

# Digitalisierung von kulturellem Erbe

Digitalisierungsexperimente und Best Practices



Florian Schlenker  
FORWISS  
Universität Passau

Passau, Juli 2019





# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Beispielobjekte</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>Grundlagen und Terminologie</b>	<b>26</b>
3.1	Geometrie von 3D-Modellen . . . . .	26
3.2	Textur von 3D-Modellen . . . . .	28
3.3	Weitere Begriffe . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Digitalisierungsverfahren</b>	<b>31</b>
4.1	Photogrammetrie . . . . .	31
4.2	Streifenlichtscanner . . . . .	32
4.3	Laserscanner . . . . .	36
4.4	Computertomographie . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Experimentelle Digitalisierung - Aufbau und Durchführung</b>	<b>41</b>
5.1	Laserscanner . . . . .	41
5.1.1	Hardware . . . . .	41
5.1.2	Software . . . . .	43
5.2	Stationärer Streifenlichtscanner . . . . .	45
5.2.1	Hardware . . . . .	45
5.2.2	Software . . . . .	45
5.3	Handgeführter Streifenlichtscanner . . . . .	46
5.3.1	Hardware . . . . .	46
5.3.2	Software . . . . .	47
5.4	Photogrammetrie . . . . .	48
5.4.1	Hardware . . . . .	48
5.4.2	Software . . . . .	50
5.5	Computertomographie . . . . .	51
5.5.1	Hardware . . . . .	51
5.5.2	Software . . . . .	51
<b>6</b>	<b>Experimentelle Digitalisierung - Ergebnisse</b>	<b>52</b>
6.1	Laserscanner . . . . .	52
6.2	Stationärer Streifenlichtscanner . . . . .	59
6.3	Handgeführter Streifenlichtscanner . . . . .	69
6.4	Photogrammetrie . . . . .	84
6.5	Computertomographie . . . . .	94

<b>7</b>	<b>Abstraktion der Ergebnisse</b>	<b>103</b>
7.1	Objektgröße . . . . .	103
7.2	Oberflächenhelligkeit . . . . .	105
7.3	Oberflächendetails . . . . .	107
7.4	Transparenz . . . . .	108
7.5	Reflexionen . . . . .	110
7.6	Flachheit . . . . .	111
7.7	Selbstverdeckungen . . . . .	114
7.8	Materialabsorption . . . . .	115
<b>8</b>	<b>Weitere Kriterien</b>	<b>118</b>
8.1	Kosten . . . . .	118
8.2	Portabilität der Ausrüstung . . . . .	122
8.3	Notwendige Fertigkeiten . . . . .	124
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>128</b>
9.1	Informationsgehalt . . . . .	128
9.2	Objekteigenschaften . . . . .	128
9.3	Ausblick: 3D-Druck als Beispielanwendung . . . . .	131
9.3.1	Funktionsweise . . . . .	131
9.3.2	Voraussetzungen . . . . .	132
9.3.3	Möglichkeiten für Museen . . . . .	132
9.3.4	Beispiele . . . . .	134
9.4	Fazit . . . . .	134

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Tondeckel . . . . .	14
2.2	Kerzenhalter . . . . .	14
2.3	Handgranate . . . . .	15
2.4	Vorhängeschloss . . . . .	16
2.5	Holzteller . . . . .	17
2.6	Arzneifläschchen . . . . .	17
2.7	Krug . . . . .	18
2.8	Scheibenleuchter . . . . .	19
2.9	Bahrtuchschild . . . . .	20
2.10	Hermes . . . . .	21
2.11	Burgfräulein . . . . .	22
2.12	Medaille . . . . .	23
2.13	Bronzekopf . . . . .	24
2.14	Passauer Töpel . . . . .	24
2.15	Votivkrone . . . . .	25
3.1	Grundlegende Elemente der Geometrie eines Oberflächen-Modells . . . . .	27
3.2	3D-Modell des Burgfräuleins mit und ohne Textur . . . . .	29
4.1	Kalibrierplatte zum Ermitteln der intrinsischen und extrinsischen Kameraparameter . . . . .	32
4.2	Funktionsprinzip der Photogrammetrie . . . . .	33
4.3	Einsatz eines Streifenlichtscanners zum Digitalisieren einer historischen Handgranate . . . . .	34
4.4	Idee des Funktionsprinzips eines Streifenlichtscanners . . . . .	34
4.5	Beispielhaftes Projektionsmuster eines Streifenlichtscanners . . . . .	35
4.6	Funktionsprinzip eines Laserscanners, der auf dem <i>Time-of-flight</i> -Prinzip basiert . . . . .	37
4.7	Funktionsprinzip eines Triangulations-Laserscanners . . . . .	38
4.8	Funktionsprinzip eines Computertomographen . . . . .	39
5.1	Messbereich des verwendeten Laserscanners . . . . .	41
5.2	Der für die Experimente verwendete Laserscanner <i>Micro-Epsilon scan-CONTROL 2600-100</i> . . . . .	42
5.3	Ein beispielhaftes Höhenprofil beim Digitalisieren eines Tondeckels . . . . .	42
5.4	Das Objekt wird auf einem manuell verschiebbaren Tisch unter dem Laserscanner bewegt. . . . .	44

