe es Techniken zur Abschwächung der Unregelmäßigkeiten [DGF15], könne aber nicht vollständig entfernt werden. Die zweite Herausforderung sei die ungleichmäßige Punkteverteilung in einer Punktwolke (Abbildung 3.2 b). Ein weiteres Problem, laut Bello et al. (2020), sei, dass die Liste der Daten invariant gegenüber Permutation sei. (Abbildung 3.2 c). [BYW⁺20]

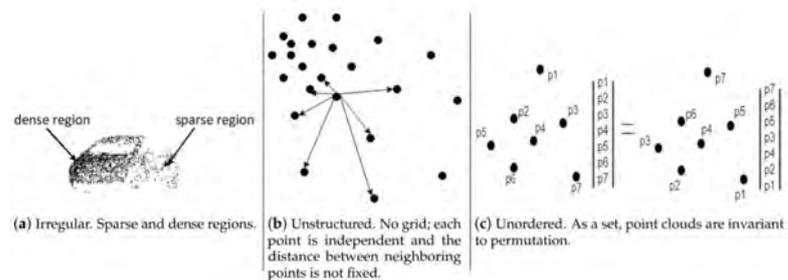


Abbildung 3.2: Herausforderung von Deep Learning mit Punktwolken (Quelle: Review: Deep Learning on 3D Point Clouds – Bello et al. (2020))

Lin et al. (2018) stellen in ihrer Arbeit *Learning Efficient Point Cloud Generation for Dense 3D Object Reconstruction* eine Methode zur effizienten Erzeugung und Darstellung von 3D-Objekten aus einer dichten Punktwolke vor. Sie beschreiben, dass herkömmliche Convolutional Neural Networks eine volumetrische Darstellung des Modells erzeugen würden. Bei einem Convolutional Neural Networks handelt es sich um eine Art von neuronalen Netzwerken für, das speziell für die Verarbeitung von Bild- oder Audiodaten vorgesehen ist. Laut Lin et al. (2018) sei diese Vorgehensweise sehr rechen- und speicherintensiv, da die wichtigen Informationen der Formdarstellung auf der Oberfläche liegen würden. Deshalb stellen sie eine Methode vor, bei der eine 2D-Faltenoperation verwendet wird, um die Oberfläche des 3D-Objektes aus einer Punktwolke vorherzusagen. [LTW04]

Der Ansatz von Lin et al. (2018) ist die Verwendung eines Kodierers, der die Eingabedaten

auf einem latenten Repräsentationsraum abbildet. Die Punktwolke wird durch einen Strukturgenerator, welcher auf 2D-Faltung basiert, generiert. Der Strukturgenerator kann die Form des Objektes anhand verschiedener Bildpunkte schätzen. Zur Optimierung des Lernprozesses des neuronalen Netzwerkes haben Lin et al. (2018) einen Pseudo-Renderer eingeführt, der Höhenkarten erzeugt, um den 2D-Projektionsfehler zu ermitteln. Diese Vorgehensweise sei zirka 100-mal schneller, als die herkömmlichen 3D-basierten Optimierungsverfahren. Durch Verwendung der Methode sei es möglich, genauere und dichtere 3D-Formen zu rekonstruieren. [LTW04]

Rekonstruktionen aus einem Bild

Die 3D-Rekonstruktion von Bildern ist eine der Hauptaufgaben des wissenschaftlichen Bereichs der Computer Vision. Eine große Schwierigkeit ist die Rekonstruktion aus einem einzigen Bild. [Fu20]

Laut Niu et al. (2018) sei das Interesse an der 3D-Modellierung auf Basis eines einzelnen Bildes in den letzten Jahren gestiegen. Die Leistung der Verarbeitung sei durch den enormen Erfolg bei Verwendung von Convolutional Neural Networks für bildbasierte Lernaufgaben stark gestiegen. Gängige Lernmodelle zielten hauptsächlich auf die Erstellung volumetrischer Darstellung ab. Die Modelle hätten zwar eine hohe Kapazität, es würden allerdings viele Informationen der 3D-Form, Topologie oder Teilstruktur verloren gehen. Deshalb entwickelten Niu et al. (2018) in ihrer Arbeit *Recovering 3D Shape Structure from a Single RGB Image* eine Methode, mit deren Hilfe es möglich ist, automatisch die Teile eines Objektes von einem 2D-Bild als Quader zu rekonstruieren und der gegenseitigen Beziehung der Teile zueinander zu erkennen. [NLX18]

Für die Umsetzung verwenden Niu et al. (2018) ein Auto-Encoder, der aus zwei Subnetzwerken besteht. Das eine Netzwerk wird verwendet, um die Objektstruktur aus dem 2D-Bild zu erkennen und das andere, um die Struktur als 3D-Boxen herzustellen und die Beziehung untereinander zu ermitteln.

Das Netzwerk zur Erkennung der Objektstruktur wird darauf trainiert, die Konturen des Objektes zu schätzen. Dafür wird das Eingangsbild herunterskaliert und durch einen Algorithmus eine binäre Maske mit einem Viertel der Auflösung des Eingangsbildes erstellt. Die beiden Bilder werden durch das neuronale Netzwerk verarbeitet. Die daraus resultierenden Merkmale werden zusammen mit den verarbeiteten Merkmalen des Originalbildes im zweiten Netzwerk decodiert und dadurch eine Hierarchie mit Teilboxen erzeugt. Das Ergebnis der Methode kann in Abbildung 3.3 gesehen werden.

3.2.3 Mikroskopische Oberflächen erfassen

Auch in der Mikrobiologie wird die Rekonstruktion von Oberflächen benötigt. Tafti et al. (2015) haben sich in ihrem Paper *Recent advances in 3D SEM surface reconstruction* das



Abbildung 3.3: Ergebnis von 3D-Rekonstruktion aus einem einzelnen Bild – Eingabebild links und Resultat rechts – Quelle: Niu et al. -Recovering 3D Shape Structure from a Single RGB Image (2018)

Ziel gesetzt, die Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Geschwindigkeit der Oberflächenrekonstruktion von Rasterelektronenmikroskop zu verbessern. Zusätzlich wollen sie verschiedene Herausforderungen dabei aufzeigen. Durch die Erzeugung von dreidimensionalen Formen eines Rasterelektronenmikroskops könnten viele Bereiche der Wissenschaft profitieren. So sei es beispielsweise möglich, dass medizinische Forscher durch 3D-Modelle die Zellanatomie besser untersuchen könnten. Für diesen Ansatz verwenden Tafti et al. (2015) die Rekonstruktion von mehreren Bildern. [TKA⁺15]

Der Prozess ähnelt dem der Fotogrammetrie. Zunächst werden mehrere Bilder von den Aufnahmen des Rasterelektronenmikroskops aus verschiedenen Perspektiven erstellt. Danach werden mit dem SIFT-Algorithmus [Low04] und K-Nearest-Neighbor-Algorithmus [Alt92] übereinstimmende Punkte in den verschiedenen Bildern gesucht. Anhand dieser Informationen schätzen Tafti et al. (2015) die Rotation und Translation der Bilder zueinander. Daraufhin werden die Ausreißer ermittelt und mithilfe von linearer Triangulation die Position von jedem Punkt im dreidimensionalen Raum bestimmt. Abschließend erfolgt ein Verfeinerungsprozess, welcher der Hauptfokus dieser Arbeit ist. Dabei werden verschiedene Parametersets überprüft. Bei den Parametern handelt es sich um die 3D-Punkte, die relative Position und extrinsische SEM-Parameter, die die Rotation und Translation von einem Blickpunkt zum anderen beschreiben. Es wird eine Kostenfunktion für jedes Set aufgestellt und überprüft, welche Parameter verwendet werden können. Anhand des best passenden Parameters wird die Verfeinerung durchgeführt und ein finales 3D-Modell erzeugt. [TKA⁺15]

Schließlich geben Tafti et al. (2015) einen Überblick über die Probleme und Herausforderungen der Oberflächenrekonstruktion mit einem Rasterelektronenmikroskop. Unter anderem geben sie an, dass nicht sichtbare Bereiche nicht rekonstruiert werden, dass aufgenommene Bilder durch ein Rasterelektronenmikroskop verzerrt oder verrauscht sind und dass sie unter Lichter- und Schatteneffekten leiden. Zusätzlich geben Tafti et al. (2015) an, dass Bilder

mit Rasterelektronenmikroskop nur in einem kleinen Winkel aufgenommen werden können und deshalb nur eine limitierte Anzahl von Bildern für die Rekonstruktion zur Verfügung steht. [TKA⁺15]

3.3 Extraktion von Strukturen

3.3.1 Erzeugung einer Höhenkarte anhand eines 3D-Scans und eines Kontrollmodells

Das Ergebnis eines 3D-Scans ist eine hochauflösende, von einem Computer erzeugte Abbildung des realen Objektes mit Makro- und eventuell Mikrostruktur. Durch die Verfahren zur Rekonstruktion der Punktwolke entsteht allerdings ein unstrukturiertes Mesh. Laut Pan et al. (2018) werden mittlerweile viele 3D-Modelle für Anwendungen wie Augmented Reality, Virtual Reality, Filme oder die Erhaltung von historischen Relikten durch 3D-Scanner erzeugt. Allerdings entstehen dadurch einige Probleme. So seien die Daten viel zu groß, die rekonstruierten Meshes seien unregelmäßig und haben redundante Flächen. Dazu kommt, dass es dem Designer oft schwerfalle, die Stelle auf der UV-Map der Position auf dem Objekt zuzuweisen. [PDZR18]

Hilton et al. (2002) beschäftigen sich in ihrer Arbeit *From 3D Shape Capture to Animated Models* mit dieser Problematik und entwickeln einen Prozess, mit dessen Hilfe die Strukturen eines gescannten Objektes auf ein strukturiertes Mesh übertragen werden können, um den Aufwand von manuellen Nacharbeiten zu minimieren. Ihr Ziel ist es, anhand von erfassten 3D-Daten eine strukturierte Rekonstruktion für realistische Animationen zu erstellen. [HSC02]

Der Ablauf des von Hilton et al. (2002) entwickelten Prozesses ist in Abbildung 3.4 zu sehen. In den ersten vier Schritten werden die Strukturen extrahiert und in den letzten zwei Schritten wird das verwendete niedrig aufgelöste Modell weiterverarbeitet. Zu Beginn wird ein Kontrollmodell des realen Objektes erstellt. Dabei handelt es sich um eine vereinfachte Darstellung des Objektes mit einer niedrigen Auflösung, mit Annäherung der Form und Topologie. Sobald dies geschehen ist, wird das Kontrollmodell zu dem gescannten Modell ausgerichtet und verformt, sodass sich das Kontrollmodell daran anpasst. Schließlich wird eine kontinuierliche Abbildung zwischen Oberfläche des Kontrollmodells und den erfassten Daten erstellt. Die Abbildung wurden in Form einer Displacement Map bei dem Kontrollmodell angewendet. [HSC02]

Durch die Anwendung einer Displacement Map auf einem Kontrollmodell mit niedriger Auflösung ist es möglich eine Annäherung an das erfasste, hochaufgelöste Modell zu erhalten. Die Erstellung der Displacement Map besteht aus mehreren Schritten. Zuerst wird eine Verknüpfung zwischen hochauflösenden Mesh und Kontrollmodell im dreidimensionalen Raum erstellt. Das hochauflösende Modell wird daraufhin auf einer 2D-Bildebene abgebildet, indem es für jedes Dreieck im Kontrollmodell ein Satz von Textkoordinaten verwendet. Anschließend wird der Abstand zwischen den beiden Oberflächen in einem regelmäßigen Gitter abgetastet, um die Displacement Map zu erhalten. [HSC02]

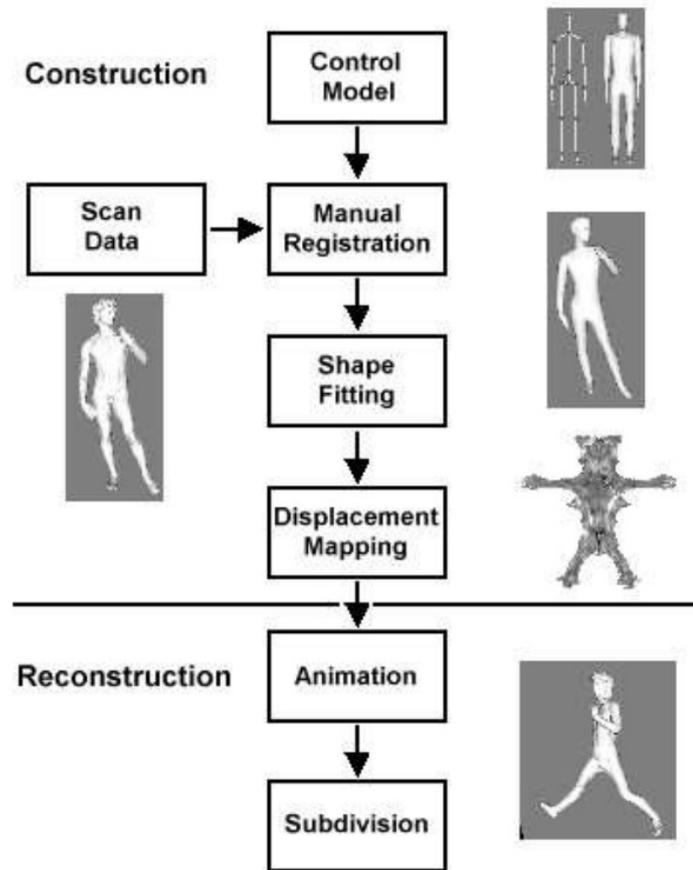


Abbildung 3.4: Workflow 3D-Scan zu strukturiertem Modell (Quelle: From 3D Shape Capture to Animated Models Hilton et al. (2002))

Zur Verwendung einer Displacement Map muss das Kontrollmodell eine injektive eins zu eins Verknüpfung zum hochauflösenden Modell haben. Damit wird sichergestellt, dass die erfasste Oberfläche ohne Detailverlust dargestellt werden kann. Hilton et al. (2002) verwenden einen eigenen Algorithmus zur Netzvereinfachung, um die injektive Verknüpfung zu gewährleisten. Die Vereinfachung erfolgt durch Kanten-Kollabieren. [HSC02]

Eine ähnliche Vorgehensweise hat Webster (2017) in seine Arbeit *High poly to low poly workflows for real-time rendering*. Er verwendet auch zwei 3D-Modelle, eins mit einer geringen und eins mit einer hohen Auflösung. Im Gegensatz zu Hilton et al. (2002) verwendet Webster allerdings eine Normal-Map zur Darstellung der Oberflächenstruktur und erzeugt das niedrig auflösendem Modell aus dem hochauflösendem Modell. Dafür gibt er drei mögliche Vorgehensweise an, erstens die Verringerung der Subdivision mit einem Tool, zweites die Verwendung eines Retopologie-Algorithmus und schließlich die händische Erstellung ei-

ner vereinfachten Version. Wie bei Hilton et al. (2002) werden beide Modelle zueinander ausgerichtet und daraufhin die Oberflächenstrukturen auf einer Normal Map gespeichert. Das Resultat des Verfahrens ist in Abbildung 3.5 zu sehen. [Web17]

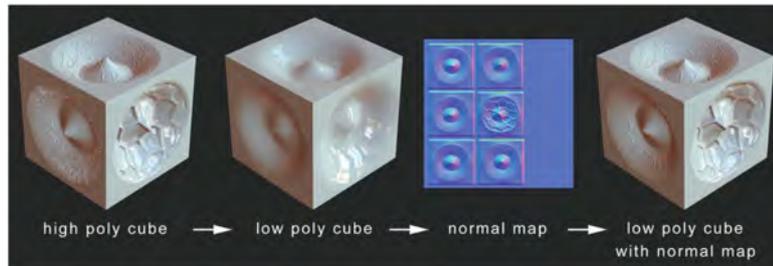


Abbildung 3.5: Workflow hochauflösendes Modell zu niedrig auflösenden Modell (Quelle: From 3D Shape Capture to Animated Models Hilton et al. (2002))

3.3.2 Strukturen anhand von Schatten erfassen

Eine weitere Möglichkeit Tiefeninformationen zu erhalten ist die Verwendung der Tiefen Halluzination (engl.: depth hallucination). Laut Grencross et al. (2008) handelt es sich dabei um ein Verfahren, das "Shape-from-Shading" nutzt. Durch "Shape-from-Shading" ist es möglich Formabweichungen wie Risse, Kratzer, Poren oder Kerben zu erkennen. Grencross et al. (2008) erzeugen durch die unterschiedlich belichteten Bildpaare texturierte Höhenfelder. [GWM⁺08]

Laut Grencross et al. (2008) liefern Schattenvariationen von Mesostrukturen einer Oberfläche wichtige Wahrnehmungshinweise, die für die korrekte Deutung der Form notwendig sind. Das Ziel der Arbeit von Grencross et al. (2008) ist die realistische Beleuchtung von überwiegend diffus strukturierten Oberflächen. Die Oberflächentiefe wurde dabei aus einem einzelnen 2D-Bild durch die Tiefen Halluzination abgeleitet. Durch die Darstellung von Details sei es möglich, die visuelle Realität zu steigern. [GWM⁺08]

Das Verfahren ist in mehrere Ablaufschritte unterteilt. Zunächst erfolgt die Bildaufnahme. Dafür verwenden Grencross et al. (2008) eine Spiegelreflexkamera mit Blitzgerät, welche auf einem Stativ befestigt ist. Vor den Aufnahmen wird ein Weißabgleich gemacht, damit eine gute Farbbalance entsteht. Es wird sowohl ein Bild mit diffuser Beleuchtung, als auch ein Bild mit Blitzlicht aufgenommen. Anhand der erzeugten Bilder werden die diffuse und die Albedo-Schattierung geschätzt. Dafür werden die beiden Bilder miteinander verrechnet, was einen ungefähren Reflexionswert an jedem Pixel erzeugt. Zusätzlich wird durch die Verrechnung unter anderem die Vignettierung korrigiert. [GWM⁺08]

Anhand des geschätzten diffusen Schattenbildes wird anschließend die Höhenkarte erstellt. Für die Methodik verwenden Grencross et al. (2008) die Methoden von Langer und Zucker (1994) [LZ94] als Grundlage. Sie entwickelten eine Näherungslösung, die direkt im Bildraum

arbeitet und die Tiefe jedes Pixels schätzen kann. Anhand von zwei selbst entwickelten lokalen Modellen war es ihnen möglich, jede Schattierung und Mesostruktur zu bestimmen. Durch die Modelle wurden die Täler und Hügel in einem Bild bestimmt und dadurch die Höhenkarte erstellt. [GWM⁺08]

3.4 Scans aufbereiten

Eingescannte Objekte haben immer ein unstrukturiertes Mesh. Die Verarbeitung solcher Meshes ist unüberschaubar und sehr zeitaufwendig [HSC02]. Ein gängiger Ansatz ist die Verwendung von Retopologie, wobei das Objekt manuell oder automatisch ein semistrukturiertes Mesh erhält. In diesem Abschnitt wird ein Verfahren vorgestellt, bei dem Deep Learning verwendet wird, um Meshes durch Retopologie zu strukturieren. Des Weiteren wird ein zweiter Ansatz vorgestellt, der direkt aus der Punktwolke ein strukturiertes Mesh erzeugt.