5.5	Frontansicht des verwendeten handgeführten Streifenlichtscanners <i>Artec Spider</i> . . . . .	47
5.6	Aufbau zur photogrammetrischen Digitalisierung mit Drehteller . . . . .	50
6.1	Digitalisierung des Tondeckels mittels Laserscanner . . . . .	52
6.2	Einzelaufnahmen des Kerzenhalters durch Laserscanner mit unterschiedlicher Schattenbildung je nach Ausrichtung des Objekts . . . . .	53
6.3	Registrierte Aufnahmen der Handgranate mittels Laserscanner . . . . .	54
6.4	Probleme bei der Digitalisierung des Vorhängeschlosses mittels Laserscanner	55
6.5	Digitalisierung des Holztellers mittels Laserscanner . . . . .	57
6.6	Digitalisierung des Arzneifläschchens mittels Laserscanner . . . . .	57
6.7	Digitalisierung des Holztellers mittels Laserscanner . . . . .	58
6.8	Die geringe Ausbeute an Messpunkten macht den für eine Digitalisierung des Scheibenleuchters mittels Laserscanner notwendigen Aufwand deutlich.	59
6.9	Die Qualität der mittels Laserscanner erfassten Daten ist bei stark reflektierenden Oberflächen, wie der Rückseite des Bahrtuschildes, deutlich schlechter als bei matten Oberflächen. . . . .	60
6.10	Durch einen stationären Streifenlichtscanner gewonnenes Modell des Tondeckels ohne und mit Textur . . . . .	61
6.11	Ergebnis einer Erfassung des Kerzenhalters über einen stationären Streifenlichtscanner . . . . .	61
6.12	Digitalisierung von Handgranate und Vorhängeschloss mittels des stationären Streifenlichtscanners . . . . .	62
6.13	Digitalisierung von Holzteller und Arzneifläschchen mittels des stationären Streifenlichtscanners . . . . .	63
6.14	Mittels Streifenlichtscanner erstelltes Modell des Scheibenleuchters . . . .	65
6.15	Digitalisierung von Bahrtuschild und Hermes mittels des stationären Streifenlichtscanners . . . . .	66
6.16	Via Streifenlichtscanner gewonnenes Modell des Burgfräuleins . . . . .	68
6.17	Computermodell einer Medaille, welches mithilfe eines stationären Streifenlichtscanners gewonnen wurde . . . . .	69
6.18	Durch handgeführten Streifenlichtscanner erstelltes Modell des Tondeckels	70
6.19	Computermodell des Kerzenhalters . . . . .	71
6.20	Modell der Handgranate, welches mittels Artec Spider erstellt wurde . . .	71
6.21	Computermodell des Vorhängeschlosses . . . . .	73
6.22	Durch Artec Spider gewonnenes Modell des Holztellers . . . . .	74
6.23	3D-Modell des Scheibenleuchters mit aufgebrauchten Markern . . . . .	77
6.24	Computermodell des Bahrtuschilds . . . . .	78
6.25	Mittels Artec Spider erfasstes Modell des Hermes . . . . .	79
6.26	3D-Modell des Burgfräuleins . . . . .	80
6.27	Mittels Artec Spider erzeugtes Modell der Medaille . . . . .	82
6.28	3D-Modell des Bronzekopfs . . . . .	83
6.29	Über Photogrammetrie erstelltes Computermodell des Tondeckels . . . . .	85

6.30	Bilder der zwei Versuche der photogrammetrischen Erfassung des Kerzenhalters . . . . .	86
6.31	Über Photogrammetrie erstelltes Computermodell der Handgranate . . .	87
6.32	Digitalisierung des Holztellers mittels Photogrammetrie . . . . .	89
6.33	Über Photogrammetrie erstelltes Computermodell des Arzneifläschchens .	90
6.34	Sechs unterschiedliche für die Erfassung des Scheibenleuchters mittels Photogrammetrie verwendete <i>Coded Targets</i> . . . . .	91
6.35	Photogrammetrisch gewonnenes Modell des Scheibenleuchters . . . . .	92
6.36	Ergebnis der photogrammetrischen Erfassung des Bahrtuchschilds . . . .	93
6.37	Digitalisierung des Passauer Tölpels mittels Photogrammetrie . . . . .	95
6.38	Aus den Volumendaten extrahiertes Oberflächenmodell des Tondeckels .	96
6.39	Oberflächenmodell des Kerzenhalters, das aus dem via Computertomographie gewonnenen Volumenmodell erstellt wurde . . . . .	97
6.40	Aus Volumendaten gewonnenes Oberflächenmodell der Handgranate . . .	97
6.41	Das Oberflächenmodell des Vorhängeschlosses weist gleichzeitig sowohl Löcher in der Oberfläche als auch Artefakte auf . . . . .	98
6.42	Akkurate Details im Modell des Holztellers . . . . .	99
6.43	Exzellente Qualität des Oberflächenmodells des Arzneifläschchens . . . .	100
6.44	Aus den Volumendaten extrahiertes Oberflächenmodell des Krugs . . . .	101
6.45	Unterschiedliche Ansichten der CT-Daten der Votivkrone . . . . .	102
9.1	Darstellung des Inneren einer peruanischen Mumie . . . . .	129
9.2	Mittels FFF-Drucker erzeugte Bronzeköpfe in unterschiedlichen Auflösungen	135
9.3	Mittels Stereolithografie-Drucker erzeugter Ausdruck der Votivkrone . . .	136
9.4	Mittels Stereolithografie-Drucker erzeugte Miniatur der Veste Oberhaus .	136
9.5	Gesamtansicht eines mittels FFF-Drucker erzeugten Drucks der Veste Oberhaus . . . . .	137
9.6	Mittels FFF-Drucker erzeugter Druck der Veste Oberhaus . . . . .	138
9.7	FFF-Drucker während des Druckens der Veste Oberhaus . . . . .	138