3.4.1 Verwendung von Deep Learning zur Retopologie

Es ist eine große Herausforderung, die unstrukturierten Meshes eines eingescannten Objektes zu bearbeiten und die Texturen anzupassen. Mit dieser Problematik beschäftigten sich Pan et al. (2018) in ihrer Arbeit *Automatic Re-topology and UV Remapping for 3D Scanned Objects based on Neural Network*. Darin beschreiben sie neuartige, auf neuronale Netzwerke basierende, Methoden zur Strukturierung des Meshes und Neuordnung der UV-Koordinaten. Durch diese Methoden soll es möglich sein, jedes beliebige Modell mit Textur in ein (halb-)reguläres Mesh mit dazugehöriger Textur zu transformieren und den Einfluss von Lichtinformationen zu entfernen. [PDZR18]

Für die Umwandlung schlagen Pan et al. (2018) eine automatische Neustrukturierung von Mesh und UV-Map vor. Ihr Ansatz besteht aus drei Schritten: Zuerst ermittelt ein neuronales Netzwerk die Start- und Endpunkte, um die UV-Map in mehrere regelmäßige Abschnitte zu unterteilen. Die beiden Punkte seien wichtig, da alle folgenden Berechnungen auf diesen basierten. Dafür wird jeder Scheitelpunkt des Meshes durchlaufen und durch das neuronale Netzwerk überprüft, ob er ein geeigneter Start- oder Endpunkt für die Aufteilung des Modells ist. Im zweiten Schritt wird das Orientierungsfeld optimiert und daraus das regelmäßige Mesh exportiert. Das Mesh wird anhand der Start- und Endpunkte der UV-Maps auf der 2D-Raumebene parametrisiert. Im letzten Schritt werden die Beleuchtungsinformationen entfernt. Der Grund dafür ist laut Pan et al. (2018), dass bei 3D-Scans oft Beleuchtungsinformationen mit in der Textur gespeichert werden. Sobald in späteren Anwendungen Lichtquellen an anderen Positionen hinzugefügt würden, sei es unmöglich, die gespeicherten Highlights zu ändern. Pan et al. (2018) verwendeten dafür ein neuronales Netzwerk mit vier Schichten. Das Netzwerk berechnet die Umgebungsabdeckung, welche invertiert wird, um eine Farbmaske zu erhalten. Die umgekehrte Farbmaske wird auf die Textkoordinaten projiziert, um die Beleuchtungsinformationen zu entfernen. In der Abbildung 3.6 wird das Ergebnis des Verfahrens von Pan et al. (2018) veranschaulicht.

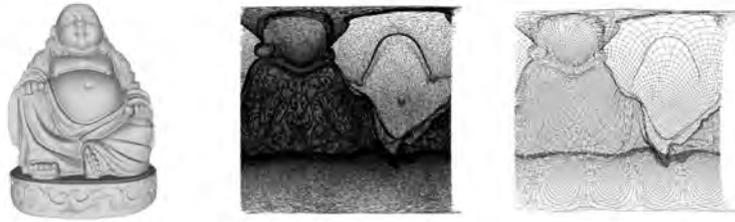


Abbildung 3.6: Ergebnisse der Methode von Pan et al. – links gescannte Objekt, in der Mitte die aufgeschnittenen UV-Map des Originals und links die überarbeitete UV-Map (Quelle: Pan. et al. (2018) – Automatic Re-topology and UV Remapping for 3D Scanned Objects based on Neural Network)

3.4.2 Quad-Mesh aus Punktwolke generieren

Einen anderen Ansatz nutzten Bukenberger und Lensch (2018) in ihrer Arbeit *Hierarchical Quad Meshing of 3D Scanned Surfaces*. Ihre Methode kann direkt aus der Punktwolke des Objektes ein "wasserdichtes" Quad-Mesh erstellen. Ihre Motivation sei, herkömmliche Algorithmen zur Erzeugung einer Oberfläche aus Punktwolken zu ersetzen, die zusätzliche Arbeit zur Bereinigung und Vorbereitung für nachfolgende Anwendung bedeute. [BL18]

Laut Bukenberger und Lensch (2018) habe ihr Algorithmus mehrere Vorteile. Unter anderem benötige er nur die Punkt- und keine weiteren Informationen wie Ausrichtung oder Farbe. Weiterhin können Punktwolken in jeder Größe verarbeitet werden und das Resultat sei garantiert ein Quad-Mesh ohne Remeshing. Das Ergebnis sei eine geschlossene und mannigfaltige Oberfläche und würde keine Nachbearbeitung benötigen. Die Berechnung passe sich an die Punktwolkenstruktur an, würde den organischen Formen folgen und sich an adaptiven Punktwolkenmerkmalen ausrichten. [BL18]

Die Methode von Bukenberger und Lensch (2018) besteht aus drei Phasen. Im ersten Schritt wurde ein ausgeglichener binärer KD-Baum durch rekursive Unterteilung der Punktwolke konstruiert. Bei einem KD-Baum handelt es sich um einen binären Suchbaum, bei dem jeder Knoten zwei Kindknoten hat [Jun12]. Laut Bukenberger und Lensch (2018) habe diese Art von Datenstruktur den Vorteil, dass sie sowohl einfach zu konstruieren und verarbeiten sei, als auch wenig Rechen- und Speicheraufwand brauchen. Jede Probe in einem Ast des Baums wurde mit einer Kugel versehen und eine geeignete Probe auf der Kugeloberfläche als repräsentativer Scheitelpunkt ausgewählt. Dabei bildeten vier Scheitelpunkte eine Quad-Kachel. [BL18]

Im zweiten Schritt wurden die erstellten Quad-Kacheln miteinander verbunden. Dafür wurde der KD-Baum vom Ast zur Wurzel aufgearbeitet und bei jeder Stufe bestimmt, welche Kinder miteinander verbunden werden sollen. Der Vorgang ist in Abbildung 3.8 zu sehen. Es wurden beispielsweise die grünen Quadrate über das Elternelement verbunden. Das resultierende Set von Quadraten wurde anschließend auch über das darüberliegende Elternelement mit einem

anderen Set verbunden. Zur Verbindung von zwei Elementen wurde der Normalenvektor von jeder Kante der beiden Elemente überprüft und die Kanten gesucht, die auch die kürzeste Entfernung zueinander haben. Sollten trotzdem mehrere Kantenpaare gefunden werden, kann das Resultat durch Verwendung eines Schwellenwertes für den Abstand zwischen den Mittelpunkten der Kantenpaare verbessert werden. [BL18]

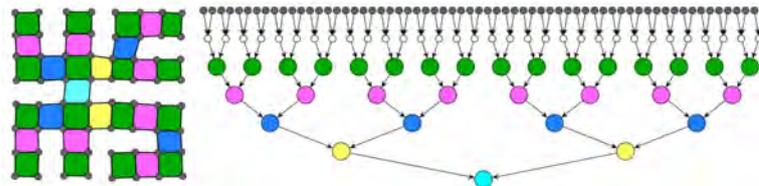


Abbildung 3.7: Ein farbkodiertes Beispiel für Geometrie auf der linken Seite und die entsprechende Baumstruktur auf der rechten Seite (Quelle: Bukenberger, Lensch. (2018) – Hierarchical Quad Meshing of 3D Scanned Surfaces)

Abschließend wurden die restlichen Lücken zwischen den verbundenen Sets gefüllt. Diese Struktur besteht aus Kacheln und ähnelte einem Labyrinth und zog sich durch die gesamte Punktwolke. Die fehlenden Quadrate wurden durch einen Algorithmus mit einer Prioritätswarteschlange eingefügt. Der Algorithmus schloss Lücken, die von drei miteinander verbundenen offenen Kanten aufgespannt sind. Die Warteschlange diente dazu, die best geformten Löcher zuerst zu bearbeiten. Zur Identifizierung von Sackgassen wurden alle offenen Kanten in Gruppen von jeweils drei benachbarten Kanten zugewiesen. Der Algorithmus filterte anschließend alle Gruppen heraus, die nicht verarbeitet werden sollten. Es sollten nur Kantengruppen verarbeitet werden, bei denen jede Kante von einem anderen Quadrat stammt. Die Warteschlange mit den Kantengruppen wurde Schritt für Schritt verarbeitet und die Fläche zwischen den Kanten gefüllt. [BL18]

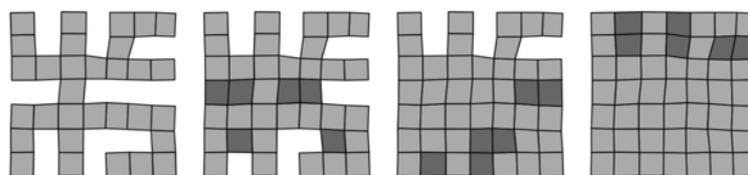


Abbildung 3.8: schematischer Ablauf der Lückenfüllung (Quelle: Bukenberger, Lensch. (2018) – Hierarchical Quad Meshing of 3D Scanned Surfaces)

Bukenberger und Lensch (2018) verwendeten in ihrer Arbeit zwei zusätzliche Techniken, um ihre Algorithmen zu verbessern. Zunächst die Ausrichtung der Flussrichtung des Meshes an die Objektform. Diese Technik sei eine wichtige Methode bei vielen Anwendungen, die ein Mesh in ein strukturiertes Mesh vereinheitlichen. Dafür verwendeten sie die Methode von Liu et al. (2009) [LR09]. Dabei wurde für jeden Knoten eine eindeutige Ausrichtung zu

einer Teilmenge der Punktwolke bestimmt. Bei der zweiten Technik handelte es sich um eine Meshoptimierung, die aus zwei Phasen besteht. Beim ersten Schritt wird eine Rektifizierung Operation angewandt, die vor der Verknüpfung der Quadrate im zweiten Schritt durchgeführt wird. Dabei wurden die Vertices der Quadrate um den ursprünglichen Schwerpunkt neu positioniert, indem die Diagonalen der Quadrate eingeebnet wurden. Beim zweiten Schritt handelte es sich um eine Glättung des Meshes nachdem der Algorithmus abgeschlossen war. [BL18]

Kapitel 4

Analyse der 3D-Scan-Verfahren

4.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden mehrere Verfahren auf ihre Tauglichkeit bezüglich der Rekonstruktion von Makrostrukturen überprüft. Zunächst werden Kriterien festgelegt, an denen die 3D-Scan-Verfahren überprüft werden. Daraufhin werden die verschiedenen Verfahren anhand von Spezifikation und wissenschaftlichen Arbeiten überprüft und eine Liste von Verfahren erstellt, die für die Rekonstruktion von Makrostrukturen geeignet sind.

Im nächsten Kapitel *Konzept* werden die verwendeten Verfahren vorgestellt, sowie das benutzte Equipment, welches für die Umsetzung gebraucht wird. Es wird sich um Verfahren handeln, die für die Rekonstruktion von Makrostrukturen geeignet sind. Anschließend erfolgt im Kapitel *Prototyp* eine praktische Umsetzung mit den ausgewählten Verfahren. Das bedeutet, dass ein Testobjekt erfasst und die Makrostruktur der Objektoberfläche auf einem strukturiertem und modellierten 3D-Modell rekonstruiert wird.

Die Auswahl von 3D-Scannern und deren zugrundeliegenden Technologien ist zahlreich. Alle haben das Ziel, die Oberfläche eines Objektes zu erfassen und eine dreidimensionale Repräsentation in Form einer Punktwolke zu erzeugen. Wie in Kapitel *Grundlagen* beschrieben, gibt es zwei Kategorien von Scannern. Alle Scanner-Verfahren erfassen die Oberfläche und können, je nach Verfahren, mehr oder weniger detailliert die Strukturen abtasten. Häufig werden aus den gescannten Punktwolken direkt detaillierte 3D-Modelle mithilfe von Verfahren zur Rekonstruktion 2.1.4 erzeugt. Diese Modelle sind sehr unstrukturiert und eignen sich ohne aufwendige Nachbearbeitung nicht für Anwendungen wie Animationen, Augmented und Virtual Reality oder Computerspiele [PDZR18].

4.2 Analyse

In diesem Abschnitt werden verschiedene 3D-Scan-Verfahren, bezogen auf die Erfassung und Rekonstruktion von Makrostrukturen, miteinander verglichen und auf Tauglichkeit geprüft. Zuerst werden die Eigenschaften bestimmt, die für die erfolgreiche Erfassung der Makro-

strukturen ausschlaggebend sind. Darauffolgend werden verschiedene Verfahren anhand der ausgewählten Kriterien untersucht.

4.2.1 Verfahren

Im Folgenden werden die gängigsten Verfahren analysiert. Ein Überblick über die zu analysierenden Verfahren ist in der folgenden Tabelle aufgelistet. Vertretend für die kontaktbasierten Verfahren werden die Koordinatenmessgeräte überprüft. Im Gegensatz zu den nichtkontaktbasierten Scan-Verfahren unterscheiden sich die Vorgehensweisen der kontaktbasierten Verfahren voneinander. Koordinatenmessgeräte sind laut Ebrahim (2015) eine der meistgenutzten, kontaktbasierten Geräte [Ebr15].

- Koordinatenmessgerät (kontaktbasiert)
- Laufzeitmessung
- Phasenverschiebung
- Lasertriangulation
- strukturiertes Licht
- Fotogrammetrie

4.2.2 Kriterien

Zunächst werden Eigenschaften für die Analyse ausgewählt. Mindestens diese Kriterien müssen erfüllt sein, damit ein 3D-Scan-Verfahren für die Erfassung und Rekonstruktion von Makrostrukturen tauglich ist. Anhand dieser Kriterien werden die verschiedenen Methoden im Abschnitt 4.2.3 überprüft.

Ein wichtiges Kriterium ist die Auflösung des Scanners. Die Auflösung gibt den kleinstmöglichen erfassbaren Abstand zwischen zwei nebeneinanderliegenden Punkten auf der Oberfläche des virtuellen 3D-Modells an [GSL⁺11]. Da sich Makrostrukturen im Millimeterbereich befinden, muss die Auflösung kleiner oder gleich einem Millimeter sein, damit alle Strukturen erfasst werden können.

Die zweite wichtige Eigenschaft ist die Genauigkeit des Scanners. Sie gibt die räumliche Präzision des 3D-Scanners an. Bei einer hohen Genauigkeit hat die erfasste Punktwolke nahezu die gleichen Ausmaße wie das reale Objekt [GSL⁺11]. Dies ist für die Erstellung der Displacement Map wichtig. Dafür müssen beide Objekte zueinander ausgerichtet werden, was erschwert wird, wenn der Scan andere Ausmaße hat. Bei diesem Attribut sollte die Abweichung weniger als einen Millimeter betragen.

Das dritte Merkmal ist die Erfassungsqualität bei glänzenden oder transluzenten Oberflächen. Damit 3D-Scan-Verfahren Makrostrukturen von allen Objekten ohne Probleme

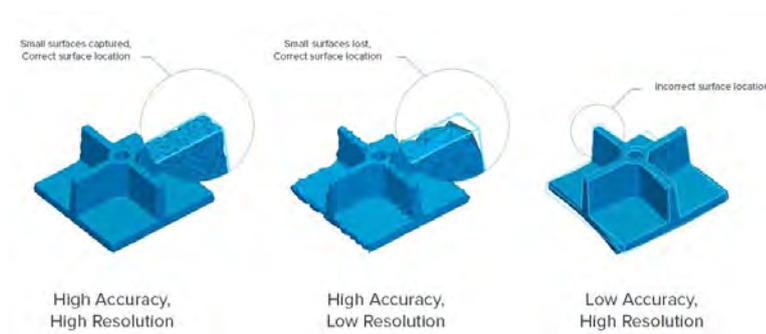


Abbildung 4.1: Auflösung und Genauigkeit der 3D-Scanner (Quelle: <https://formlabs.com/de/blog/auswahl-scanner-genauigkeit-volumen-budget/>; zuletzt angesehen am: 08.02.2022)

erfassen können, ist es erforderlich, dass auch glänzende oder transparente Oberflächen gescannt werden können. Es gibt Möglichkeiten, die Oberflächeneigenschaften eines Objekts durch Mittel zu entfernen, allerdings kann dies zu einem Informationsverlust führen.

Zusätzlich zu den drei ausgewählten Eigenschaften werden die 3D-Scan-Verfahren anhand des Preises verglichen. Kosten spielen in der Wirtschaft eine wichtige Rolle und die Preisspannen für die verschiedenen 3D-Scan-Verfahren sind breit gefächert.

Nachfolgend befindet sich eine kurze Auflistung aller Kriterien, die untersucht werden:

- Auflösung
- Verarbeitung von reflektierenden oder lichtdurchlässigen Objekten
- Genauigkeit
- (Kosten)

4.2.3 Analyse der Verfahren

Die Auflösung ist bei allen Scan-Verfahren sehr hoch. Viele Verfahren weisen eine Auflösung im Nanobereich auf, darunter fallen die kontaktbasierten Verfahren [ADS97] und die Lasertriangulation [SCS20]. Andere Verfahren, wie Scanner mit strukturiertem Licht und Scanner mit Phasenverschiebung [WLG⁺21], haben eine Auflösung im Mikrometerbereich, welche allerdings vom Abstand zum Objekt abhängt. So kann die Auflösung bei den strukturierten Scannern schon bei wenigen Metern im zweistelligen Millimeterbereich liegen [SCS20]. Auch Entfernungsmesser haben wegen ihres Aufbaus nur eine Auflösung im Mikrometerbereich [LCP⁺17]. Die Auflösung der Fotogrammetrie lässt sich nicht eindeutig bestimmen, da sie von der Qualität und Anzahl der aufgenommenen Fotos abhängt, allerdings wurden mithilfe von Fotogrammetrie Mikrostrukturen von Asphalt erfasst [MMWF13].

Lukas (2020) erklärte in seinem Buch *Das 3D-Scanner Praxisbuch*, dass Koordinatenmessgeräte nicht von Oberflächeneigenschaften beeinflusst werden, da die Oberfläche haptisch erfasst werden würde. [Luk20] Alle optischen Scan-Verfahren haben allerdings Probleme mit glänzenden, reflektierenden oder transparenten Oberflächen [Che08]. Damit sie trotzdem solche Oberflächen erfassen können, muss die Objektoberfläche durch Vorbereitung mattiert werden. Alternativ kann bei bestimmten Verfahren, wie der Fotogrammetrie, auch mit polarisierten Filtern gearbeitet werden [NNMR14]. Auch bei der Phasenverschiebung konnte Chen (2008) mit polarisierten Filtern transparente Oberflächen erfassen [Che08].

Auch die Genauigkeit ist für die verschiedenen Scan-Systeme kein Problem. Koordinatenmessgeräte haben eine Genauigkeit von wenigen Millimeter [FCW⁺10], genauso wie Geräte mit Laufzeitmessung [L⁺14]. Scanner mit Lasertriangulation haben eine Präzision im Mikrometerbereich [SCS20]. Bei der Phasenverschiebung hängt die Messgenauigkeit in der Regel durch Rauschen, die Ungenauigkeit der Quelle und des Sensors beeinflusst [CSL08]. Es konnten aber schon eine Genauigkeit im Nanobereich gemessen werden [SA15]. Die Genauigkeit von 3D-Scannern mit strukturiertem Licht hängt dagegen von mehreren Faktoren ab. Unter anderem von der optischen Qualität des Videoprojektors, der Qualität der Kamera, der Entfernung zum Objekt, dem Emitter-Sensor-Winkel und letztlich von den Reflexionseigenschaften des Objektes. Trotzdem kann damit eine Präzision von 0,3 Millimeter erreicht werden. [RCM⁺01] Bei der Fotogrammetrie hängt die Genauigkeit von vielen Faktoren, wie beispielsweise der Auflösung, Form, Größe des Ziels und des Objektivs ab. Trotzdem sind Genauigkeiten von 0,05 bis 0,5 Millimeter möglich. [Luh10]

Die Kosten für die verschiedenen 3D-Scan-Verfahren sind sehr unterschiedlich. Der Preis von Koordinatenmessgeräten liegt bei \$30.000 bis \$250.000¹. Eine Recherche im Internet ergab, dass Scanner mit Lasertriangulation zwischen 21.500 €² und 45.000 €³ liegen. 3D-Scanner mit strukturiertem Licht haben eine Preisspanne von 700 € bis 37.000 €⁴. Dagegen liegt der Preis für 3D-Scanner mit Laufzeitmessung bei \$31.500 bis \$150.000⁵ und bei 3D-Scannern mit Phasenverschiebung bei \$80.000 bis \$165.000⁶. Das günstigste 3D-Scan-Verfahren ist die Fotogrammetrie, da hier auch mit normalen Handykameras gute Ergebnisse erzielt werden können [El-19]. Spiegelreflexkameras gibt es schon ab ca. 300 €⁷ können aber auch 6.000 €

¹<https://www.inspectionxpert.com/blog/pros-and-costs-of-cmms>; zuletzt angesehen am 11.02.2022

²<https://3dscannertech.com/creaform-3d-laser-scanners/creaform-handyscan-3d-300>; zuletzt angesehen am 23.02.2022

³<http://www.3dcad-gmbh.de/3d-laserscan/laserscanner-kauf-miete/3d-laserscan-system-kaufen.html>; zuletzt gesehen am 23.02.2022

⁴<https://all3dp.com/1/best-3d-scanner-diy-handheld-app-software/>; zuletzt aufgerufen am: 07.02.2022

⁵<https://www.geoweeknews.com/news/time-of-flight-vs-phase-based-laser-scanners-right-tool-for-the-job>; zuletzt aufgerufen am : 13.02.2022

⁶<https://www.geoweeknews.com/news/time-of-flight-vs-phase-based-laser-scanners-right-tool-for-the-job>; zuletzt aufgerufen am : 13.02.2022

⁷<https://www.matthiashaltenhof.de/blog/spiegelreflexkamera-fuer-einsteiger/>; zuletzt an-

kosten⁸. Eine Übersicht kann sich in der Tabelle 4.2 angesehen werden.