# Tabellenverzeichnis

7.1	Eignung der Digitalisierungsverfahren für Objekte unterschiedlicher Größe	105
7.2	Eignung der Digitalisierungsverfahren für unterschiedliche Oberflächengleichheiten	106
7.3	Eignung der Digitalisierungsverfahren für Objekte mit unterschiedlichen Merkmalen	109
7.4	Eignung der Digitalisierungsverfahren für transparente Objekte	110
7.5	Eignung der Digitalisierungsverfahren für matte und spiegelnde Objekte	111
7.6	Eignung der Digitalisierungsverfahren für flache und gleichförmige Objekte	114
7.7	Auswirkungen von flachen und tiefen Selbstverdeckungen auf unterschiedliche Digitalisierungsverfahren	116
7.8	Eignung der Digitalisierungsverfahren für Materialien mit unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten	117
8.1	Geschätzte Materialkosten für die Digitalisierung mittels Laserscanner	119
8.2	Ungefähre Materialkosten für den verwendeten stationären Streifenlichtscanner	120
8.3	Ungefähre Materialkosten für die Digitalisierung durch einen handgeführten Streifenlichtscanner	120
8.4	Ungefähre Materialkosten für photogrammetrische Erfassung unter Studiobedingungen	121
8.5	Ungefähre Materialkosten für photogrammetrische Erfassung im Freien	121
8.6	Vergleich der geschätzten Materialkosten für die betrachteten Digitalisierungsverfahren	122
8.7	Portabilität der betrachteten Geräte zur Digitalisierung	124
8.8	Für die einzelnen Digitalisierungsverfahren erforderliche Kenntnisse und Erfahrungen	127
9.1	Informationen über das Objekt, die durch unterschiedliche Digitalisierungsverfahren gewonnen werden können	129
9.2	Zusammenfassung der Abstraktionen der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse	140

# Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
CT	Computertomographie
FBP	Gefilterte Rückprojektion
FFF	Fused filament fabrication
LED	Light-emitting diode
LiDAR	Light detection and ranging
OHM	Oberhausmuseum Passau
SLS	Streifenlichtscanner
STL	Stereolithographie
USB	Universal Serial Bus
ViSIT	Virtuelle Verbund-Systeme und Informations-Technologien für die touristische Erschließung von kulturellem Erbe

# Vorwort

Diese Arbeit wurde im Rahmen des INTERREG-Projekts ViSIT (Virtuelle Verbund-Systeme und Informations-Technologien für die touristische Erschließung von kulturellem Erbe) am Institut FORWISS der Universität Passau, das von Herrn Prof. Dr. Tomas Sauer geleitet wird, erstellt.

Der Großteil der Beispielobjekte wurde der Universität durch das Oberhausmuseum Passau (OHM), das Partner im ViSIT-Projekt ist, zur Verfügung gestellt. Im Rahmen des Projekts wurden im Auftrag des Museums weitere Digitalisierungen durch Herrn Benedikt Krieger durchgeführt. Die Beschreibungstexte zu den Objekten in Kapitel 2 stammen größtenteils von Frau Frauke Grams, Projektmitarbeiterin am Oberhausmuseum Passau und wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Kunstgeschichte und Bildwissenschaft an der Universität Passau.

Bei den Experimenten bezüglich Digitalisierung mittels Photogrammetrie wurde der Autor unterstützt durch Herrn Marek Pršín, zeitweise tätig als studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für Digital Humanities an der Universität Passau.

Die CT-Ansichten der Votivkrone wurden von Herrn Andreas Michael Stock, der wie der Autor am Institut FORWISS der Universität Passau tätig ist, generiert und für diese Arbeit zur Verfügung gestellt.

Die 3D-Drucke wurden größtenteils von Frau Dörte Rübeler, die am Lehrstuhl für Mathematik mit Schwerpunkt Digitale Bildverarbeitung der Universität Passau tätig ist, und Herrn Thomas Lang, der ebenfalls Mitarbeiter am Institut FORWISS ist, durchgeführt.

# 1 Einführung

Durch den technischen Fortschritt wird die Digitalisierung von kulturellem Erbe stetig genauer, einfacher und günstiger. Durch sie bieten sich sowohl für Fachleute als auch für Laien zahlreiche neue Möglichkeiten und Vorteile. Gerade durch die Zerstörung einiger historischer Stätten in den letzten Jahren wird deutlich, wie wichtig eine exakte Erfassung von Kulturgut sein kann. Allerdings ist der Vorgang der Digitalisierung trotz zahlreicher Vereinfachungen immer noch nicht trivial und erfordert einerseits die richtige Ausrüstung, andererseits aber auch ein gewisses Know-How.

In [48] werden einige Möglichkeiten und Vorteile der Digitalisierung von kulturellem Erbe aufgezeigt, welche an dieser Stelle kurz zusammengefasst werden:

1. *Digitale Archive*: Mithilfe von Digitalisierung lassen sich im Vergleich zu händischen Methoden einfach Archive von 3D-Modellen erstellen, die keinerlei Zerfall unterliegen und daher als Referenz verwendet werden können.
2. *Hochgenaue Replikat*e: Mithilfe neuartiger Fertigungsmethoden, wie beispielsweise 3D-Druckern, lassen sich ausgehend von einem 3D-Modell hochgenaue Kopien des originalen Objekts erstellen, die nicht nur für Vermarktungszwecke eingesetzt werden können, sondern auch verwendet werden können, wenn das originale Artefakt nicht an der gewünschten Stelle (beispielsweise im Freien) ausgestellt werden kann oder Besuchern eine intensivere Interaktion (beispielsweise durch Berühren) ermöglicht werden soll.
3. *Fern-Ausstellung*: Durch digitale 3D-Modelle oder anhand dieser erstellte Replikate ist es nicht mehr notwendig, dass das originale Objekt vor Ort ist. Es kann beispielsweise für Restaurierungsarbeiten durch eine Kopie ersetzt werden.
4. *Digitale Restauration*: Durch virtuelle Restaurationen können beispielsweise verlorengegangene Teile des Objekts oder nicht mehr erkennbare Malereien an der Objektoberfläche nachgebildet werden, ohne das originale Artefakt modifizieren zu müssen.
5. *Überwachung und Beobachtung von kulturellem Erbe*: Durch digitale Erfassungen können beispielsweise durch Umwelteinflüsse im Freien hervorgerufene Veränderungen am Artefakt frühzeitig erkannt werden, woraufhin gegebenenfalls eine passende Reaktion erfolgen kann.

Im Rahmen des INTERREG-Projekts ViSIT (Virtuelle Verbund-Systeme und Informations-Technologien für die touristische Erschließung von kulturellem Erbe) wurden verschiedene Digitalisierungsverfahren experimentell untersucht. Neben Laserscannern

und Streifenlichtscannern (SLS) wurde auch Photogrammetrie und Computertomographie betrachtet. Dazu wurden verschiedene Beispielobjekte mit jeweils unterschiedlichen Herausforderungen ausgewählt und Versuche mit den Digitalisierungsverfahren durchgeführt. Diese Beispielobjekte werden im folgenden Kapitel vorgestellt, woraufhin in Kapitel 3 wichtige Grundbegriffe eingeführt werden und in Kapitel 4 die Funktionsweise der betrachteten Digitalisierungsverfahren kurz erläutert wird. In den darauffolgenden Kapiteln 5 und 6 werden zunächst der Aufbau sowie die Durchführung und anschließend die Ergebnisse der durchgeführten Experimente ausführlich geschildert. In Kapitel 7 werden die anhand der Beispielobjekte gewonnenen Erkenntnisse zu allgemeinen Objekteigenschaften abstrahiert, um generellere Aussagen treffen zu können. Im darauffolgenden Kapitel 8 werden weitere die Auswahl eines Digitalisierungsverfahrens beeinflussende Faktoren behandelt. Abschließend werden in Kapitel 9 die gewonnenen Ergebnisse zusammengefasst und verglichen.

## 2 Beispielobjekte

In diesem Kapitel erfolgt eine kurze Einführung in die verwendeten Beispielobjekte, um die unten aufgeführten Ergebnisse der Digitalisierungsexperimente besser interpretieren zu können. Da ein Teil der Objekte nur für eine begrenzte Zeit zur Verfügung stand oder nicht portabel war, konnten nicht alle Digitalisierungsverfahren anhand aller Beispielobjekte evaluiert werden. Außerdem konnten durch die zeitliche Beschränkung bei der Verwendung eines Computertomographen nicht alle Objekte mittels dieses Verfahrens erfasst werden. Hier zeigt sich bereits ein erstes Kriterium für die Auswahl eines geeigneten Digitalisierungsverfahrens: die Verfügbarkeit der notwendigen Gerätschaften.

Alle Objekte mit Ausnahme des Bronzekopfs (Galerie König-Schalinski) und des Passauer Tölpels (Stadt Passau) sind Eigentum des Oberhausmuseums Passau (OHM).

### **Tondeckel**

*Inventar-Nummer OHM:* III 126

*Bezeichnung:* Flachdeckel mit Knauf

*Jahr:* 14./15. Jh.

*Material:* Oxidierend gebrannte, unglasierte Irdenware

*Maße:* Höhe: 2,7 cm, Durchmesser: 9,5 cm

Der aus dem Spätmittelalter stammende Flachdeckel (siehe Abb. 2.1) wurde in den 1980er Jahren bei Ausgrabungsarbeiten auf der sogenannten „Batterie Maus“, einer Geschützbastei der Veste Oberhaus, gefunden. Das Objekt schmücken mehrere in das Material eingedruckte Kreuze, die auf eine einstige hervorgehobene Verwendung hindeuten [61, S. 110, Nr. B I/12].