4.3 Fazit

Die Erfassung und Rekonstruktion von Makrostrukturen benötigt ein akkurates und genaues Verfahren, da diese oft nur wenige Millimeter groß sind und originalgetreu dargestellt werden müssen, damit das resultierende Objekt realistisch aussieht.

Im letzten Abschnitt wurden die gängigsten Verfahren untersucht und anhand der ausgewählten Kriterien überprüft, ob sie für die Rekonstruktion von Makrostrukturen geeignet sind. Grundsätzlich weisen alle Verfahren die benötigte Genauigkeit und Auflösung auf, um die Strukturen zu erfassen. Eine Übersicht der Verfahren und der ausgewerteten Kriterien ist in Tabelle 4.1 zu sehen.

Verfahren	Auflösung	Genauigkeit	spiegelnde Oberflächen
Koordinatenmessgerät	Nanometer	Millimeter	ja
Lasertriangulation	Nanometer	Mikrometer	ja
Laufzeitmessung	Mikrometer	Millimeter	nein
Phasenverschiebung	Mikrometer	Nanobereich	nein
strukturiertes Licht	Mikrometer	Mikrometer	nein
Fotogrammetrie	Mikrometer	Mikrometer	nein

Tabelle 4.1: Auswertung der Verfahren anhand der festgelegten Kriterien

Alle Verfahren, mit Ausnahme der kontaktbasierten Verfahren, haben Probleme damit reflektierende und lichtdurchlässige Oberflächen zu erfassen. Auch die kontaktbasierten Verfahren sind nicht uneingeschränkt für die Erfassung und Rekonstruktion von Makrostrukturen geeignet, da organische und weiche Objekte durch den Abtastvorgang nicht erfasst werden können. Zusätzlich muss bedacht werden, dass weiche Objekte verformt oder sogar zerstört werden kann.

Bei der Fotogrammetrie ist für die Qualität der Erfassung entscheidend, dass hochwertige und zahlreiche Bilder des Objektes aufgenommen werden, damit die Algorithmen die Merkmale deutlich identifizieren und die Punkte daraus berechnen können.

Das günstigste 3D-Scan Verfahren ist die Fotogrammetrie, da dafür kann eine beliebige Kamera verwendet werden kann. Darauffolgend kommen 3D-Scanner mit strukturiertem Licht. Für die restlichen Verfahren steigt der Preis schnell und bezahlt zwischen 30.000 € - 250.000 € je nach Technik.

Abschließend muss erwähnt werden, dass sich die Leistung von Gerät zu Gerät stark unter-

gesehen am: 23.02.2022

⁸<https://www.better-digital-photo-tips.com/dslr-cost.html>; zuletzt angesehen am: 23.02.2022

4. ANALYSE DER 3D-SCAN-VERFAHREN

scheiden kann. Sicherlich werden nicht alle Geräte eines Verfahrens eine so hohe Auflösung oder Genauigkeit haben, dass sie die Voraussetzungen erfüllen.

Verfahren	Kosten
Koordinatenmessgerät	\$30.000 - \$250.000
Lasertriangulation	21.500 € - 45.000 €
Laufzeitmessung	\$31.500 - \$150.000
Phasenverschiebung	\$80.000 - \$165.000
Strukturiertem Licht	700 € - 37.000 €
Fotogrammetrie	ab 350 € - 6.000 €

Tabelle 4.2: Preisbereich für Geräte der einzelnen Verfahren

Kapitel 5

Konzept

5.1 Einleitung

Nachdem die gängigsten 3D-Scan-Verfahren im vorherigen Kapitel auf ihre Tauglichkeit in Bezug auf die Erfassung von Makrostrukturen untersucht wurden, wird in diesem Kapitel ein Konzept vorgestellt, welches im kommenden Kapitel *Prototyp* umgesetzt wird. Zunächst wird das Konzept und die Idee dahinter erläutert, anschließend wird das Testobjekt vorgestellt und das verwendete Equipment beschrieben.

5.2 Konzept und Idee

Das Konzept dieser Arbeit ist es, mithilfe von 3D-Scans die Makrostruktur eines realen Objektes auf einem strukturierten Objekt zu rekonstruieren. Der Grund dafür ist, dass eine händische Erzeugung solcher Strukturen, je nach Komplexität, sehr zeitaufwendig sein kann. Weiterhin ist es eine große Herausforderung, die Makrostrukturen realistisch zu konstruieren. Die Verwendung von 3D-Modellen aus den Scans alleine bringt nur bedingt einen Vorteil, da es durch das stark unstrukturierte Mesh nur schwierig weiterverarbeitet werden kann. Daher werden zunächst die Makrostrukturen der Objektoberfläche erfasst, auf eine Displacement Map extrahiert und anschließend auf ein strukturiertes Mesh angewendet.

Die Idee zur vorliegenden Bachelorarbeit ergab sich durch ein Projekt bei einem zuvor absolvierten Praktikum, bei welchem ein 3D-Video für Rasierer von der Firma Hans-Jürgen Müller GmbH & Co. KG zur besseren Darstellung für den Kunden entwickelt werden sollte. Für dieses Vorhaben war es von Bedeutung, die zur Verfügung gestellten Rasierer vollständig zu modellieren und anschließend zu animieren. Die Herausforderung des Projektes bestand darin, die sowohl aufwendigen als auch detailreichen Muster und Strukturen der Griffe realitätsnah darzustellen, was durch händisches Extrahieren und Nachmodellieren erreicht wurde. Infolgedessen wuchs die Idee, eine Extraktion der präzisen Oberflächenstruktur der Rasiergriffe mithilfe eines 3D-Scan-Verfahrens auszuführen und diese anschließend auf ein 3D-Modell zu projizieren. Die Umsetzbarkeit wird in diesem Kapitel mithilfe eines zur Verfügung gestellten Rasiergriffes überprüft und schriftlich festgehalten.

Der Griff eines Rasierers hat die prädestinierte Größe und Struktur für die Erfassung mit einem 3D-Scanner. Zusätzlich ist dieser ein typisches Beispiel für ein kommerzielles Produkt, bei dem die Makrostruktur der Oberfläche einen wichtigen Bestandteil der Produktwerbung ausmacht und somit mittels eines 3D-Modells realistisch reproduziert werden sollte. Durch die zylindrische Form des Rasiergriffes entsteht eine Herausforderung für die Rekonstruktion der Makrostrukturen, da der Designer exakt arbeiten muss, damit weder Lücken noch große Abstände innerhalb der Makrostrukturen entstehen. Wenn die Benutzung von Displacement Maps für die Strukturen in Betracht gezogen wird, kann es bei der manuellen Gestaltung durch die Zerlegung der UV-Map mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer sichtbaren Naht kommen. Auch bei der Vorgehensweise in dieser Arbeit erfordert die Zerlegung der UV-Maps, allerdings wird die dazugehörige Displacement Map durch einen Algorithmus automatisch generiert.

Das Endergebnis des Prototyps soll eine realistische 3D-Darstellung des Rasiergriffes mit Makrostrukturen sein, wobei das Hauptaugenmerk auf der passenden Rekonstruktion von Form und Größe der Makrostrukturen liegt und schließlich eine Kongruenz mit dem ursprünglichen Objekt aufweisen soll. Für den Hersteller ist es wichtig, dem Kunden einen detaillierten Eindruck des Produktes zu vermitteln, was für einen positiven Eindruck und im besten Fall zu einer erhöhten Kaufrate führt. Besonders in Bezug auf Rasiergriffe sind die optischen Details entscheidend, da sich viele Griffe durch eine identische Form auszeichnen und so nur einen geringen Kontrast zu anderen Modellen bieten. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass die Makrostrukturen einen wichtigen Aspekt des Designs eines Gegenstandes ausmachen und aufgrund dessen in einer attraktiven 3D-Repräsentation sowohl gründlich als auch lebendig visualisiert werden müssen.

5.3 Testobjekt

Bei dem ausgewählten Testobjekt handelt es sich um den Griff des Rasierers R89¹ in der Farbe Rosé von der Firma Hans-Jürgen Müller GmbH & Co. KG. Der Rasierer hat die Maße 42 mm x 94 mm (Abbildung 5.1) und besteht aus Metall, wobei der Griff ein Schraubgewinde besitzt, sodass der Kamm und der Deckel abgeschraubt werden können. Die Farben des Griffes sind Chrome und Roségold und das Muster zeichnet sich durch viele wellenförmige Linien aus. An dem unteren verchromten Teil ist der Firmenname "Mühle" in Großbuchstaben eingraviert.

Von der Firma Hans-Jürgen Müller GmbH & Co. KG wurde eine CAD-Datei mit dem 3D-Modell des Griffes ohne Strukturen zur Verfügung gestellt. Da das Modell allerdings aus einem dreieckigen Mesh besteht, wurde anhand der Vorlage ein 3D-Modell mit einem strukturierten Mesh nachmodelliert. Die niedrig aufgelöste Variante hat 15.362 Punkten, 30.720

¹<https://www.muehle-shaving.com/shop/TRADITIONAL-Rasierer/R-89-ROSEGOLD>; zuletzt angesehen am 05.08.2022

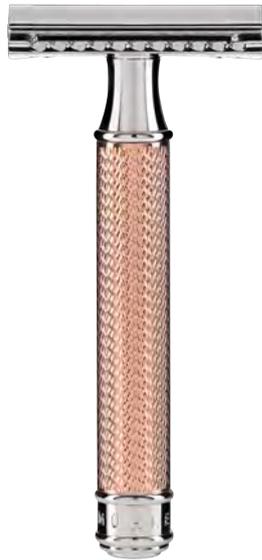
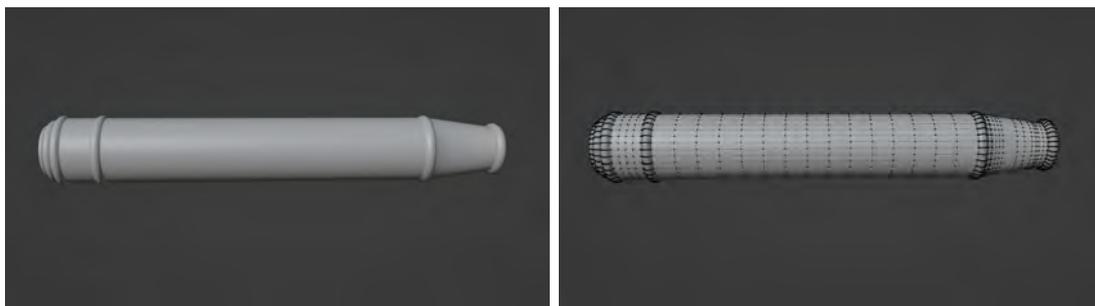


Abbildung 5.1: Rasierer R89 ROSEGOLD der Firma Hans-Jürgen Müller GmbH & Co. KG (Quelle: <https://www.muehle-shaving.com/shop/TRADITIONAL-Rasierer/R-89-ROSEGOLD>; Stand: 01.02.2022)

Kanten und 15.360 Flächen und besteht ausschließlich aus einem strukturiertem Mesh mit Vierecken.



(a) Model des Rasiergriffs

(b) Mesh des Rasiergriffs

Abbildung 5.2: Rasiergriff R-89 nachmodelliert

Bei der Rekonstruktion der Makrostrukturen des Rasierers treten mehrere Herausforderungen

auf. Die Strukturen sind sehr fein, die Dicke der Linien des Wellenmusters beträgt ca. 0,2 mm und die Oberfläche besitzt teilweise stärkere und schwächere reflektierende Eigenschaften. Zusätzlich ist es durch die zylindrische Form des Griffes schwierig, das Muster per Hand nachzubauen, ohne eine sichtbare Naht zu erzeugen.

5.4 Ablauf der Umsetzung

Der Ablauf der Prototypen für die Rekonstruktion von Makrostrukturen erfolgt in zwei Abschnitten. Die erste Phase beschäftigt sich mit der Aufnahme einer virtuellen 3D-Repräsentation des Rasiergriffes, wobei beide ausgewählten Verfahren das Objekt erfassen und unterschiedliche Tests durchlaufen. Einerseits wird überprüft, welche Einstellung von differenzierten Umgebungsbeleuchtungen zu einem verbesserten Ergebnis führen, andererseits zeigt der Einsatz von Kreide- und Scanspray eine zusätzliche Variable auf, welche im Ausgang der Verfahren einen womöglich qualitativen Unterschied aufweisen. Im zweiten Schritt wird sowohl durch die Verwendung eines gescannten als auch erstellten Modells eine Displacement Map der Oberfläche angefertigt, welche daraufhin auf das erstellte Modell reproduziert wird.

5.5 Auswahl der Scan-Methoden

5.5.1 3D-Scan Methoden

Es gibt mehrere 3D-Scan-Verfahren, mit denen Makrostrukturen von Objekten erfasst und rekonstruiert werden können. Im Kapitel 4 gibt es eine Analyse der gängigen Verfahren, die in Kapitel 2 erklärt werden. Für diesen Prototypen stehen aus Zeit- und Kostengründen nur ein 3D-Scanner mit strukturiertem Licht und das Fotogrammetrie-Verfahren zur Verfügung. Die beiden Verfahren nutzen unterschiedliche Techniken zur Erfassung der Objekte. Beide Verfahren sind kostengünstig und die Verwendung benötigt keine spezielle Einweisung durch einen Experten.

5.5.2 Scanner mit strukturiertem Licht

Für die Erfassung der Makrostruktur des Testobjekts wird der 3D-Scanner EinScan-SE² von der Marke Shining 3D verwendet. Dabei handelt es sich um ein Scanner-System, das mit strukturiertem Licht arbeitet. Laut Datenblatt hat er eine Kamera mit einer Auflösung von 1,3 Megapixel, eine Scan-Auflösung von 0,17 mm bis 0,2 mm und eine Genauigkeit von ca. 0,1 mm. Der Scanner kann Objekte im Maßstab von 30 × 30 × 30 mm bis 700 × 700 × 700 mm erfasst werden kann. Allerdings können auf dem mitgelieferten Drehteller nur Objekte bis 200 × 200 × 200 mm gescannt werden. Die Erfassung erfolgt über die mitgelieferte Software *EXScan S*³ Version 3.1.0.1 von Shining 3D.

Der Scanner ist so aufgebaut, dass sich auf der einen Seite ein festes Stativ, auf dem

²<https://www.einscan.com/desktop-3d-scanners-de/einscan-se/>; zuletzt angesehen am: 08.02.2022

³<https://www.einscan.com/software/exscan-pro/>; zuletzt angesehen am: 08.02.2022

das Erfassungssystem montiert ist, befindet, und auf der anderen Seite ein motorisierter Drehteller ist. Das Erfassungssystem besteht aus einem Projektor und zwei Kameras und ist per USB-Kabel mit einem Computer verbunden. In Abbildung 5.3 ist der Aufbau des Scanners zu sehen.



Abbildung 5.3: Aufbau von EinScan-SE von der Firma Shining 3D (Quelle: <https://www.einscan.com/desktop-3d-scanners-de/einscan-se/>; zuletzt angesehen am: 08.02.2022)

5.5.3 Fotogrammetrie

Die Aufnahmen werden mit einer Nikon D5300⁴ Spiegelreflexkamera gemacht. Die Kamera hat eine Auflösung von 24,2 Megapixel, ein CMOS-Sensor mit den Maßen von 23,5 mm × 15,6 mm und eine Auflösung von maximal 6.000 × 4.000 Pixel. Als Objektiv wird das AF-S NIKKOR 50 mm⁵ von der Firma Nikon verwendet. Dabei handelt es sich um ein Objektiv mit einer festen Brennweite von 50 mm und einer maximalen Blende von 1,8 Millimeter. Der Mindestabstand zum Objekt muss mindestens 45 Zentimeter betragen, damit es scharf auf dem Sensor abgebildet wird.

Für den Hintergrund der Aufnahmen wird ein hellgrünes Tuch verwendet, damit sich das Testobjekt gut vom selbigen abhebt. Das Objekt steht auf einer strukturierten Scheibe aus Kork, welche auf einem Drehsteller liegt. Die Korkscheibe wird verwendet, damit die Fotogrammetrie-Software ausreichend eindeutige Merkmale finden kann. Die Beleuchtung der Szene erfolgt durch eine diffuse Leuchte PLV-S192⁶ von der Marke RALENO ausgeleuchtet. Es hat die Maße 190 cm × 270 cm und kann Lichtfarben im Bereich von 3200K bis 5600K emittieren. Die Helligkeit der 192 LEDs kann stufenlos angepasst werden und hat eine Beleuchtungsstärke von 650 Lux auf einem Meter. Für eine neutrale Lichtstimmung wird die Farbtemperatur auf 5600K gestellt. Die Leuchte steht circa 80 Zentimeter von dem

⁴https://www.nikon.de/de_DE/product/discontinued/digital-cameras/2020/d5300; zuletzt angesehen am: 08.02.2022

⁵https://www.nikon.de/de_DE/product/nikkor-lenses/auto-focus-lenses/fx/single-focal-length/af-s-nikkor-50mm-f-1-8g; zuletzt angesehen am: 08.02.2022

⁶<https://www.ralenos.com/plv-s104>; zuletzt gesehen am 09.02.2022

zu erfassenden Objekte weg und muss für eine ausreichende Ausleuchtung auf 100 % eingestellt werden. Durch die Rotation des Griffs und nicht der Kamera, ist weniger Platz für die Aufnahmen notwendig und es ist einfacher, eine einheitliche Beleuchtung für die Aufnahmen zu erzielen.



Abbildung 5.4: Aufbau des Setups für die Aufnahmen des Rasierers

Für die Rekonstruktion des Objektes wird die Fotogrammetrie-Software Meshroom⁷ in der Version 2021.1.0 von der Firma AliceVision, mit der Software RealityCapture⁸ von der gleichnamigen Firma verglichen. Bei Meshroom handelt es sich um eine kostenlose Software zur 3D-Rekonstruktion. Bei RealityCapture dagegen fallen pro Projekt Kosten an, die durch die Anzahl und Auflösung der Bilder bestimmt wird.

5.6 Verwendete Hardware

Die Berechnungen der Fotogrammetrie-Software und die Erstellung des Prototyps erfolgen auf einem Laptop von der Marke MSI. Dabei handelt es sich bei dem Modell um den Leopard GP66⁹. Das System hat einen i7-10750H¹⁰ Prozessor von der Marke Intel mit sechs Kernen und einem Grundtakt von 2,6 GHz. Weiterhin hat der Laptop 16 GB Arbeitsspeicher und zwei SSDs. Als Betriebssystem wird Windows 10 Pro verwendet.

5.7 Kreide- und Scanspray

Da das Objekt eine reflektierende Oberfläche hat, ist zu erwarten, dass die Erfassung sowohl mit dem 3D-Scanner mit strukturiertem Licht als auch mit Fotogrammetrie sehr ungenau

⁷<https://alicevision.org/#meshroom>; zuletzt angesehen am: 08.02.2022

⁸<https://www.capturingreality.com/>; zuletzt angesehen am: 09.02.2022

⁹<https://de.msi.com/Laptop/GP66-Leopard-10UX/Specification>; zuletzt gesehen am 13.02.2022

¹⁰<https://ark.intel.com/content/www/de/de/ark/products/201837/intel-core-i710750h-processor-12m-cache-up-to-5-00-ghz.html>; zuletzt gesehen am 13.02.2022

oder überhaupt nicht möglich ist. Um das Objekt trotzdem erfassen zu können, wird es zunächst mit einem Kreide- oder Scanspray besprüht.

Das Kreidespray, welches für die Aufnahmen verwendet wird, stammt von der Firma R. v. Klier¹¹. Laut Hersteller bleiben Oberflächendetails bis zu 0,2 mm erhalten. Bei dem Scanspray handelt es sich dagegen um das Produkt AESUB blue¹² von der Firma Scanningspray Vertriebs GmbH. Dabei handelt es sich um ein verflüchtigendes Spray, das laut Hersteller eine Schichtdicke zwischen acht und 15 μm hat. Wie in den Abbildungen 5.5a und 5.5b zu sehen ist, unterscheiden sich die beiden Schichten nicht stark voneinander. Der Vorteil vom Scanspray ist, dass die Schicht fest auf dem Objekt haftet und sich nach ein paar Stunden von selbst auflöst, wohingegen das Kalkspray schnell verwischt und die Reinigung je nach Oberfläche sehr aufwändig sein kann.



(a) Kreidespray der Firma R. f. Klier

(b) AESUB blue

Abbildung 5.5: Mattierung des Griffs mit Kreide- und Scanspray

Das Besprühen der Sprays war auf der kleinen Oberfläche des Rasiergriffs schwierig. Wenn die Sprühdose beim Auftragen zu nah an den Griff gehalten wird, entstehen eine Lache des Sprays auf der Oberfläche. Zusätzlich war zu beachten, dass die Schicht an jeder Stelle ungefähr gleich dick aufgetragen war. Eine weitere Herausforderung bei beiden Sprays war, dass die aufgetragene Schicht nicht berührt werden durfte. Sowohl im nassen als auch im getrockneten Zustand hafteten die Sprays nicht stark an der Oberfläche, sodass schon bei leichter Berührung die Schicht abgetragen und somit ein ungleichmäßiges Ergebnis erzielt wurde.

¹¹<https://shop.rvklier.com/index.php?g=2&content=Selection&lang=de&id=101>; zuletzt angesehen am 08.02.2022

¹²<https://aesub.com/produkte/aesub-blue/>; zuletzt angesehen am 08.02.2022

Kapitel 6

Prototypen

6.1 Einleitung

6.2 Erfassung des Testobjektes mit einem strukturiertem Scanner

6.2.1 Konfiguration des Scanners

Bevor der Scanner betriebsbereit ist, muss für automatische Scans auf dem Drehteller eine Kalibrierung durchgeführt werden. Dafür werden die Kameras mittels Kalibrierung-Scheibe, die auf drei verschiedene Positionen auf dem Drehteller gestellt wird (Abbildung 6.1) ausgerichtet. Die Kalibrierung sorgt dafür, dass die auf dem motorisierten Drehteller erfassten Daten zueinander ausgerichtet werden. Des Weiteren wird mithilfe eines weißen Blattes ein Weißabgleich durchgeführt, damit die Kamera die Textur mit den richtigen Farben erfassen kann.

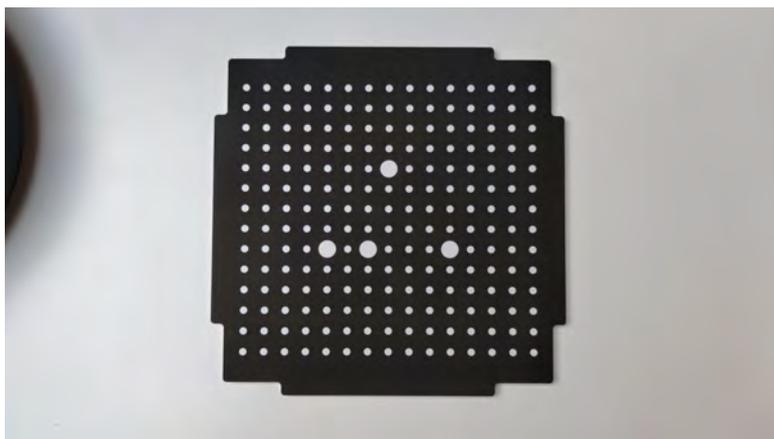


Abbildung 6.1: Kalibrierung-Scheibe des Scanners EinScan-SE

Die Konfigurationsmöglichkeiten des EinScan-SE sind gering. Beim Start der Software kann ausgewählt werden, ob der Scan mit oder ohne Erfassung der Textur stattfinden soll. Daraufhin erfolgt die Konfiguration des Durchlaufs. Es kann eingestellt werden, ob Hochkontrastbild (HDRI) Aufnahmen gemacht werden und ob der Scan auf dem Drehteller stattfinden soll. Des Weiteren kann die Ausrichtung der Scans und die Anzahl der Stopps (die Auswahl ist auf acht bis 36 begrenzt) festgelegt werden. Zusätzlich kann die Lichtverstärkung der Kamera an das Objekt und die Szene angepasst werden. Der Scanner bietet zusätzlich zur Ausrichtung am Drehteller eine automatische Ausrichtung an, bei der das Objekt von mehreren Perspektiven erfasst wird.

6.2.2 Erfassung des Testobjektes

Testaufnahmen

Im ersten Durchlauf wurde der Griff ohne Anpassung der Oberfläche und mit Umgebungslicht eingescannt. Direkt nach dem ersten Abschnitt ist zu erkennen, dass die reflektierende Oberfläche des Rasiergriffs nicht detailliert abgebildet werden kann. Das Resultat der einfachen Bilder ohne HDR und 16 Stopps ist in Abbildung 6.2 zu sehen. Der Scan weist große Lücken auf und die Form ist keineswegs zu erkennen. Es konnten lediglich 7.609 Punkte erfasst werden. Bei zwei weiteren Durchläufen wurden durchschnittlich ungefähr 10.000 Punkte erfasst. Die drei Durchläufe dauerten zwischen 6:17 und 6:20 Minuten. Weitere Tests wurden mit deaktivierten HDR-Einstellung gemacht. Dabei konnte kein einziger Punkt erfasst werden. Auch die Verwendung der automatischen Ausrichtung an dem Objekt schlug fehl.

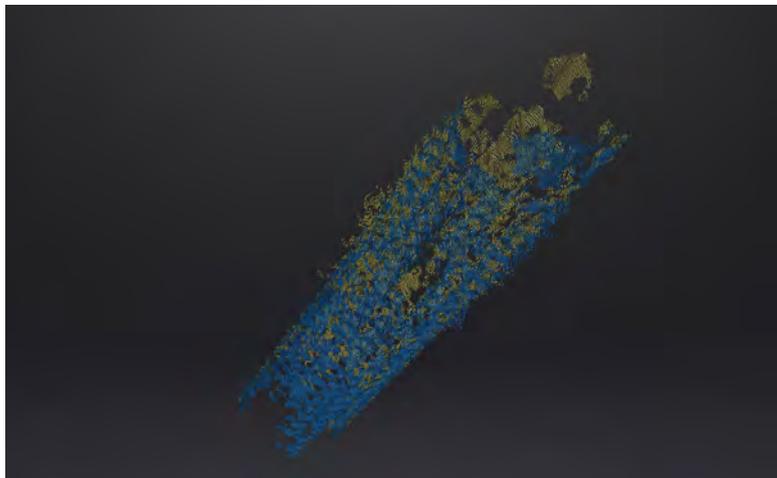


Abbildung 6.2: Erfassung des Griffes ohne Anpassungen mit 3D-Scanner EinScan-SE

Der zweite Testdurchlauf erfolgte ohne externe Lichteinflüsse. Das Ergebnis der einfachen Bilder ohne HDR war dasselbe wie im ersten Versuch, es konnten keine Punkte erfasst werden. Auch die automatische Ausrichtung schlug wieder fehl. Die Anzahl der erfassten

Punkte lag bei den drei Durchläufen bei ungefähr 15.500 Punkten und dauerten zwischen 6:18 und 6:20 Minuten.

Testaufnahmen mit Kreide- und Scanspray

Für die nächste Testreihe wurde der Griff mit Kreidespray besprüht und mit dem 3D-Scanner erfasst. Bei den Aufnahmen mit automatischer Ausrichtung konnte sowohl bei Umgebungslicht, als auch in Dunkelheit kein Ergebnis erzielt werden. Bei allen anderen Durchläufen ohne automatische Ausrichtung konnte das Objekt komplett erfasst werden. Die Ergebnisse mit Hochkontrastbild und Umgebungsbeleuchtung hatten im Durchschnitt 379.781 Punkte und dauerten zwischen 6:16 und 6:20 Minuten. Bei Dunkelheit wurden 365.518 Punkte erfasst und die Durchläufe dauerten zwischen 6:17 und 6:19 Minuten. Alle Ergebnisse mit Hochkontrastbild wiesen Artefakte auf, die in Abbildung 6.3 zu sehen sind. Die Tests mit den Bildern ohne HDR-Einstellung Bilder hatten keine Artefakte. Bei Helligkeit dauerte der Durchgang zwischen 3:03 und 3:07 Minuten und es wurden im Durchschnitt 365.348 Punkte erfasst. Das Ergebnis ohne Umgebungsbeleuchtung fiel ähnlich aus, mit 365.518 Punkten bei 2:59 bis 3:00 Minuten.



Abbildung 6.3: Artefakte bei der Erfassung mit Hochkontrastbild

In der abschließenden Testreihe wurde die Oberfläche des Griffs gründlich gereinigt, getrocknet und anschließend mit Scanspray besprüht. Zuerst erfolgten die Objekterfassung mit automatischer Ausrichtung. Wurden kein Hochkontrastbild verwendet, schlug die Ausrichtung fehl. Mit Hochkontrastbild waren jeweils zwei von drei Ausrichtungen erfolgreich, wovon jeweils eine Ausrichtung fehlerhaft war und dadurch die Scans zueinander versetzt waren, was in Abbildung 6.4 zu sehen ist. Bei aktivem Umgebungslicht wurden, bei den erfolgreichen Durchläufen, im Durchschnitt 493.918 Punkte bei einer Dauer von 8:03 bis 8:11 Minuten erzielt. Bei Dunkelheit waren es bei den zwei erfolgreichen Tests dagegen durchschnittlich 497.784 Punkte im Zeitrahmen von 8:11 und 8:13 Minuten. Die abschließenden Scans bei normaler Ausrichtung und ohne Verwendung der HDR-Einstellung waren ohne

Fehler. Die Aufnahmen bei Helligkeit dauerten alle 3:00 Minuten und es wurden im Mittel 381.398 Punkte erfasst. Bei Dunkelheit dauerten die Scans zwischen 2:59 und 3:00 Minuten und im Durchschnitt waren es 319.748 Punkte.

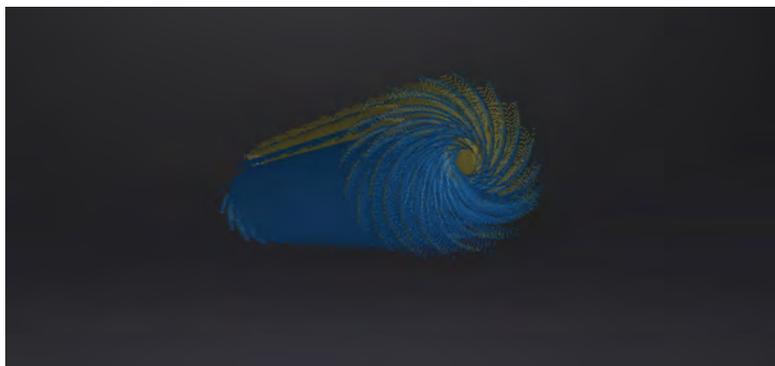


Abbildung 6.4: fehlerhafte Aufnahme durch falsche Ausrichtung

Versuch	\varnothing Tageslicht	\varnothing Dunkelheit
ohne Anpassung (mit HDR)	9.344	15.786
ohne Anpassung (ohne HDR)	0	0
Kreidespray (mit HDR)	379.781	365.518
Kreidespray (ohne HDR)	365.348	365.518
AESUB blue (mit HDR)	493.918	497.784
AESUB blue (ohne HDR)	381.398	319.748

Tabelle 6.1: Durchschnittlich erfasste Punkte

Finale Aufnahmen und Erzeugung des Meshes

Da es nicht möglich war, den Griff ohne Kreide- oder Scanspray zu erfassen, wurden keine hochauflösenden Scans erstellt. Sowohl bei den Aufnahmen mit dem Kreide-, als auch dem Scanspray wurde die Anzahl der Stopps auf den höchsten Wert gestellt. Dadurch wurde die Anzahl der Abtastungen mehr als verdoppelt, um eine hochauflösende Punktwolke zu erhalten. Die Aufnahmen erfolgten ohne HDR und in Dunkelheit. Nachdem der Scan abgeschlossen war, wurde in der Software eine globale Optimierung durchgeführt. Erst danach war es möglich, ein Mesh aus der Punktwolke zu erzeugen. Es konnte gewählt werden, ob das Mesh offen oder geschlossen sein und viele, mittlere oder wenige Details haben sollte. Die Auswahl fiel auf ein geschlossenes Mesh mit vielen Details. Anschließend wurde noch Algorithmen zur Schärfung der Kanten und zur Glättung der Oberfläche bei dem Polygonnetz angewandt, damit der Firmenname unten am Griff deutlicher zu sehen ist und die Struktur glatter wird. Das Programm hat daraufhin automatisch das Mesh erzeugt, was abschließend in einer STL-Datei abgespeichert wurde. Es wurde ein geschlossenes Mesh gewählt, da für die spätere Erzeugung der Displacement Map notwendig ist.

Die Ergebnisse der Scans sind in Abbildung 6.14a und in Abbildung 6.14b zu sehen. Durch die Verwendung des Kreidesprays, konnte der 3D-Scanner 838.615 Punkte in 817,850 Dreiecken. Nach Abschluss der Optimierungen besteht das fertige Mesh aus 2.499.966 Dreiecken. Der Schriftzug "MÜHLE" ist gut zu erkennen, allerdings ist die Wellenstruktur fast nicht vorhanden. Lediglich eine leichte Struktur ist sichtbar. Bei den Aufnahmen mit dem Scanspray sieht das Ergebnis sehr ähnlich aus. Es wurden 848.954 Punkte erfasst und auch hier ist der Markenname gut zu erkennen. Nach Beendigung der Optimierungsprozesse besteht das Mesh aus 2.499.996 Dreiecken. Im Vergleich ist das Ergebnis des Kreidesprays etwas gleichmäßiger und hat weniger Unebenheiten als das Resultat des Scansprays.



(a) Ergebnis des Objektes mit Kreidespray

(b) Ergebnis des Objektes mit Scanspray

Abbildung 6.5: Ergebnisse des 3D-Scanners mit strukturiertem Licht

6.3 Erfassung des Testobjektes mit Fotogrammetrie

6.3.1 Vorbereitungen

Die Qualität der Fotos ist ein sehr wichtiger Aspekt der Fotogrammetrie. Bilder mit schlechter Qualität können nicht zugeordnet werden oder können das Resultats sogar verfälschen. Auf folgende Aspekte muss geachtet werden:

- scharfe Fotos aufnehmen
- Bildausschnitt richtig auswählen
- Objekt darf während der Aufnahmen nicht bewegt werden
- viele Fotos von verschiedenen Perspektiven
- Belichtung sollte bei allen Fotos einheitlich sein

Für die Aufnahmen der Fotos wurden die Ratschläge von Autodesk¹ so gut wie möglich angewendet. Autodesk bietet eine kostenpflichtige Software namens ReCap Photo² an, durch

¹<https://knowledge.autodesk.com/de/support/recap/learn-explore/caas/simplecontent/content/building-E2-80-94data-preparation-E2-80-94taking-the-right-pictures-for-good-photogrammetry.html>; zuletzt angesehen am: 02.02.2022

²<https://www.autodesk.de/products/recap/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>; zuletzt angesehen am: 02.02.2022

deren Hilfe, unter Verwendung von Fotogrammetrie, 3D-Repräsentationen erstellt werden können.

Damit die Fotogrammetrie-Software genug Merkmale in den Bildern finden kann, ist es sehr wichtig, dass alle Details auf den Bildern scharf abgebildet sind. Aus dem gleichen Grund darf das Objekt während der Aufnahmen nicht bewegt werden und es sollten sehr viele Fotos aus verschiedenen Perspektiven aufgenommen werden. Anhand der Merkmale kann die Software die Position der Kamera bestimmen. Sollte das Objekt bewegt werden, können viele dieser Merkmale auf mehreren Aufnahmen nicht mehr gefunden werden und das Foto ist für die Software unbrauchbar.

Zunächst erfolgte die Erfassung der reflektierenden Oberfläche des Rasiergriffs. Das Objekt wurde auf den Drehteller gestellt, auf dem sich eine Korkscheibe befand. Die Position der Kamera betrug den Mindestabstand von 45 cm zum Objekt. Die Kamera wurde auf einem kleinen Dreibein montiert. Für die manuelle Konfiguration von allen Belichtungsparametern wurde die Kamera in den Modus "manuelle Belichtungssteuerung" gestellt. Der ISO-Wert der Kamera wurde auf 200, die Belichtungszeit auf 1/30 und die Blende auf f8 eingestellt. Der Grund für diese Konfiguration ist, dass es bei dem vorhandenen Lichtsetup gute Ergebnisse erzielt, ohne zu dunkel zu werden. Der Hauptfokus war ein niedriger ISO-Wert, um das Bildrauschen so gering wie möglich zu halten. Die Blendenzahl war daraufhin der zweite wichtige Faktor. Für die Aufnahmen soll eine möglichst große Tiefenschärfe in den Bildern erzeugt werden, was mit der Blendenzahl eingestellt werden kann. Die Auswahl der Belichtungszeit erfolgt durch Testaufnahmen. Der Fokus dabei war, die Belichtungszeit so niedrig wie möglich zu stellen, ohne dabei Bildinformationen zu verlieren. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass die Aufnahmen nicht verwackelten, wenn der Auslöser gedrückt wurde. Das Resultat der Einstellungen können in der Abbildung 6.10 betrachtet werden. Zwar erzeugte die Kamera schwach beleuchtete Bilder, trotzdem waren alle Informationen gut erkennbar. Die Qualität der Bilder wurde auf RAW gestellt und die Bildgröße auf 6000 x 4000 Pixel.