### **Kerzenhalter**

*Inventar-Nummer OHM:* XI, 91/136

*Bezeichnung:* Kerzenleuchter

*Jahr:* 15.-17. Jh.

*Material:* Reduzierend gebrannte Irdenware

*Maße:* Höhe: 5 cm

Der teils fragmentierte Kerzenleuchter (siehe Abb. 2.2) stammt aus dem 15.-17. Jahrhundert und wurde bei Grabungsarbeiten auf der Veste Oberhaus gefunden. Ursprünglich war er mit einem Griff versehen, der den Leuchter zu einer tragbaren Lichtquelle machte [14, S. 83, E 3.1].



Abbildung 2.1: Tondeckel



Abbildung 2.2: Kerzenhalter



Abbildung 2.3: Handgranate

### **Handgranate**

*Inventar-Nummer OHM:* 15154

*Bezeichnung:* Brandgranate

*Jahr:* 16./17. Jh.

*Material:* Oxidierend gebrannte Irdenware

*Maße:* Durchmesser: ca 12 cm

Die leere Brandgranate (siehe Abb. 2.3) stammt wohl aus der frühen Neuzeit. Zur Benutzung wurde sie mit Schwarzpulver befüllt und mit einer durch die Öffnung laufenden Luntschnur versehen [60, S. 32].

### **Vorhängeschloss**

*Inventar-Nummer OHM:* III 56

*Bezeichnung:* Vorhängeschloss

*Jahr:* 15./16. Jh.

*Material:* Eisen

*Maße:* Höhe: 8,5 cm, Breite: 7 cm, Tiefe: 3 cm

Das teils fragmentierte, eiserne Vorhängeschloss (siehe Abb. 2.4) besteht aus einem dreieckigem Schlosskörper mit Schlüssellochscharte und einem halbrunden Bügel, der sich nach oben öffnen lässt. Es wurde bei Grabungsarbeiten auf der Veste Oberhaus in den 1980er Jahren gefunden. Seine Entstehungszeit ist auf das 15./16. Jahrhundert anzusetzen [14, S. 70, D 6.4.1].



Abbildung 2.4: Vorhängeschloss

### **Holzteller**

*Inventar-Nummer OHM: X 134*

*Bezeichnung: Holzteller*

*Jahr: 15. Jh.*

*Material: Laubholz*

*Maße: Höhe: ca. 5,3 cm, Durchmesser: ca. 19 cm*

Der Holzteller (siehe Abb. 2.5) wurde bei Grabungsarbeiten in den 1980er Jahren auf der Veste Oberhaus gefunden und ist bis auf kleinere Fehlstellen am Rand vollständig. Seine Entstehungszeit ist auf das 15. Jahrhundert angesetzt. Zur Anfertigung solcher Teller wurde mit Vorliebe Fichte, Kiefer, Ulme und Birke verwendet [61, S. 80, Nr. 110].

### **Arzneifläschchen**

*Inventar-Nummer OHM: IX, 20*

*Bezeichnung: Arzneifläschchen*

*Jahr: 17.-19. Jh.*

*Material: Lampenglas?*

*Maße: Höhe: 10 cm, Durchmesser: 4,5 cm*

Das als Arzneifläschchen (siehe Abb. 2.6) bezeichnete Fundobjekt stammt aus der Befüllung eines Schalenturms in der 2. Umfassungsmauer um die Veste Oberhaus. Es enthält Reste eines unbekanntes, rötlichen staubigen Inhalts und stammt wohl aus dem 17.-19. Jahrhundert [14, S. 63, D.3.3.2].



Abbildung 2.5: Holzteller



Abbildung 2.6: Arzneifläschchen



Abbildung 2.7: Krug

### **Krug**

*Bezeichnung:* Rohrkanne

*Jahr:* 15./16. Jh.

*Material:* Reduzierend gebrannte Irdenware

Diese Kanne (siehe Abb. 2.7) wurde in den 1980er Jahren in der Befüllung eines Schalenturms gefunden, der zur Wehrmauer der Veste Oberhaus gehört. Eine solche Art von Siebkanne zum Trennen von groben Materialien wurde noch selten nachgewiesen. Ihre erotischen Applikationen an der Tülle lassen auf eine scherzhafte Verwendung schließen [62, S. 112].

### **Scheibenleuchter**

*Bezeichnung:* Scheibenleuchter

*Jahr:* Anfang 16. Jahrhundert

*Material:* Messing

*Maße:* Höhe: 50 cm, Durchmesser: 16,5 cm

Der Scheibenleuchter (siehe Abb. 2.8) aus dem 16. Jahrhundert trägt über seinem profilierten Fuß drei scheibenförmige Erweiterungen. Auf der Tropfschale befindet sich der Kerzenhalter. Das Objekt ist Teil eines Paares, welches durch seine Größe auf eine Verwendung als Altarleuchter deutet.



Abbildung 2.8: Scheibenleuchter



Abbildung 2.9: Bahrtuchschild

### **Bahrtuchschild**

*Bezeichnung:* Bahrtuchschild

*Jahr:* 1762

*Material:* Versilbertes Kupfer?