6.3.2 Testaufnahmen

In mehreren Versuchsreihen wurde der Rasiergriff jeweils ohne Vorbereitung, mit Kreide- oder Scanspray besprüht. Bei den Tests sollte festgestellt werden, ob wenige Bilder ausreichen, um ein vernünftiges Ergebnis zu erzielen. Dafür wurden jeweils 180 Aufnahmen gemacht und diese anschließend in RealityCapture und Meshroom importiert und verarbeitet. Die Aufnahmen wurden jeweils Bilder in drei verschiedenen Winkeln aufgenommen, wobei sich die Höhenposition der Kamera veränderte. Die Aufnahmen erfolgt in eine Höhe von 16, 18 und 24 Zentimeter. Bei der Wahl der Positionen war es wichtig, dass die Struktur der Scheibe aus Kork und die Makrostruktur des Griffes gut und scharf erkennbar war. Dadurch war es nicht möglich, Aufnahmen in einem stumpfen Winkel zu machen. In jeder Position wurden 60 Aufnahmen gemacht. Durch Verwendung von Markierungen auf der Seite des Drehtellers konnten gleichmäßige Aufnahmen des Griffes gemacht werden.



Abbildung 6.6: Aufnahme mit der Spiegelreflexkamera

6.3.3 Verarbeitung mit Meshroom

Einstellungen

Nachdem Meshroom geöffnet wurde, wurden die Bilder entweder per Drag-and-Drop oder per Explorer in das Projekt eingefügt. Die Anwendung Meshroom durchläuft zur Erstellung von virtuellen 3D-Repräsentationen mehrere Schritte. Der Schritt zur Erkennung der Features läuft standardmäßig über die CPU. Durch Entfernen des Haken "Force CPU Extraction" bei dem Knoten "FeatureExtraction" erfolgte die Bearbeitung über GPU und damit eine schnelle Durchführung des Knotens. Weiterhin wurde bei dem Knoten "FeatureExtraction" sowohl die Option "Descriptor Density" als auch die Option "Descriptor Quality" auf den Wert "hoch" gestellt. Zusätzlich wird also "Descriptor Type" der Eintrag "akaze" ausgewählt. Laut dem Handbuch von Meshroom³ kann mit diesen Einstellungen gute Resultate erzielt werden.

Ergebnisse in Meshroom

Die Verarbeitung der 180 Bilder des reflektierenden Griffes dauerte 359:44 Minuten und dabei konnten 291.036 Punkte erfasst werden. Ein Screenshot des Ergebnisses (Abbildung 6.8a) zeigt, dass viele Punkte, die in der Luft schweben und weder zum Rasierer noch zu der darunter liegenden Korkscheibe gehören, aufgenommen wurden. Die Ergebnisse mit Kreide- und Scanspray weisen weniger dieser fehlerhaften Punkte auf. Die Erstellung des in Abbildung 6.8b zu sehenden Ergebnisses mit Kreidespray hat 396:24 Minuten gedauert und es wurden 386.423 Punkte ermittelt. Die Verarbeitung der 180 Bilder mit Scanspray (Abbildung 6.8c) dauerte 355:07 Minuten und es wurde 280.410 Punkte erfasst.

³<https://readthedocs.org/projects/meshroom-manual/downloads/pdf/latest/>; zuletzt angesehen am: 13.02.2022

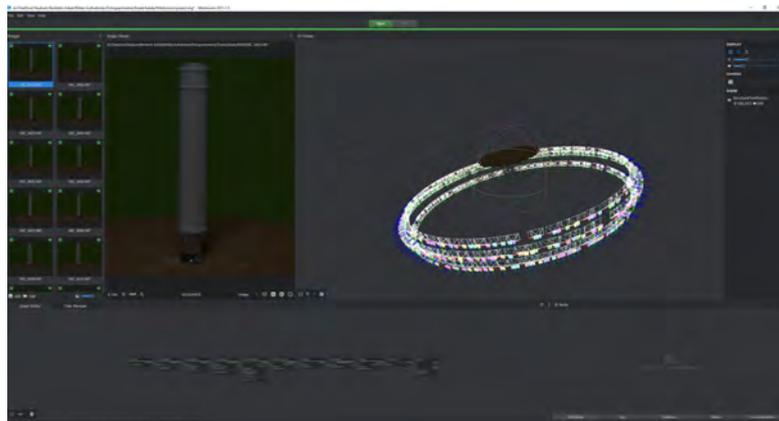


Abbildung 6.7: Aufbau Meshroom



(a) Ergebnis des Objektes (b) Ergebnis mit Kreidespray (c) Ergebnis mit Scanspray

Abbildung 6.8: Ergebnisse in Meshroom

Nach Abschluss der Durchläufe erzeugt Meshroom ein Mesh der erfassten Punktwolke. Allerdings hat Meshroom ein Problem mit diesem Objekt und erzeugt sowohl beim Kreidespray als auch beim Scanspray ein undefinierbares Mesh (Abbildung 6.9). Auch öfteren Tests mit verschiedenen Einstellungen der Knoten und einer langen Recherche im Internet konnte keine Lösung für das Problem in Meshroom gefunden werden. Da allerdings die Punktwolke größtenteils richtig war, kam die Idee das Mesh in einer externen Software zu rekonstruieren.

Rekonstruktion des Mesh mit Meshlab

Da die Rekonstruktion des Meshes aus der Punktwolke in Meshroom fehlschlägt, wurde das Mesh mit einer zusätzlichen Software rekonstruiert. Der Grund für die fehlerhafte Rekonstruktion liegt unter anderem daran, dass Meshroom. Bei der Software handelt es sich um MeshLab⁴ in der Version 2021.10. Dabei handelt es sich um eine kostenlose Software zur Verarbeitung von Meshes.

Zunächst musste die Punktwolke aus Meshroom exportiert werden. Dafür wurde ein weiterer Knoten mit dem Namen "ConvertSfMFormat" hinter den Knoten "StructureFromMotion" in Meshroom gesetzt und verbunden werden. Als Ausgabedatei wurde das Wavefront OBJ

⁴<https://www.meshlab.net/>; zuletzt aufgerufen am: 14.02.2022

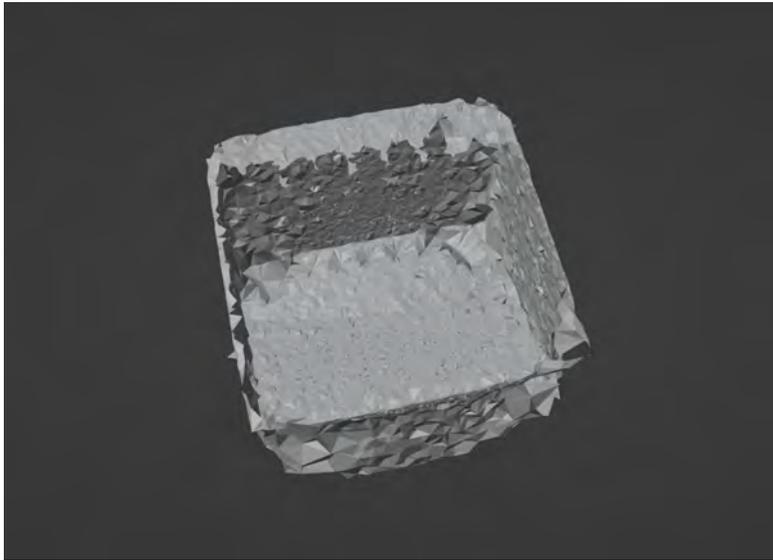


Abbildung 6.9: fehlerhafte Rekonstruktion durch Meshroom

Dateiformat und zusätzlich bei "Describer Type" der Harken bei "akaze" gesetzt. Nachdem die Bearbeitung beendet war, erfolgte der Import in Meshlab.

Die Rekonstruktion basiert auf der Anleitung des YouTube-Kanals KiriEngineofficial⁵. Nach Import der Punktwolke in Meshlab, erfolgte die Bereinigung von fehlerhaften Punkten. Die inkorrekten Punkte wurde in Abschnitten mit einem Auswahl-Werkzeug ausgewählt und anschließend entfernt. Anschließend erfolgte die Berechnung der Normalenvektoren für jeden Punkt, zum Schluss wurde das Mesh rekonstruiert. Die Einstellungen wurden auf dem Standard belassen, da bei Tests mit verschiedenen Einstellungen kein besseres Ergebnis erzielt werden konnte.

6.3.4 Verarbeitung mit RealityCapture

Ablauf

Die Erstellung einer 3D-Repräsentation in RealityCapture besteht aus zwei Phasen. Zuerst die Ausrichtung der importierten Bilder mit anschließender 3D-Repräsentation als Punktwolke. Im zweiten Schritt wird aus der Punktwolke dann das Mesh rekonstruiert. Die Einstellungen für die Ausrichtung bieten die Möglichkeit, die maximale Anzahl von Features pro Megapixel und pro Bild auszuwählen. Zusätzlich dazu kann in drei Stufen festgelegt werden, wie groß die Überlappung der Bilder sein wird. Nachdem die Ausrichtung abgeschlossen ist, kann für die weiteren Verarbeitungsschritte eine sogenannte "Rekonstruktionsregion" festgelegt werden. Dabei handelt es sich um einen skalierbaren Würfel, der um den zu bearbeitenden Bereich gelegt wird. Alle weiteren Prozesse verarbeiten anschließend nur noch diesen Bereich.

⁵<https://www.youtube.com/watch?v=cM8fhKYgqXc>; zuletzt angesehen am 15.02.2022

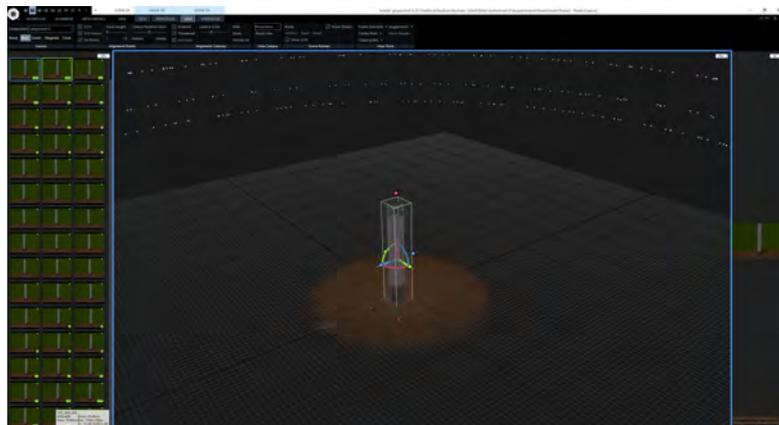


Abbildung 6.10: Aufbau RealityCaputre

Bei der Rekonstruktion des Meshes kann ausgesucht werden, ob das Objekt einen normalen oder einen hohen Detailgrad haben soll. Wie sich gezeigt hat, benötigt die Software für die Rekonstruktion mit vielen Details exorbitant viel Arbeitsspeicher. Bei mehreren Anläufen ist der Computer eingefroren und musste neu gestartet werden. Dadurch konnte keine 3D-Repräsentation mit einem hohen Detailgrad erstellt werden. Testweise wurde nur ein Abschnitt des Modells verarbeitet, was in Abbildung 6.11 zu sehen ist. Die Erstellung dieser Region hat 182:32 Minuten gedauert.

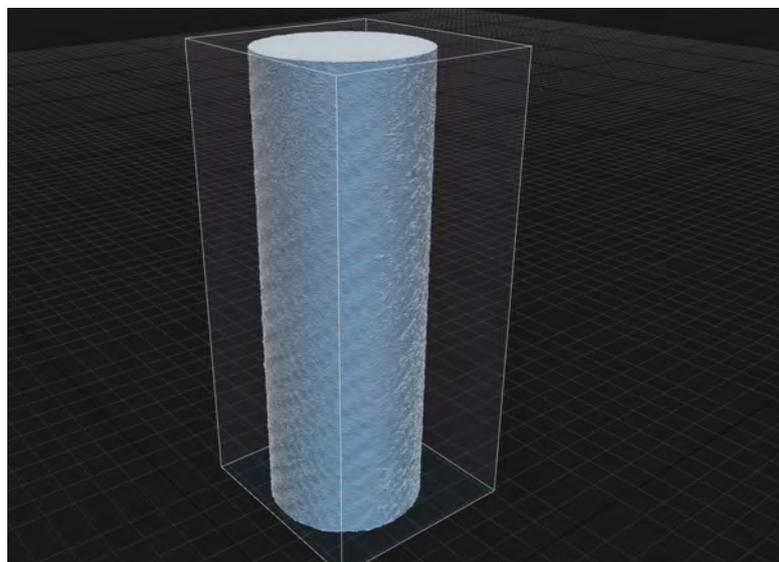


Abbildung 6.11: Ergebnis in RealityCapture mit einem hohen Detailgrad

Auch eine Veränderung der Einstellung für die Ausrichtung und der Rekonstruktion haben

außer einer Verlängerung der Bearbeitungszeit keine wesentlich Verbesserungen gebracht, weshalb die Einstellung auf dem Standard gelassen wurden.

Ergebnisse

Die Ausrichtung der Bildsets erfolgte in RealityCapture. Die Bearbeitungszeit für die 180 Bilder des reflektierenden Griffes ohne vorherige Bearbeitung betrug 2:30 Minuten, mit Kreidespray 2:35 Minuten und mit Scanspray 3:09 Minuten. Die Rekonstruktion des Rasiergriffs mit einem normalen Detailgrad dauerte anschließend nochmal 8:12 Minuten, 13:25 Minuten und 14:13 Minuten. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 6.12 zu sehen. RealityCapture dagegen bietet keine Möglichkeit, sich die Anzahl der Punkte in der Punktwolke anzuzeigen.



(a) Ergebnis des Objektes (b) Ergebnis mit Kreidespray (c) Ergebnis mit Scanspray

Abbildung 6.12: Ergebnisse in RealityCapture

6.3.5 Vergleich der Software

RealityCapture hat eine aufgeräumte Benutzeroberfläche, die es sehr einfach macht, mit wenigen Klicks erste, gute Ergebnisse zu erzielen. Durch das Auswahlwerkzeug nach der Ausrichtung konzentriert sich der Prozess der Rekonstruktion nur auf diesen Bereich und lässt unwesentliche Teile oder Fehler weg.

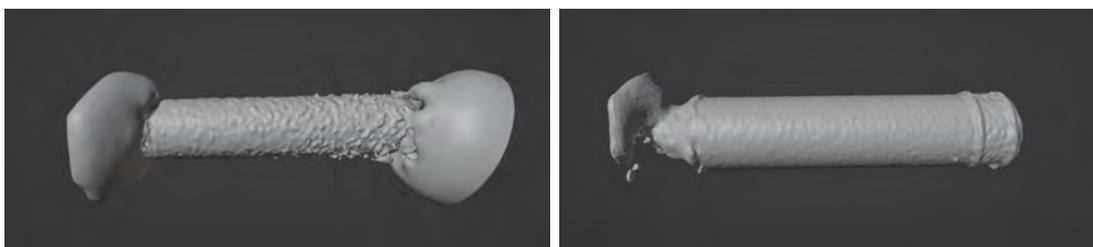
Auch Meshroom hat eine unkomplizierte Benutzeroberfläche. Der Fortschritt wird gut dargestellt und der Computer ist auch nutzbar, wenn die Verarbeitung läuft, was bei RealityCapture nicht der Fall ist. Wenn die Software läuft, wird der PC sehr träge und ist komplett ausgelastet. Bei Meshroom gibt es sehr viele Einstellungsmöglichkeiten, die größtenteils nicht erklärt werden und für erfahrene Benutzer gedacht sind.

In Bezug auf die Geschwindigkeit ist RealityCapture sowohl bei der Ausrichtung als auch bei der finalen Rekonstruktion deutlich schneller als Meshroom.

6.3.6 Finale Aufnahmen und Erzeugung des Meshes

Für die finalen Aufnahmen wurden 600 Bilder des Griffes mit Kreide- und Scanspray in den

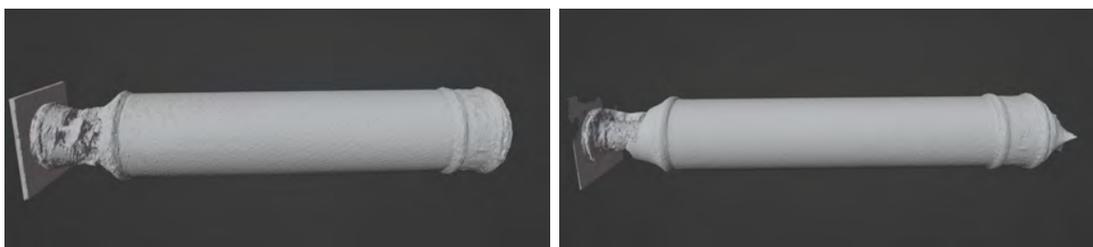
drei Positionen aufgenommen. Grundsätzlich gibt es kein Limit bei der Anzahl von verwendeten Bildern, allerdings dauerte die Verarbeitung pro Bilderserie mit Meshroom ungefähr 16 Stunden. Die Ergebnisse können den Abbildungen 6.13 und 6.14 betrachtet werden.



(a) Ergebnis mit Kreidespray

(b) Ergebnis mit Scanspray

Abbildung 6.13: finale Ergebnisse in Meshroom



(a) Ergebnis mit Kreidespray

(b) Ergebnis mit Scanspray

Abbildung 6.14: finale Ergebnisse in RealityCapture

6.4 Erstellung der Displacement Map

Durch ein Höhenbild, auch Displacement Map genannt, kann die Geometrie des Objektes beeinflusst werden. Dadurch ist es möglich, Vertiefungen wie beispielsweise Makrostrukturen zu erzeugen. Damit ist es möglich, ein Objekt oder eine Szene relativ einfach realistischer darzustellen, ohne das Objekt aufwendig anpassen zu müssen.

6.4.1 Verwendete Software

Für die Erstellung der Displacement Map aus dem hochwertigen Modell wurden die Anwendungen Blender⁶ in der Version 3.0.0 und xNormal⁷ in der Version 3.19.3.39669 verwendet. Bei Blender handelt es sich um eine kostenlose 3D-Grafiksuite, in der die komplette 3D-Pipeline, von der Modellierung bis zur Komposition, umgesetzt werden kann. Bei xNormal handelt es sich ebenfalls um eine freie Software, mit deren Hilfe verschiedene Texturen „gebacken“ werden können.

⁶<https://www.blender.org/>; zuletzt angesehen am: 10.02.2022

⁷<https://xnormal.net/>; zuletzt angesehen am: 10.02.2022

6.4.2 Ausrichtung

Zur Erstellung einer Displacement Map müssen die beiden Modelle zueinander ausgerichtet werden. Dies ist nötig, damit die Software xNormal die Displacement Map erzeugen kann. Die Ausrichtung erfolgt in einer neuen Szene der 3D-Software Blender. Die Standardkamera und das Standardlicht wurden entfernt. Da das erfasste Modell nach Import nicht im Nullpunkt der Szene lag, wurde es durch den Befehl "Geometry to Origin" in den Ursprung verschoben. Die ausgerichteten Modelle sind in Abbildung 6.15a zu sehen. Der modellierte Griff hatte nach dem Import 15.562 Vertices. Um eine genauere Beziehung zwischen den Vertices des erfassten Modells und dem modellierten Rasiergriff zu ermöglichen, wurden die Anzahl der Vertices des erstellten Rasiergriff erhöht. Der Grund dafür ist, dass eine höhere Anzahl eine genauere Beziehung zwischen den Vertices des gescannten und des erfassten Modells ermöglicht. Die Anzahl wurde durch den Modifikator „Unterteilung“ auf 245.762 erhöht. Darauffolgend wurde für das erstellte Modell eine UV-Map erzeugt und aufgeschnitten. Die Schnitte wurden möglichst so platziert, dass die Makrostrukturen nicht aufgeteilt wurden. Allerdings muss der Griff aufgrund seiner zylindrischen Form vertikal aufgeschnitten werden. Die UV-Map ist in Abbildung 6.15b zu sehen. Beide Modelle wurden anschließend zueinander ausgerichtet und das erfasste Modell skaliert. Die Transformation, Skalierung und Rotation von beiden Objekten wurde als Standardwert gesetzt. Schließlich wurden beide Modelle separat exportiert, wobei bei dem erstellten Modell die UV-Map mit exportiert wurde.