*Maße:* Höhe: 33,5 cm, Breite: 30,5 cm

Dieses als Kartusche gefertigte Bahrtuchschild (siehe Abb. 2.9) zeigt die Gottesmutter Maria mit Zepter und Christuskind sowie den Bischof Nikolaus in einem Zierrahmen. Bahrtuchschilder wurden bei Beerdigungen von Bruderschaften als Schmuck auf den Sarg von verstorbenen Mitgliedern gelegt. Hier handelt es sich um das Schild der Passauer Schiffsleute und Salzfertiger, das die beiden Zunfttheiligen zeigt [27, S. 84, Nr. E.3.9].

### **Hermes**

*Inventar-Nummer OHM:* 09053

*Bezeichnung:* Ruhender Hermes

*Jahr:* 1896-1905

*Material:* Unglasiertes Porzellan

*Maße:* Höhe: 19 cm

Die Figur des ruhenden Hermes (siehe Abb. 2.10) wurde zwischen 1896-1905 in der Passauer Porzellanmanufaktur Lenck gefertigt. Die Skulptur bildet die antike Gottheit als Götterboten nach der bekannten Ikonographie einer im 18. Jahrhundert in Neapel entdeckten Bronzeskulptur ab, die vermutlich aus dem Umkreis des Lysippos stammt.

### **Burgfräulein**

*Bezeichnung:* Höfische Dame auf Scherenstuhl

*Jahr:* 1. Viertel 20. Jahrhundert

*Material:* Porzellanmanufaktur Lenck, Glasiertes Porzellan mit Unterglasurmalerei

*Maße:* Höhe: 20,5 cm



Abbildung 2.10: Hermes



Abbildung 2.11: Burgfräulein

Die glasierte Porzellanfigur (siehe Abb. 2.11) wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts in der Porzellanmanufaktur Lenck gefertigt. Sie zeigt eine den damaligen Vorstellungen entsprechendes Edelfräulein in höfischem Gewand mit Jagdvogel [26, S. 139, 10/27].

### **Medaille**

*Bezeichnung:* Medaille

*Jahr:* 1900

*Material:* Silber

*Maße:* Durchmesser: 6,2 cm

Die Medaille (siehe Abb. 2.12), wurde, wie die Inschrift besagt, der Passauer Porzellanmanufaktur Dressel, Kister und Co. auf der Weltausstellung in Paris im Jahr 1900 verliehen. Sie bildet auf der Vorderseite zwei Siegesgötter über dem Grand Palais ab, das anlässlich der Schau errichtet wurde. Die Rückseite ziert der Kopf der französischen Nationalfigur Marianne unter einer großen Eiche, im Hintergrund die Île de la Cité in Paris.



(a) Vorderseite



(b) Rückseite

Abbildung 2.12: Medaille

**Bronzekopf** Der „Bronzekopf“ ist eine von der Passauer Künstlerin Renate König-Schalinski gestaltete Skulptur aus Bronze, die den im Jahr 1909 geborenen Dr. Antonius Hofmann darstellt, der von 1968 bis 1984 Bischof von Passau war. Eine Abbildung der Skulptur ist in Abbildung 2.13 zu sehen.

**Passauer Tölpel** Der Passauer Tölpel (siehe Abb. 2.14) stellt eines der Wahrzeichen der Stadt Passau dar. Das dümmliche aber gutmütige Lächeln verschaffte dem Granitkopf anscheinend seinen Namen. Die ersten schriftlichen Hinweise auf den Kopf sind auf das Jahr 1673 datiert. Die genaue Geschichte lässt sich heute aber nicht mehr ermitteln [49].

### Votivkrone

*Bezeichnung:* Votivkrone

*Jahr:* 1718/36

*Material:* Klosterarbeit (Edelsteine, Süßwasserperlen, Goldfaden, Leonischer Draht, Goldpailletten, Emaillé) (Künstler: Kloster Englische Fräulein)

Bei der um 1720 gefertigten Votivkrone (siehe Abb. 2.15) handelt es sich um eine Klosterarbeit, die ursprünglich das Haupt einer Silbermadonna in der äußeren Burgkapelle zu Burghausen schmückte. In der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts entwickelte sich die Legende, es handle sich um die Brautkrone, die Hedwig von Polen bei der berühmten Landshuter Hochzeit 1475 getragen haben soll. Im Objekt wurden einige ältere Schmuckstücke verarbeitet, die aus dem 16. Jahrhundert stammen.

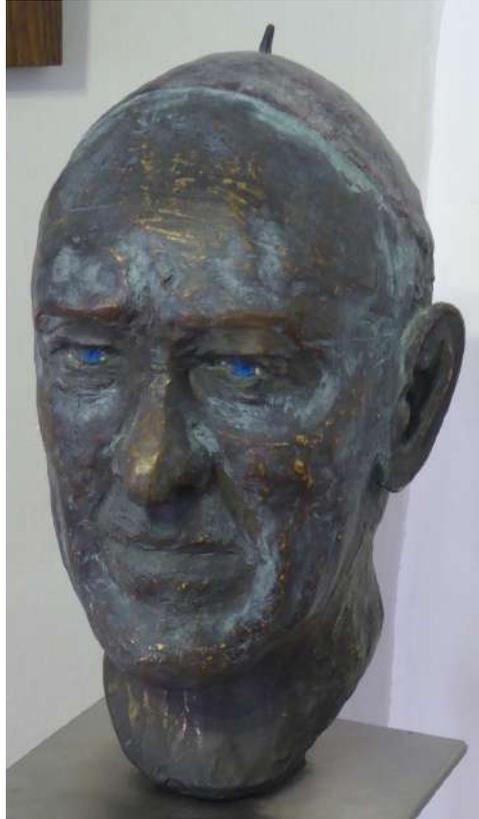


Abbildung 2.13: Bronzekopf



Abbildung 2.14: Passauer Tölpel



Abbildung 2.15: Votivkrone (Bildnachweis: „Foto: Fotoatelier Kaps“, Freundlicherweise zur Verfügung gestellt vom Oberhausmuseum Passau)