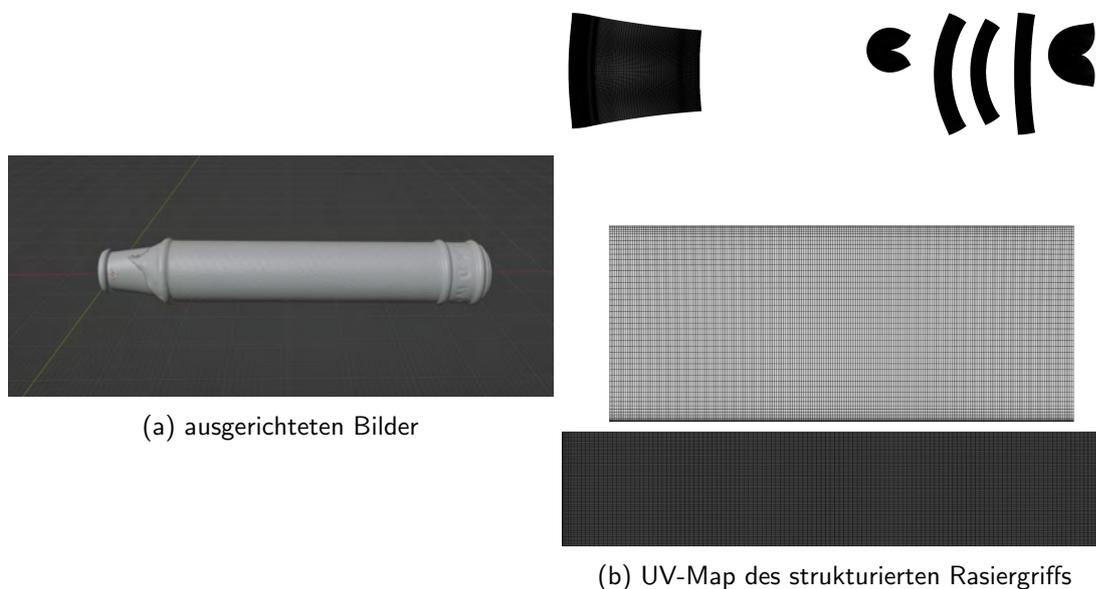


Abbildung 6.15: Bearbeitungsschritte in Blender

6.4.3 Generieren der Displacement Map mit xNormal

Der Aufbau von xNormal ist in mehrere Reiter aufgeteilt, der in Abbildung 6.16 zu sehen ist. In dem Reiter "High definition meshes" wurde das gescannte Modell importiert. Die Einstellung "Mesh scale" wurde auf zehn gestellt. Die gleichen Schritte erfolgten für den erstellen Rasiergriff, allerdings im Reiter "Low definition meshes". Damit wird die Größe der Meshes für die Erstellung angepasst. Durch die Anpassung der Größe konnte bei der Displacement Map ein besseres Ergebnis erzielt werden. Im zweiten Schritt erfolgte die Konfiguration des Outputs. Im Reiter "Baking options" wurde der Pfad und Name für die generierte Map festgelegt, die Größe des zu erstellenden Bildes wurde auf 8192×8192 Pixel gestellt und als Art der Textur wurde Höhenbilder ausgewählt. Die Einstellung für den Renderer blieb unverändert, da nur der "Default bucket renderer" Höhenbilder generieren kann. Schließlich wurde das Antialiasing auf den höchsten Wert von vier eingestellt.



Abbildung 6.16: Aufbau von xNormal

Für die Erstellung der Texturen benötigt xNormal normalerweise einen Käfig. Dabei handelt es sich um eine Kopie des niedrig aufgelösten Meshes, welches größer skaliert wird. Anhand dieses Käfigs kann xNormal die maximale Distanz von dem hochauflösenden und dem erstellten Mesh bestimmen. xNormal bietet allerdings zusätzlich unter dem Reiter Tools mit dem Tool "Ray distance calculator" die Möglichkeit, die Erstellung der Textur auch ohne Käfig zu machen, da das Tool die Entfernung berechnet. Dieses Tool wurde für die Erstellung der Textur benutzt. Dafür wurde das Tool gestartet und die Berechnung circa 120 Sekunden laufen gelassen, damit ein konstanter Entfernungswert bestimmt werden konnte. Anschließend wurden die berechneten Werte durch den Button "Copy results" automatisch zugewiesen und die Textur erstellt, was zwischen 5 und 10 Minuten dauerte. Nach Abschluss der Berechnungen wurde die Helligkeit der Displacement Map angepasst und die Textur unter dem festgelegten Pfad gespeichert. Zur Anpassung der Helligkeit kann über zwei Regler

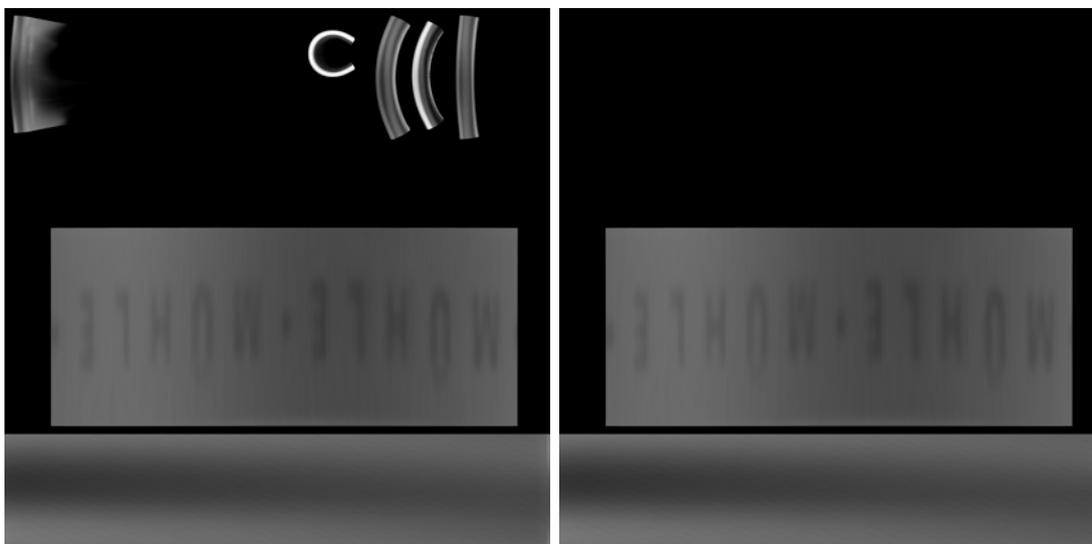
die minimale und die maximalen Helligkeitswerte ausgewählt werden. Zur Überprüfung auf Über- oder Unterbelichtung gibt es die Option "Debug min/max clamping". In Abbildung 6.17 ist eine Helligkeitsanpassung zusehen, wobei die roten und blauen Farben die Über- und Unterbelichtung anzeigen. Zusätzlich kann mit der "Smooth" Operation die Helligkeit etwas angeglichen. Die Helligkeit wird so angepasst, dass die Makrostrukturen in einem dunklen grau gut zu erkennen sind, und dabei keine Über- oder Unterbelichtung entsteht.



Abbildung 6.17: Anpassung der Helligkeit der erstellten Displacement Map

Abschließend werden die erzeugten Displacement Maps mit dem Bildbearbeitungsprogramm Affinity Photo⁸ angepasst. In der Software wurde zu einem durch eine Tonwertkorrektur und durch Anpassen der Schatten und Lichter, die Helligkeit der Textur weiter angepasst, zusätzlich dazu wurden die unwichtigen Bereiche eingefärbt, damit nur die Strukturen durch die Displacement Map generiert werden. Das erzeugte und die angepasste Bild ist in den Abbildung 6.22a und der Abbildung 6.22b zu sehen

⁸<https://affinity.serif.com/de/photo/>; zuletzt gesehen am: 18.02.2022



(a) Displacement Map vor der Bearbeitung (b) Displacement Map nach der Bearbeitung

Abbildung 6.18: Nachbearbeitung der Displacement Map

6.4.4 Displacement Map anwenden

Abschließend wurde die Displacement Map noch dem modellierten Griff zugewiesen. Die Zuweisung erfolgte in der 3D-Software Blender. Zunächst wurde für das Objekt ein Material angelegt und diesem Material im Shader Editor ein Displacement- und ein Bildtextur-Knoten hinzugefügt. Für die richtige Berechnung der Höhenkarte wurde der Farbraum auf "Non-Color" und beim Verschiebung-Knoten die Skalierung auf 0.1 gestellt. Der Aufbau des Materials kann in Abbildung 6.19 angesehen werden. Damit die Änderungen final sichtbar wurden, musste die Renderengine in Blender auf Cycle und in den Einstellungen des Materials die Einstellung "Verschiebung" auf "Displacement and Bump" gestellt werden. Die Ergebnisse können in den Abbildung 6.20 6.21 und 6.22 betrachtet werden.

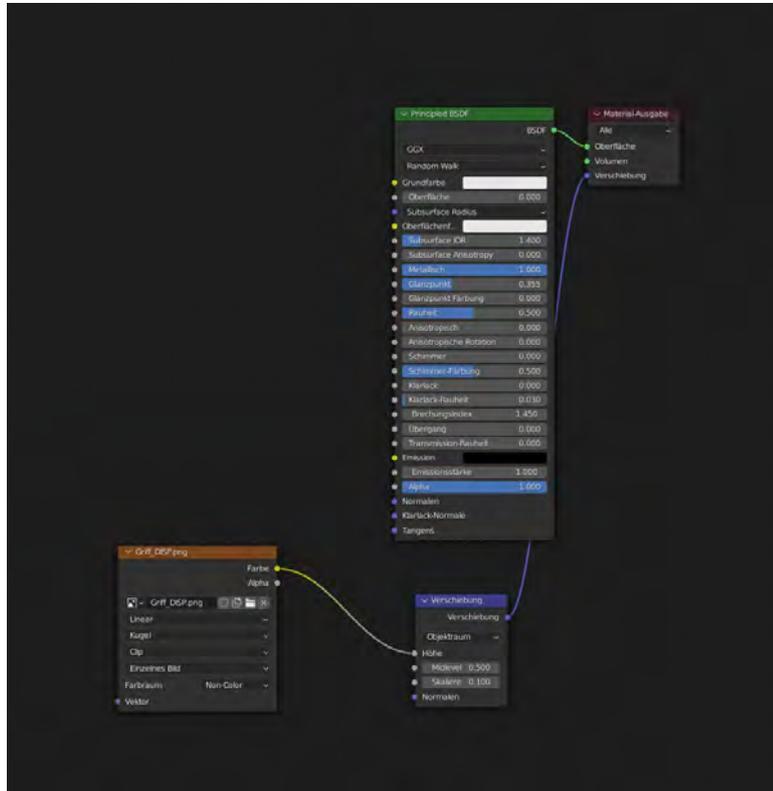
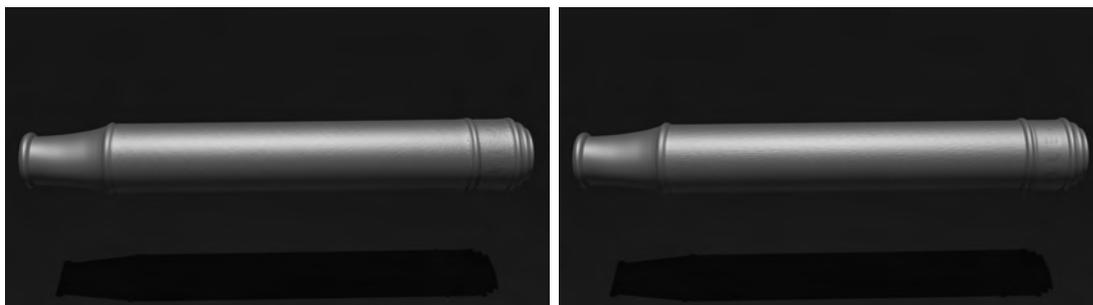


Abbildung 6.19: Materialeinstellungen in Blender



(a) Ergebnis mit Kreidespray

(b) Ergebnis mit Scanspray

Abbildung 6.20: Ergebnisse des 3D-Scanners



(a) Ergebnis mit Kreidespray

(b) Ergebnis mit Scanspray

Abbildung 6.21: Ergebnisse mit Fotogrammetrie und Meshroom



(a) Ergebnis mit Kreidespray

(b) Ergebnis mit Scanspray

Abbildung 6.22: Ergebnisse mit Fotogrammetrie und RealityCapture

Kapitel 7

Ergebnisse

7.1 Einleitung

In diesem Kapitel erfolgt die Auswertung der Ergebnisse. Dazu werden die verwendeten 3D-Scan-Verfahren anhand mehrere Kriterien miteinander verglichen. Zusätzlich dazu wird ein Bezug auf die händische Rekonstruktion der Makrostrukturen genommen, was einer der aktuellen Vorgehensweisen entspricht. Zur Bewertung und dem Vergleich der einzelnen Ergebnisse wird abschließend eine durchgeführte Umfrage ausgewertet und interpretiert.

7.2 Vergleich der 3D-Scan-Verfahren

In diesem Abschnitt werden der 3D-Scanner mit strukturiertem Licht mit dem Foto-grammetrie-Verfahren bezogen auf die Rekonstruktion von Makrostrukturen verglichen. Es wird analysiert, wie gut die Qualität der Verfahren ist, der benötigte Arbeitsaufwand, die Komplexität der Prozesse und die entstehenden Kosten bei Kauf und Nutzung der Systeme. Zusätzlich wird bei Arbeitsaufwand, der Komplexität und den Kosten Bezug auf die händische Erstellung der Makrostrukturen genommen.

7.2.1 Qualität

3D-Scanner

Der 3D-Scanner mit strukturiertem Licht konnte bei Verwendung von Kreidespray 838.615 Punkte und 848.954 Punkte bei der Verwendung von Scanspray erfassen. Nach Abschluss der Optimierungsverfahren hatten beide Rekonstruktionen 1,25 Millionen Punkte. Es sieht so aus, als würde die Software EXScan S eine fest einprogrammiertes Limit haben, welches bei diesen Werten liegt.

Fotogrammetrie-Verfahren

Die Anwendung Meshroom konnte bei Verwendung des Kreidesprays 386.423 Punkte und bei den Aufnahmen mit dem Scanspray 280.410 Punkte erfassen. Allerdings stammen viele

der erfassten Punkte von der Korkscheibe. Zusätzlich wurden einige fehlerhafte Punkte ermittelt, die zu keinem der beiden Objekten gehörten. Nachdem eine manuelle Bereinigung in Meshlab erfolgt war, hatten die Meshes der Griffe nur noch 52.189 und 35.079 Punkte. RealityCapture bietet nicht die Möglichkeit, sich die Anzahl der erfassten Punkte anzeigen zu lassen. Deshalb wurden die Resultate in Blender importiert, um dort die Anzahl der Meshes auszulesen. Bei den Aufnahmen mit Kreidespray wurden 675.615 Punkte und bei denen mit Scanspray 609.575 Punkte erfasst.

Fazit

Der 3D-Scanner erzielt bei der Rekonstruktion des Rasiergriffs die besten Ergebnisse, was in der Tabelle 7.1 gut erkennbar ist. Sowohl bei der reinen Erfassung, als auch bei der Rekonstruktion des Meshes, wurden deutlich mehr Punkte gemessen, als bei den Ergebnissen, die mittels Fotogrammetrie erzielt wurden. Aus den Ergebnissen ist auch ersichtlich, dass keines der beiden Sprays deutlich besser als das andere ist. Mit dem Kreidespray wurden bei der Fotogrammetrie und mit dem Scanspray beim 3D-Scanner bessere Resultate erzielt.

Verfahren	Anzahl Punkte	nach Rekonstruktion
3D-Scanner - Kreidespray	838.615	1,25 Mio.
3D-Scanner - Scanspray	848.854	1,25 Mio.
Meshroom - Kreidespray	386.423	52.189
Meshroom - Scanspray	280.410	35.079
RealityCapture - Kreidespray	nicht ersichtlich	675.615
RealityCapture - Scanspray	nicht ersichtlich	609.575

Tabelle 7.1: Anzahl erfasster Punkte des Griffes

7.2.2 Arbeitsaufwand

3D-Scanner

Der Arbeitsaufwand bei der Erfassung des Testobjektes unterscheidet sich stark bei beiden Verfahren. Bei der Erfassung mit dem 3D-Scanner, mit strukturiertem Licht, können nach wenigen Minuten Ergebnisse erzielt werden. Nachdem der Scanner aufgebaut und angeschlossen ist, erfolgt lediglich eine Ausrichtung des Drehtellers und ein Weißabgleich. Der Aufbau des Scanners dauerte ungefähr 10 Minuten und die Ausrichtung des Drehtellers ungefähr 15 Minuten. Daraufhin müssen noch einige Einstellungen bezüglich der Qualität gemacht werden und anschließend erfolgt die Erfassung in unter zehn Minuten. Daraufhin muss in der Software noch das Mesh aus der Punktwolke erzeugt werden, was in der Regel auch knapp 10 Minuten dauert.

Fotogrammetrie-Verfahren

Die Aufnahmen für das Fotogrammetrie-Verfahren benötigen ein zeitaufwendiges Aufnahmesetup mit neutralem Hintergrund und guter Ausleuchtung. Es müssen Testaufnahmen

mit verschiedenen Kamerapositionen und -einstellungen für saubere Aufnahmen gemacht werden. Je nach Anzahl der verwendeten Bilder kann die benötigte Zeit für die Aufnahme zwischen mehreren Minuten und einigen Stunden liegen. Die Dauer hängt aber auch stark von der verwendeten Kamera ab und wie schnell diese die aufgenommenen Fotos abspeichern kann. Mit der Nikon D5300 konnten ungefähr zehn Aufnahmen in kurzer Zeit gemacht werden, bevor keine weiteren Aufnahmen gemacht werden kann, da die Kamera die Bilder abspeichert und der Puffer voll ist.

Nachdem die Aufnahmen von der SD-Karte auf den Computer kopiert worden sind, kann die gewünschte Fotogrammetrie-Software, in der die weitere Verarbeitung erfolgt, gestartet werden. Die Ausführung dauert je nach Anzahl der verwendeten Bilder und deren Auflösung unterschiedlich lange. Die Verarbeitung der 600 RAW-Bilder mit einer Auflösung von 6000 x 4000 Pixeln benötigte in Meshroom ungefähr 16 Stunden, dagegen war bei RealityCapture schon nach ungefähr einer Stunde das Ergebnis zu sehen. Wenn Meshroom bei der Rekonstruktion ein fehlerhaftes Mesh erzeugt, wird hier ein Zwischenschritt mit der Software Meshlab benötigt. Die manuelle Bereinigung dauert abhängig vom Erfassungsergebnis ungefähr 10 Minuten.

Alle anderen Schritte, wie die Erstellung des strukturierten Meshes, die Besprühung des Griffes, die Ausrichtung in Blender mit Erzeugung der UV-Map, die Erzeugung der Displacement Map in xNormal und die Anwendung der Displacement Map auf dem strukturierten Mesh dauern bei beiden Verfahren ungefähr 210 Minuten.

Manuelle Erstellung der Makrostrukturen

Im Vergleich dazu fällt für die komplette Modellierung des Meshes mit einer Displacement Map für die Strukturen nur die Zeit für die Modellierung des Meshes, die Erzeugung der UV-Map und die manuelle Gestaltung der Displacement Map an. Allerdings steigt der Aufwand dafür mit der Komplexität des Objektes.

Eine Übersicht des Arbeitsaufwandes kann Tabelle 7.2 entnommen werden. Der Zeitaufwand bei der Fotogrammetrie bezieht sich auf 600 RAW-Bilder mit einer Auflösung von 6000 x 4000 Pixeln und bei dem 3D-Scanner auf eine Aufnahme mit 36 Stopps. Der Zeitaufwand hängt von dem zu erfassenden Objekt, der verwendeten Hard- und Software, der Auslastung des Systems und dem Input ab.

Fazit

Die Tabelle 7.2 zeigt deutlich, wie unterschiedlich der Zeitaufwand zwischen der Erfassung mit Fotogrammetrie und 3D-Scanner ist. Der 3D-Scanner benötigt nur ungefähr 19 % der Zeit des Fotogrammetrie-Verfahrens. Es zeigt sich allerdings auch, dass die Erfassung mit dem 3D-Scanner nur ein wenig schneller als die manuelle Modellierung ist. Jedoch handelt es sich bei dem Rasiergriff um ein Objekt mit einer einfachen Form und einheitlichen Makrostrukturen. Sollte die Objektform komplexer sein oder eine größere Varianz der Ma-

strukturen haben, dann würde die manuelle Erstellung der Displacement Map wesentlich länger dauern, als die mit dem 3D-Scanner.

	3D-Scanner	Fotogrammetrie	Modellierung
Modellierung des Objektes	120 Min.	120 Min.	120 Min.
Vorbereitungen des realen Objektes	30 Min.	30 Min.	0 Min.
Aufbau des Setups	20 Min.	40 Min.	0 Min.
Aufnahmen	10 Min.	70 Min.	0 Min.
Rekonstruktion des Meshes	10 Min.	960 Min.	0 Min.
Nachbearbeitung des Meshes	0 Min.	10 Min.	0 Min.
Ausrichtung in Blender	10 Min.	10 Min.	0 Min.
Erzeugung der UV-Map	10 Min.	10 Min.	10 Min.
Erzeugung der Displacement Map	30 Min.	30 Min.	120 Min.
Anwendung der Displacement Map	10 Min.	10 Min.	10 Min.
Gesamt	240 Min.	1.290 Min.	260 Min.

Tabelle 7.2: ungefährender Zeitaufwand der Rekonstruktion von Makrostrukturen

7.2.3 Komplexität

Auch bei der Komplexität unterscheiden sich beide Verfahren stark voneinander.

3D-Scanner

Da es sich bei dem 3D-Scanner mit strukturiertem Licht der Marke SHINING 3D um ein vollständiges und geschlossenes System handelt, sind die Konfigurationsmöglichkeiten stark eingeschränkt. Es müssen lediglich die Ausrichtung und die Anzahl der Abtastungen konfiguriert und entschieden werden, ob die Einstellung "HDR" verwendet werden soll. Sollten alle Seite des Objektes eingescannt werden, kann dies in mehreren Scans erfolgen. Die Software richtet die erzeugten Punktwolken automatisch zueinander aus. Bei diesem Prototyp war es nicht nötig, alle Seiten zu erfassen, da sich die Struktur lediglich auf der Seite befindet. Allerdings kann es bei anderen Objekten, wie beispielsweise einer Orange, wichtig sein alle Seiten zu erfassen. Nach Beendigung der Erfassung bietet die Software nur drei mögliche Qualitätsstufen zur Erzeugung des Meshes an und anschließend kann über wenige Einstellungen die Oberfläche des Meshes angepasst werden.

Fotogrammetrie-Verfahren

Im Gegensatz dazu gibt es bei Verwendung der Fotogrammetrie viele Aspekte die beeinflusst oder konfiguriert werden können. Unter anderem kann bei den Aufnahmen die Position, Helligkeit und Farbtemperatur zu unterschiedlichen Ergebnissen oder Konfigurationen der Kamera führen. Bei der Kamera kann durch ISO-Wert, Blende, Belichtungszeit und Fokus die resultierenden Aufnahmen und somit das resultierende Ergebnis der Fotogrammetrie-Software beeinflusst werden. So kann beispielsweise ein falsch gesetzter Fokus dafür sorgen,

das Merkmal im Bild nicht scharf dargestellt werden und die Software so weniger Informationen für die Position der Kamera finden kann. Auch die Auflösung und das Datenformat der abgespeicherten Bilder entscheiden über die Qualität der Rekonstruktion. In der Fotogrammetrie-Software gibt es auch einige Einstellungsmöglichkeiten. Bei RealityCapture können sowohl für die Ausrichtung, als auch für die Erzeugung des Meshes Einstellungen vorgenommen werden, die deutlich unterschiedliche Ergebnisse erzielen können. Bei Meshroom besteht sogar die Möglichkeit, in jedem der elf Knoten Einstellungen vorzunehmen.

Von der Komplexität her ist die Verwendung von Fotogrammetrie wesentlich aufwendiger als die des 3D-Scanners. Es gibt sehr viele Parameter, die das Endergebnis der Objektrekonstruktion und somit das der Makrostrukturen sowohl positiv als auch negativ beeinflussen können. Dagegen hat die mitgelieferte Software des 3D-Scanner von SHINING nur sehr wenige Einstellmöglichkeiten, es ist also nicht möglich, die Performance der Erfassung zu optimieren.

Manuelle Erstellung der Makrostrukturen

Die Komplexität zur händischen Rekonstruktion hängt dagegen nicht von Einstellungsparametern ab, sondern wie komplex die Strukturen des Objektes sind und wie erfahren der Designer ist. Je nach Bearbeitungssoftware können dem Designer einige Arbeitsschritte vereinfacht werden.

Fazit

Die Fotogrammetrie hat von den beiden Verfahren die höchste Komplexität. Das liegt zum einen an der Aufnahme der Bilder und zum anderen an der Konfiguration der Fotogrammetrie-Software. Dagegen ist es mit dem geschlossenen System des EinScan-SE von der Firma SHINING 3D wesentlich einfacher, qualitativ hochwertige Scans zu erstellen. Sowohl bei der Fotogrammetrie, als auch der händischen Rekonstruktion hängt die Komplexität aber auch stark von der Form und Struktur des Objektes ab, wogegen diese bei dem 3D-Scanner mit strukturiertem Licht immer gleich bleibt.

7.2.4 Kosten

3D-Scanner

Die Kosten für den 3D-Scanner EinScan SE der Marke SHINING 3D waren 1.206 €. Es war kein weiteres Equipment notwendig für die Erfassung und die Rekonstruktion des Rasiergriffs.

Fotogrammetrie-Verfahren

Die Spiegelreflexkamera hat zur Zeit des Kaufes im Jahre 2016 662,99 € kostet. Im Preis mit inbegriffen waren das Kameragehäuse und ein Objektiv. Das verwendete Objektiv hat zusätzlich 250 € gekostet. Die Leuchte hatte den Preis von 67,99 € und die beiden Stative haben 21,99 € und 15,00 € gekostet.

Manuelle Erstellung der Makrostrukturen

Ein 3D-Artist, der den Griff und dazugehörigen Makrostrukturen manuelle erstellen würde, hätte mit einem Gehalt von 60 € pro Stunde ungefähr 300 € gekostet. Zur Berechnung wurden das Durchschnittsgehalt von der Seite [freelancermap.de](https://www.freelancermap.de)¹ und die aufgerundeten 5 Stunden aus der Tabelle 7.2 verwendet.

Fazit

Eine Übersicht über die Preise ist in Tabelle 7.3 zu sehen. Bei der Kostenrechnung werden die Kosten für die Rekonstruktion des Meshes nicht berücksichtigt, da diese ohne Aufsicht vom System erledigt werden kann. Weiterhin ist anzumerken, dass die Kosten für die Anschaffung der Kamera, des Scanners und des weiteren Equipments nur einmalig getätigt werden müssen. Danach fallen nur noch die Personalkosten an. Um Kosten zu sparen, könnten die Aufnahmen auch mit einem Handy gemacht werden und auch das weitere Equipment ist nicht zwingend notwendig.

	3D-Scanner	Fotogrammetrie	3D-Artist
Scanner / Kamera	1.206 €	662,99 €	0 €
weiteres Equipment	0 €	354,98 €	0 €
Personalkosten	240 €	320 €	300 €
Gesamt	1446 €	1.337,97 €	300 €

Tabelle 7.3: Kosten für das Equipment und Personal

7.3 Evaluation

Zur Bewertung der Prototypen wurde eine kurze Evaluation durchgeführt. Darin wurde gefragt, wie qualitativ hochwertig die Befragten die erzeugten 3D-Strukturen fanden. An der Umfrage haben 31 Personen im Alter von 20 bis 70 Jahren teilgenommen. Bei den Personengruppen handelt es sich um Schüler, Studenten, Arbeitnehmer und Rentner und es waren alle Geschlechter vertreten.

Bei der Umfrage wurden die Ergebnisse der einzelnen Verfahren zusammen mit einer händisch erstellten Abbildung des Rasiergriffes (Abbildung 7.1) und einem Foto des Originals präsentiert. Jeder Proband bewertete die Qualität der Rekonstruktion der Oberflächenstruktur auf einer Skala von eins bis zehn. Wobei eins für sehr schlecht und zehn für sehr gut steht. Zusätzlich wurde die Frage gestellt, welche Abbildung des Rasierers für die Werbung tauglich sei. Die Ergebnisse dieser Umfrage sind Tabelle 7.4 und 7.5 zu entnehmen.

¹<https://www.freelancermap.de/freelancer-verzeichnis/3d-artist-7160>; zuletzt angesehen am: 16.02.2022

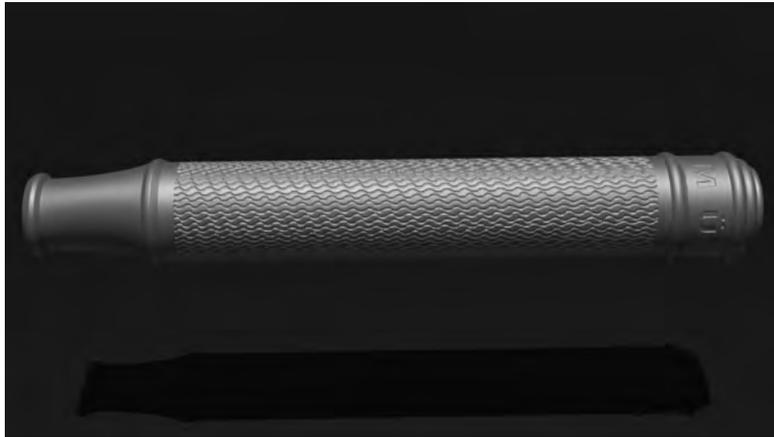


Abbildung 7.1: Rasiergriff mit manueller erstellter Makrostruktur als Referenzobjekt

7.3.1 Auswertung der Umfrage

Könnte einer der Griff deiner Meinung nach in einer Werbung oder für eine Produktbeschreibung genutzt werden?

Auswahlmöglichkeit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3D-Scanner – Kreidespray	4	18	7	4	0	0	0	0	0	0
3D-Scanner – Scanspray	3	6	12	8	2	0	0	0	0	0
Meshroom – Kreidespray	22	2	4	3	0	0	0	0	0	0
Meshroom – Scanspray	12	9	7	3	0	0	0	0	0	0
RealityCapture – Kreidespray	4	15	6	4	1	1	0	0	0	0
RealityCapture – Scanspray	4	14	7	5	1	0	0	0	0	0
Referenzobjekt – manuell erstellt	0	0	0	0	0	1	4	5	9	12

Tabelle 7.4: Qualität der Strukturen des Verfahrens

Welcher der Griffe könnte Ihrer Meinung nach in einer Werbung oder für eine Produktbeschreibung genutzt werden?

7.4 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Anhand der gesammelten Daten und der subjektiven Beurteilung der Probanden konnten Erkenntnisse zur Tauglichkeit von 3D-Scan-Verfahren zur Rekonstruktion von Makrostrukturen erfasst werden. Zunächst hat die Umfrage ergeben, dass die Verwendung von Meshroom die schlechtesten Ergebnisse erzielt hat. Dadurch lässt sich erkennen, dass zusätzlich zu der Qualität der Aufnahmen auch die verwendete Software eine große Rolle spielt. Die besten Ergebnisse lieferte der 3D-Scanner mit Scanspray. In der Umfrage erzielte das Verfahren

Auswahlmöglichkeit	Anzahl
3D-Scanner – Kreidespray	0 (0 %)
3D-Scanner – Scanspray	(0,0 %)
Meshroom – Kreidespray	0 (0,0 %)
Meshroom – Scanspray	6 (19,4 %)
RealityCapture – Kreidespray	2 (6,5 %)
RealityCapture – Scanspray	0 (0,0 %)
keiner	19 (61,3 %)
enthalten	4(12,9 %)

Tabelle 7.5: Tauglichkeit für Werbung oder Produktbeschreibung

eine durchschnittliche Bewertung von 3,0, wogegen das Resultat mit Kreidespray nur eine 2,4 erreichte. Bei der Fotogrammetrie hat Meshroom das schlechteste Resultat erzielt, Kreidespray hat dort nur eine 1,6 und das Scanspray eine 2,0 erreicht. Mit der Software RealityCapture konnte mit beiden Ergebnissen jeweils eine durchschnittliche Bewertung von 2,5 erreicht werden. Anhand der Resultate der zweiten Frage, dass 61,3 % finden, dass keines der gezeigten Resultate für Werbeeinsatz oder eine Produktbeschreibung geeignet ist, und der zusätzlichen schlechten Bewertung zeigt sich deutlich, dass keines der beiden 3D-Scan-Verfahren für die Rekonstruktion von Makrostrukturen geeignet ist.

Anhand der Auswertung und der Umfrage ist erkennbar, dass das Fotogrammetrie-Verfahren deutlich schlechter für die Rekonstruktion von Makrostrukturen geeignet ist, als die Nutzung eines 3D-Scanners mit strukturiertem Licht. Die Qualität der Ergebnisse ist schlechter, da wesentlich weniger Punkte des eigentlichen Objektes erfasst werden konnten. Zusätzlich sind die Komplexität, der Arbeitsaufwand und die Verarbeitung der Aufnahmen um ein vielfaches größer als bei einem 3D-Scanner, der nur wenige Einstellungen hat und schnell einsatzbereit ist. Für beide Verfahren muss zu Beginn Geld für Equipment investiert werden, wobei das Equipment für den 3D-Scanner deutlich teurer ist. Zusätzlich konnte nicht eindeutig festgestellt werden, ob Kreide- oder das Scanspray bessere Resultate erzielt.

Zusätzlich lässt sich aus der Auswertung und den Ergebnissen der Umfrage schlussfolgern, dass die händische Rekonstruktion der Makrostrukturen zu einem besseren Resultat führt. Zum Vergleich zu den anderen Ergebnissen haben die Probanden der manuellen Erstellung mit einer durchschnittlichen Bewertung von 8,8 die beste Bewertung gegeben. Es zeigte sich zusätzlich in der Auswertung, dass die manuelle Erstellung keineswegs den meisten Arbeitsaufwand erzeugte. Die benötigte Zeit für den Prozess der manuellen Erstellung dauerte nicht wesentlich länger als die des 3D-Scanners. Die Komplexität, der Arbeitsaufwand und Kosten der manuellen Erstellung hängen stark von der Struktur und Form des zu rekonstruierenden Objektes ab. Bei einmaliger Erstellung sind die Kosten deutlich geringer als beide Scan-Verfahren.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Realistische 3D-Repräsentationen von realen Objekten finden immer mehr Anwendungsbereiche und deshalb steigt die Anfrage danach. Die manuelle Rekonstruktion ist sowohl zeitaufwendig und es werden erfahrene Artist benötigt, um alle Details des Originals zu modellieren. In der Zukunft werden mehr Onlinegeschäfte 3D-Modelle für ihre Produktwerbung verwenden, was man bei der Firma Ikea sehen kann, die den Großteil ihres Kataloges mit 3D-Modellen designt haben.

Die Arbeit beschäftigt sich damit, ob 3D-Scan-Verfahren in der Lage sind, die die Makrostrukturen von Objekten zu erfassen, damit diese anschließend auf strukturierte 3D-Modelle gelegt werden können. Dafür wurden die gängigen 3D-Scan-Verfahren auf Tauglichkeit zur Rekonstruktion von Makrostrukturen überprüft. Die Analyse erfolgt an den Kriterien Auflösung, Genauigkeit und an der Fähigkeit glänzende und transparente Oberflächen zu erfassen. Die Untersuchung ergab, dass alle ausgewählten Verfahren grundsätzlich für die Rekonstruktion von Makrostrukturen geeignet sind. Allerdings hat jedes Verfahren eine Einschränkung. So erzielen kontaktbasierte Verfahren nur sehr schlechte Ergebnisse bei organischen oder weichen Oberflächen und können das zu erfassende Objekt beschädigen. Alle optischen Verfahren haben aufgrund ihrer Funktionsweise Probleme mit glänzend und transparenten Oberflächen.

Die praktische Umsetzung zeigt, dass es weder mit Fotogrammetrie noch durch ein 3D-Scanner mit strukturiertem Licht möglich war, das Testobjekt, den Rasiergriff zu erfassen. Wie erwartet hatten beide Verfahren große Schwierigkeiten, die glänzende Oberfläche des Rasierer zu erfassen. Es zeigt sich auch, dass die Hilfsmittel wie Kreide- oder Scanspray die grundsätzliche Erfassung der Oberfläche ermöglichten, aber viele Details nicht erfasst werden konnte oder sogar durch falsche Anwendung der Sprays Unebenheiten entstehen konnten. Somit zeigt sich, dass glänzende Oberflächen ein großes Problem bei der Erfassung von Makrostrukturen darstellt.

Der Direktvergleich der beiden Verfahren zeigte, dass die Handhabung und Qualität der 3D-Scanner mit strukturiertem Licht besser waren, als bei der Fotogrammetrie. Der 3D-Scanner mit strukturiertem Licht konnte schnell aufgebaut werden und erstellte zügig gute Ergebnisse, lediglich der Konfigurationsumfang war sehr beschränkt. Das Grundequipment für die Aufnahmen der Fotogrammetrie musste nicht angeschafft werden, es wurde eine verfügbare Kamera verwendet. Allerdings musste schon für das Aufnahmeset weiteres Equipment angeschafft werden, um beispielsweise eine gute Ausleuchtung zu gewährleisten. Die Aufnahmen waren problemlos gemacht und die Fotogrammetrie-Software hat ohne große Einarbeitungszeit Ergebnis geliefert. Allerdings ist eins der größten Probleme bei der Fotogrammetrie die zahlreichen Parameter und Einflüsse, die das Endresultat beeinflussen können. Dazu kommt, dass es teilweise mehrere Stunden dauern kann, bis man ein Ergebnis sieht und weiß, ob alles einwandfrei funktioniert hat. Bei der Wahl zwischen den beiden Verfahren muss überlegt werden, ob es in Ordnung ist, etwas mehr Geld für eine 3D-Scanner auszugeben und dafür ein kompaktes und geschlossenes System zu bekommen, oder ob man eine Kamera zur Verfügung hat und Zeit für die Erstellung nicht die höchste Priorität hat.

Die Evaluation zeigte, dass das beste Resultat durch eine manuelle Erstellung erreicht werden konnte. Im Vergleich dazu waren die Bewertungen bei den beiden verwendeten 3D-Scan-Verfahren wesentlich schlechter. Die Kosten für eine manuelle Anfertigung ist für einen einmaligen Auftrag wesentlich günstiger als die 3D-Scan-Verfahren. Wichtig ist hier anzumerken, dass der Hauptkostenfaktor die Anschaffung des Equipments ist und bei mehrmaliger Nutzung die Kosten pro Auftrag stark senken. Zusätzlich liegt die Dauer für die Erstellung nur knapp der, des 3D-Scanners. Hierbei ist zu erwähnen, dass die benötigte Arbeitszeit für die manuelle Erstellung stark von der Komplexität des Objektes abhängt, und sich deutlich um mehrere Stunden erhöhen kann. Dagegen ist der Arbeitsaufwand, zumindest beim 3D-Scanner, jedes Mal relativ gleich.