# 3 Grundlagen und Terminologie

Dieses Kapitel dient dazu, die wichtigsten Grundbegriffe im Bezug auf 3D-Modelle zu definieren, um dem Leser einerseits zu ermöglichen, den folgenden Ausführungen folgen zu können, und andererseits vielleicht sogar eine kleine Hilfestellung beim ersten Umgang mit 3D-Modellen zu sein. Allerdings ist dieses Kapitel weit entfernt von einer vollständigen Einführung zu diesem umfangreichen Thema.

## 3.1 Geometrie von 3D-Modellen

Ein digitales 3D-Modell lässt sich als mathematische Repräsentation der dreidimensionalen Geometrie (und ggf. auch anderer Eigenschaften) eines real existierenden Objekts oder eines künstlich am Rechner erstellten Objekts verstehen. Hierbei gilt es zwischen zwei grundlegend verschiedenen Konzepten zu unterscheiden.

**Volumendaten** Das Modell enthält Informationen über das gesamte Volumen des Objekts, also nicht nur dessen Oberfläche, sondern auch dessen Inneres. Für jeden Punkt innerhalb eines dreidimensionalen Rasters wird dazu ein Wert angegeben, wie „dicht“ das Material des Objekts an dieser Stelle ist. Details zu dieser „Dichte“ sind in Abschnitt 4.4 zu finden.

Die Rasterung unterteilt den dreidimensionalen Raum in kleine Würfel, was eine starke Ähnlichkeit zu digitalen Bildern hat, die in kleine (zweidimensionale) Quadrate unterteilt sind, die *Pixel* genannt werden. Aus diesem Grund liegt die Bezeichnung *Voxel* für ein solches „dreidimensionales Pixel“ innerhalb eines Volumendatenmodells nahe. Die Kantenlänge eines solchen Voxels beschreibt die Auflösung des Modells.

Derartige Volumendaten enthalten eine große Menge an Informationen, erfordern daher aber enorm viel Speicherplatz. Volumendaten werden von Computertomographen erzeugt und sind daher beispielsweise in medizinischen Anwendungen üblich. Gebräuchliche Dateiformate sind zum Beispiel das REK- (Fraunhofer EZRT Volume Data) oder das DICOM-Format [9].

**Oberflächendaten** Im Gegensatz zu Volumendaten enthält ein solches Modell nur Informationen über die Oberfläche eines Objekts, während keine Daten über das Innere des Objekts vorliegen. Im Vergleich eines Volumendatenmodells mit einem digitalen Bild entsprechen die Oberflächendaten den Kanten im Bild.

Solche 3D-Modelle bestehen aus mehreren Punkten im dreidimensionalen Raum, die *Vertices* genannt werden. Diese Punkte werden zu Flächen, den sogenannten *Faces* verbunden, wobei es sich hier in vielen Fällen um Dreiecke handelt. Die Anzahl der Ecken