Abschließend kann gesagt werden, dass die Rekonstruktion von Makrostrukturen mit einem 3D-Scan-Verfahren in dieser Arbeit, zumindest für sehr feine Strukturen auf glänzenden Oberflächen, keine Anwendung findet. Die erzielten Ergebnisse bieten nicht die gewünschte realistische Qualität und es entsteht teilweise ein hoher Zeitaufwand. Es ist schneller und günstiger einen 3D-Artist die Struktur händisch die Makrostrukturen erzeugen zu lassen, als dafür entweder einen teuren 3D-Scanner zu besorgen oder sich in die hohe Komplexität der Fotogrammetrie einzuarbeiten.

8.2 Ausblick

Das Thema Fotogrammetrie könnte weiter untersucht werden. Das Verfahren der Fotogrammetrie bietet eine große Anzahl von Optimierungspotential. Unter anderem könnte anderes Kameraequipment verwendet werden. Darunter fällt eine Kamera mit einem größeren Sensor oder mehr Megapixel, aber auch ein anderes Objektiv, wie beispielsweise ein Makroobjektiv. Damit könnten mehr Details des Objektes erfasst werden und damit vielleicht ein besseres Ergebnis. Zusätzlich dazu könnten mehr Bilder von dem Objekt erstellt werden, um mehr

Übereinstimmungen zu finden. Weiterhin könnte überprüft werden, ob es möglich ist auch mit Videomaterial möglich ist, Makrostrukturen zu erfassen. So bietet beispielsweise RealityCapture die Möglichkeit, Videos zu importieren und daraus eine 3D-Repräsentation zu erstellen. Das Thema Fotogrammetrie, eröffnet in Bezug auf die Rekonstruktion von Makrostrukturen noch einige Alternativlösungen.

In dieser Arbeit konnten aus Geld- und Zeitgründen nur zwei der Verfahren praktisch ausprobiert werden. Die Analyse zeigte allerdings, dass grundsätzlich alle Verfahren für die Rekonstruktion von Makrostrukturen geeignet sind. Es könnte also überprüft werden, ob die Laser oder die kontaktbasierten Koordinatenmessgeräte ein anderes Ergebnis liefern, als Fotogrammetrie und 3D-Scanner mit strukturiertem Licht.

In dieser Arbeit wurde die praktische Tauglichkeit der Scan-Verfahren an einem reflektierenden Objekt überprüft. Allerdings haben optische Verfahren oft Schwierigkeiten mit solchen Oberflächen. In späteren Arbeiten könnte die Qualität der Verfahren bei weitere Objekte mit unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften überprüft werden. Durch die Verwendung des Kreide- und Scanspray konnte die Oberfläche erfasst werden, allerdings gingen durch die aufgetragene Schicht sehr feine Details verloren. Zusätzlich dazu hätte überprüft werden können, ob bessere Ergebnisse mit permanentem Farbspray erzielt worden wäre.

Weitere Themen wären unter anderem der Vergleich von der Rekonstruktion von Makrostrukturen und die Verwendung Software zur Retopologie des Meshes wie beispielsweise 3DCoat¹. In dieser Arbeit wurde nicht überprüft, wie gut eine solche Software das erfasste 3D-Mesh verbessern kann. Ein weiteres mögliches Thema wäre, ob Deep Learning für die Erfassung und Extraktion von Makrostrukturen eingesetzt werden könnte.

¹<https://3dcoat.com/de/articles/article/retopology/>; zuletzt angesehen am: 20.02.2022

Abkürzungen

CAD	computer-aided design
KGM	Koordinatenmessgerät
ToF	Time-of-Flight
HF-Bereich	High frequency
VHF-Bereich	Very high frequency
RADAR	Radio Detection and Ranging
ICP	Iterative Closest Points
LIDAR	Light Detection and Ranging
GPS	global positioning system

Literaturverzeichnis

- [ADS97] ASTON, R.A.E. ; DAVIS, Jim ; STOUT, K.J.: A probing question: A customer's investigation into the directional variability of a coordinate measuring machine touch trigger probe. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 37 (1997), Nr. 10, 1375-1382. [http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00011-4](http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00011-4). – DOI [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00011-4). – ISSN 0890-6955
- [Alt92] ALTMAN, Naomi S.: An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression. In: *The American Statistician* 46 (1992), Nr. 3, S. 175-185
- [Arn] ARNOLD, Bozena: *Werkstofftechnik für Wirtschaftsingenieure*. 2. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. – ISBN 978-3-662-54548-5
- [BBC⁺03] BERARDIN, Jean A. ; BLAIS, Francois ; COURNOYER, Luc ; GODIN, Guy ; RIOUX, Marc ; TAYLOR, John: *Active 3D sensing*. Citeseer, 2003
- [BL18] BUKENBERGER, Dennis R. ; LENSCH, Hendrik P. A.: Hierarchical Quad Meshing of 3D Scanned Surfaces. In: *Computer Graphics Forum* 37 (2018), Nr. 5, 135-145. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1111/cgf.13497>. – DOI <https://doi.org/10.1111/cgf.13497>
- [BLZ16] In: BELL, Tyler ; LI, Beiwen ; ZHANG, Song: *Structured Light Techniques and Applications*. John Wiley Sons, Ltd, 2016. – ISBN 9780471346081, 1-24
- [BMR⁺99] BERNARDINI, Fausto ; MITTLEMAN, Joshua ; RUSHMEIER, Holly ; SILVA, Claudio ; TAUBIN, Gabriel: The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction. In: *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 5 (1999), Nr. 4, S. 349-359
- [Boi84] BOISSONNAT, Jean-Daniel: Geometric structures for three-dimensional shape representation. In: *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 3 (1984), Nr. 4, S. 266-286
- [BYW⁺20] BELLO, Saifullahi A. ; YU, Shangshu ; WANG, Cheng ; ADAM, Jibril M. ; LI, Jonathan: Review: Deep Learning on 3D Point Clouds. In: *Remote Sensing* 12 (2020), Nr. 11. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12111729>. – DOI [10.3390/rs12111729](https://doi.org/10.3390/rs12111729). – ISSN 2072-4292

- [Che08] CHEN, Tongbo: *New 3D scanning techniques for complex scenes*
- [CSL08] CHEN, Tongbo ; SEIDEL, Hans-Peter ; LENSCH, Hendrik P.: Modulated phase-shifting for 3D scanning. In: *2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* IEEE, 2008, S. 1–8
- [DGF15] DIMITROV, Andrey ; GOLPARVAR-FARD, Mani: Segmentation of building point cloud models including detailed architectural/structural features and MEP systems. In: *Automation in Construction* 51 (2015), 32-45. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.12.015>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.12.015>. – ISSN 0926–5805
- [Ebr15] EBRAHIM, Mostafa Abdel-Bary: 3D laser scanners' techniques overview. In: *Int J Sci Res* 4 (2015), Nr. 10, S. 323–331
- [El-19] EL-DIN FAWZY, Hossam: Study the accuracy of digital close range photogrammetry technique software as a measuring tool. In: *Alexandria Engineering Journal* 58 (2019), Nr. 1, 171-179. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.04.004>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.04.004>. – ISSN 1110–0168
- [Ent13] ENTHED, Martin: A Retailers Way into 3D: IKEA. In: *ACM SIGGRAPH 2013 Studio Talks*. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2013 (SIGGRAPH '13). – ISBN 9781450323437
- [FCW⁺10] FAN, Kuang-Chao ; CHENG, Fang ; WANG, Weili ; CHEN, Yejin ; LIN, Jia-You: A scanning contact probe for a micro-coordinate measuring machine (CMM). In: *Measurement Science and Technology* 21 (2010), mar, Nr. 5, 054002. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/21/5/054002>. – DOI 10.1088/0957-0233/21/5/054002
- [Fli11] FLICK, Uwe: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2011. – ISBN 978–3–531–92864–7
- [Fu20] FU, Peng-J. He Q. et a. K.: Single image 3D object reconstruction based on deep learning: A review. (2020). <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1007/s11042-020-09722-8>. – DOI <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09722-8>
- [GG] GEORG GLAESER, Werner N.: *Die Evolution biologischer Makrostrukturen - Ein Fotoshooting*. 1. Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018. – ISBN 978–3–662–57826–1
- [GSL⁺11] GHAZALI, Rosmadi ; SUKRI, Ahmad Eziwan E. ; LATIF, Abd Rahman A. ; RASAM, Abd Rauf A. ; LATIF, Zulkiflee A. ; SAMAD, Abd M.: Evaluating the relationship between scanning resolution of laser scanner with the accuracy of the 3D model constructed. In: *2011 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, 2011, S. 590–595

- [GWM⁺08] GLENCROSS, Mashhuda ; WARD, Gregory J. ; MELENDEZ, Francho ; JAY, Caroline ; LIU, Jun ; HUBBOLD, Roger: A Perceptually Validated Model for Surface Depth Hallucination. In: *ACM Trans. Graph.* 27 (2008), aug, Nr. 3, 1–8. <http://dx.doi.org/10.1145/1360612.1360658>. – DOI 10.1145/1360612.1360658. – ISSN 0730–0301
- [HDD⁺92] HOPPE, Hugues ; DE ROSE, Tony ; DUCHAMP, Tom ; McDONALD, John ; STUETZLE, Werner: Surface reconstruction from unorganized points. In: *Proceedings of the 19th annual conference on computer graphics and interactive techniques*, 1992, S. 71–78
- [HP⁺12] HOCKEN, Robert J. ; PEREIRA, Paulo H. u. a.: *Coordinate measuring machines and systems*. Bd. 6. CRC press Boca Raton, FL, 2012
- [HS97] HARTLEY, Richard I. ; STURM, Peter: Triangulation. In: *Computer Vision and Image Understanding* 68 (1997), Nr. 2, 146–157. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1006/cviu.1997.0547>. – DOI <https://doi.org/10.1006/cviu.1997.0547>. – ISSN 1077–3142
- [HSC02] HILTON, Adrian ; STARCK, Jonathan ; COLLINS, Gordon: From 3d shape capture to animated models. In: *IEEE Conference on 3D Data Processing, Visualisation and Transmission*, 2002
- [JHPS21] JAVAID, Mohd ; HALEEM, Abid ; PRATAP SINGH, Ravi ; SUMAN, Rajiv: Industrial perspectives of 3D scanning: Features, roles and its analytical applications. In: *Sensors International* 2 (2021), 100114. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100114>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100114>. – ISSN 2666–3511
- [JJC20] JIN, Yiwei ; JIANG, Diqiong ; CAI, Ming: 3d reconstruction using deep learning: a survey. In: *Communications in Information and Systems* 20 (2020), Nr. 4, S. 389–413
- [Jun12] JUNG, Christopher: *Vergleich von Quadtree, kd-tree und r-tree für statische und dynamische Geodaten*, Master Thesis, 2012. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:101:1-201201107445>
- [Kra04] KRAUS, K.: *Photogrammetrie*. De Gruyter, 2004 (De Gruyter Lehrbuch Bd. 1). <https://books.google.de/books?id=L5QcP5QkUm4C>. – ISBN 9783110177084
- [L⁺14] LI, Larry u. a.: Time-of-flight camera—an introduction. In: *Technical white paper* (2014), Nr. SLOA190B
- [LCP⁺17] LI, Fengqiang ; CHEN, Huaijin ; PEDIREDLA, Adithya ; YEH, Chiakai ; HE, Kuan ; VEERARAGHAVAN, Ashok ; COSSAIRT, Oliver: CS-ToF: High-resolution compressive time-of-flight imaging. In: *Opt. Express* 25 (2017), Dec, Nr.

- 25, 31096–31110. <http://dx.doi.org/10.1364/OE.25.031096>. – DOI 10.1364/OE.25.031096
- [Lin01] LINSEN, Lars: *Point cloud representation*. Univ., Fak. für Informatik, Bibliothek Technical Report, Faculty of Computer . . . , 2001
- [Low04] LOWE, David G.: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. In: *International journal of computer vision* 60 (2004), Nr. 2, S. 91–110
- [LR09] LIU, Yu-Shen ; RAMANI, Karthik: Robust principal axes determination for point-based shapes using least median of squares. In: *Computer-Aided Design* 41 (2009), Nr. 4, S. 293–305
- [LRKB19] LUHMANN, Thomas ; ROBSON, Stuart ; KYLE, Stephen ; BOEHM, Jan: *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. De Gruyter, 2019. <http://dx.doi.org/doi:10.1515/9783110607253>. <http://dx.doi.org/doi:10.1515/9783110607253>. – ISBN 9783110607253
- [LSL⁺19] LIU, Weiping ; SUN, Jia ; LI, Wanyi ; HU, Ting ; WANG, Peng: Deep Learning on Point Clouds and Its Application: A Survey. In: *Sensors* 19 (2019), Nr. 19. <http://dx.doi.org/10.3390/s19194188>. – DOI 10.3390/s19194188. – ISSN 1424–8220
- [LW04] LIN, Hongwei ; TAI, Chiew-Lan ; WANG, Guo jin: A mesh reconstruction algorithm driven by an intrinsic property of a point cloud. In: *Comput. Aided Des.* 36 (2004), S. 1–9
- [Luh10] LUHMANN, Thomas: Close range photogrammetry for industrial applications. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65 (2010), Nr. 6, 558–569. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.06.003>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.06.003>. – ISSN 0924–2716. – ISPRS Centenary Celebration Issue
- [Luk20] LUKAS, Mario: *Das 3D-Scanner-Praxisbuch: Grundlagen, Nachbau, Nachbearbeitung*. dpunkt.verlag GmbH, 2020. – ISBN 3864906407
- [LZ94] LANGER, Michael ; ZUCKER, Steven: Shape-from-shading on a cloudy day. In: *JOSA A* 11 (1994), 02, S. 467–478. <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.11.000467>. – DOI 10.1364/JOSAA.11.000467
- [MMWF13] MCQUAID, Grainne ; MILLAR, Phillip ; WOODWARD, David ; FRIEL, Shaun: Use of close range photogrammetry to assess the micro-texture of asphalt surfacing aggregate. In: *International Journal of Pavements Conference, São Paulo, Brazil*, 2013
- [NL13] NGUYEN, Anh ; LE, Bac: 3D point cloud segmentation: A survey. In: *2013 6th IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)*, 2013, S. 225–230

- [NLX18] NIU, Chengjie ; LI, Jun ; XU, Kai: Im2Struct: Recovering 3D Shape Structure From a Single RGB Image. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018
- [NNMR14] NICOLAE, Corina ; NOCERINO, Erica ; MENNA, Fabio ; REMONDINO, Fabio: Photogrammetry applied to problematic artefacts. In: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 40 (2014), Nr. 5, S. 451
- [PDZR18] PAN, Zhiying ; DI, Make ; ZHANG, Jianhua ; RAVI, Suraj: Automatic Re-Topology and UV Remapping for 3D Scanned Objects Based on Neural Network. In: *Proceedings of the 31st International Conference on Computer Animation and Social Agents*. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2018 (CASA 2018). – ISBN 9781450363761, 48–52
- [PEGK14] PAULUS, Stefan ; EICHERT, Thomas ; GOLDBACH, Heiner E. ; KUHLMANN, Heiner: Limits of Active Laser Triangulation as an Instrument for High Precision Plant Imaging. In: *Sensors* 14 (2014), Nr. 2, 2489–2509. <http://dx.doi.org/10.3390/s140202489>. – DOI 10.3390/s140202489. – ISSN 1424–8220
- [PMG⁺05] PAULY, Mark ; MITRA, Niloy J. ; GIESEN, Joachim ; GROSS, Markus H. ; GUIBAS, Leonidas J.: Example-based 3d scan completion. In: *Symposium on Geometry Processing*, 2005, S. 23–32
- [PPM⁺20] PIERDICCA, Roberto ; PAOLANTI, Marina ; MATRONE, Francesca ; MARTINI, Massimo ; MORBIDONI, Christian ; MALINVERNI, Eva S. ; FRONTONI, Emanuele ; LINGUA, Andrea M.: Point Cloud Semantic Segmentation Using a Deep Learning Framework for Cultural Heritage. In: *Remote Sensing* 12 (2020), Nr. 6. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12061005>. – DOI 10.3390/rs12061005. – ISSN 2072–4292
- [PZ16] PIETRO ZANUTTIGH, Carlo Dal Mutto Fabio Dominio Ludovico Minto Guido Maria C. Giulio Marin M. Giulio Marin: *Time-of-Flight and Structured Light Depth Cameras*. Springer, Cham, 2016 <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-30973-6>. – ISBN 9783319309736
- [RCM⁺01] ROCCHINI, C. ; CIGNONI, P. ; MONTANI, C. ; PINGI, P. ; SCOPIGNO, R.: A low cost 3D scanner based on structured light. In: *Computer Graphics Forum* 20 (2001), Nr. 3, 299-308. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1111/1467-8659.00522>. – DOI <https://doi.org/10.1111/1467-8659.00522>
- [Rus16] RUSK, Nicole: Deep learning. In: *Nature Methods* 13 (2016), Nr. 1, S. 35–35
- [SA15] SAFRANI, Avner ; ABDULHALIM, Ibrahim: High-speed 3D imaging using two-wavelength parallel-phase-shift interferometry. In: *Opt. Lett.* 40 (2015), Oct, Nr. 20, 4651–4654. <http://dx.doi.org/10.1364/OL.40.004651>. – DOI 10.1364/OL.40.004651

- [SCS20] SCHLARP, Johannes ; CSENSICS, Ernst ; SCHITTER, Georg: Design and evaluation of an integrated scanning laser triangulation sensor. In: *Mechatronics* 72 (2020), 102453. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102453>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102453>. – ISSN 0957–4158
- [SK05] SCHECHNER, Y.Y. ; KARPEN, N.: Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis. In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 30 (2005), Nr. 3, S. 570–587. <http://dx.doi.org/10.1109/JOE.2005.850871>. – DOI 10.1109/JOE.2005.850871
- [ST18] SHAN, J. ; TOTH, C.K.: *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing, Second Edition*. CRC Press, 2018 https://books.google.de/books?id=N_ErDwAAQBAJ. – ISBN 9781351650427
- [TKA⁺15] TAFTI, Ahmad P. ; KIRKPATRICK, Andrew B. ; ALAVI, Zahrasadat ; OWEN, Heather A. ; YU, Zeyun: Recent advances in 3D SEM surface reconstruction. In: *Micron* 78 (2015), 54-66. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micron.2015.07.005>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.micron.2015.07.005>. – ISSN 0968–4328
- [Web17] WEBSTER, Nicky: High poly to low poly workflows for real-time rendering. In: *Journal of Visual Communication in Medicine* 40 (2017), 01, S. 40–47. <http://dx.doi.org/10.1080/17453054.2017.1313682>. – DOI 10.1080/17453054.2017.1313682
- [WGY⁺12] WANG, Jun ; GU, Dongxiao ; YU, Zeyun ; TAN, Changbai ; ZHOU, Laihui: A framework for 3D model reconstruction in reverse engineering. In: *Computers Industrial Engineering* 63 (2012), Nr. 4, 1189-1200. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.07.009>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.07.009>. – ISSN 0360–8352
- [WLG⁺21] WANG, Rongxuan ; LAW, Andrew Chung C. ; GARCIA, David ; YANG, Shuo ; KONG, Zhenyu: Development of Structured Light 3D-Scanner with High Spatial Resolution and its Applications for Additive Manufacturing Quality Assurance. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Accepted (2021), 11. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-021-07780-2>. – DOI 10.1007/s00170-021-07780-2
- [Wol94] WOLFF, Lawrence B.: Polarization camera for computer vision with a beam splitter. In: *J. Opt. Soc. Am. A* 11 (1994), Nov, Nr. 11, 2935–2945. <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.11.002935>. – DOI 10.1364/JOSAA.11.002935