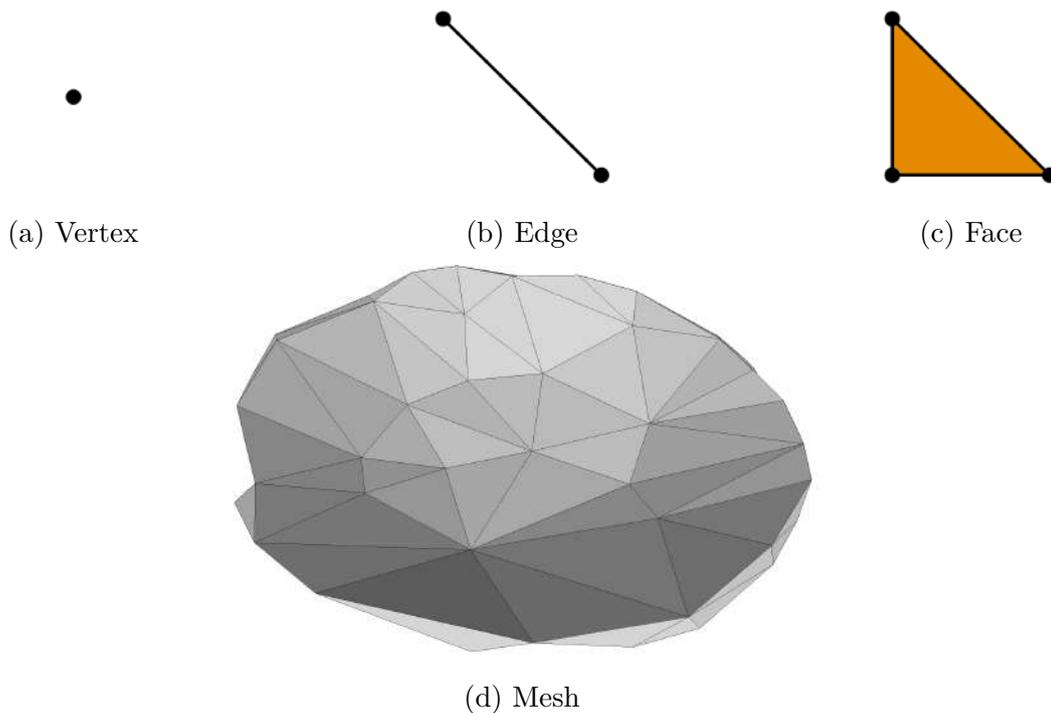


Abbildung 3.1: Grundlegende Elemente der Geometrie eines Oberflächen-Modells

eines Faces wird als dessen *Ordnung* bezeichnet. Die Kanten dieser Flächen, die Verbindungen zwischen zwei Vertices darstellen, werden *Edges* genannt. Die Gesamtheit aller Vertices und Faces eines 3D-Modells wird auch als *Mesh* bezeichnet. Die soeben genannten Begriffe werden in Abbildung 3.1 grafisch dargestellt.

Oberflächendaten werden meist für die Visualisierung dreidimensionaler Objekte am Rechner verwendet, wie beispielsweise in Computerspielen, weshalb diese von modernen Grafikkarten effizient verarbeitet werden können. Gebräuchliche Dateiformate sind zum Beispiel das STL- [18], das PLY- [17] [13], das OBJ- [50] oder das VRML-Format [58].

**Mannigfaltigkeit** Bei Meshes, die ein reales Objekt beschreiben, sollte dieses mathematisch ausgedrückt möglichst einer orientierbaren stetigen zweidimensionalen Mannigfaltigkeit, die in den dreidimensionalen Raum eingebettet ist, entsprechen [12, S. 3]. Dies hat zur Folge, dass für jeden Punkt im Raum eindeutig entschieden werden kann, ob er im Inneren oder im Äußeren des Objekts liegt. Dies impliziert beispielsweise, dass kein Edge Teil von mehr als zwei Faces sein kann. Jedoch sind auch an die Vertices bestimmte Bedingungen zu stellen, wobei für Details auf [12, S. 11f] verwiesen wird. Sind diese Eigenschaften erfüllt, so wird der Mesh als *mannigfaltig* oder *manifold* bezeichnet. Werden Volumendaten auf eine sinnvolle Art und Weise in Oberflächendaten überführt, so ist das entstehende Oberflächenmodell automatisch mannigfaltig.

**Topologie** Wird von der *Topologie* eines 3D-Modells gesprochen, so wird von der konkreten Form der Objekt Oberfläche abstrahiert. Zwei Objekte sind topologisch äquivalent,

wenn es eine stetige Verformung gibt, die das eine in das andere Objekt verwandelt. So sind beispielsweise Deckel, Kerzenhalter, Medaille und eine Kugel topologisch äquivalent. Anders sieht es bei Objekten aus, die „Löcher“ in ihrer Formung haben. Ein Beispiel für ein solches Loch ist der Griff des Krugs. Dieses Loch kann durch stetige Verformungen nicht geschlossen werden, weshalb der Krug topologisch nicht äquivalent zu einer Kugel oder der Medaille ist. Auch feine Risse wie beim Vorhängeschloss stellen solche topologischen Löcher dar, die, wie sich später herausstellen wird, eine Herausforderung beim Digitalisieren sind. Die Algorithmen zur Oberflächenrekonstruktion schließen diese Risse nämlich oftmals, wodurch sich die Topologie des 3D-Modells von der Topologie des Originalobjekts unterscheiden kann. Von den Beispielobjekten weisen neben Krug und Vorhängeschloss auch das Burgfräulein, der Hermes und die Votivkrone Löcher auf, und sind daher nicht topologisch äquivalent zu einer Kugel.

## 3.2 Textur von 3D-Modellen

Insbesondere für eine ansprechende Visualisierung ist ein 3D-Modell, das nur aus der Geometrie eines Objektes besteht, oft nicht ausreichend, da es keinerlei Informationen über die Färbung und sonstige optische Eigenschaften der Objektoberfläche enthält. Da sich diese Eigenschaften stets auf die Objektoberfläche beziehen, können sie in der Regel nur auf Oberflächendaten angewandt werden. Die Färbung der Objektoberfläche wird als *Textur* bezeichnet und ihr kommt eine äußerst wichtige Bedeutung für das visuelle Erlebnis beim Betrachten des Modells zu. Als Beispiel wird in Abbildung 3.2 ein und dasselbe 3D-Modell einmal mit und einmal ohne Textur dargestellt.

Nicht jedes Digitalisierungsverfahren ist in der Lage, Texturdaten zu erfassen, so beispielsweise ein Computertomograph oder ein Laserscanner. Die Textur wird in der Regel getrennt von den eigentlichen Geometriedaten in einer separaten Bild-Datei gespeichert, die als *Texturatlas* bezeichnet wird. Für jedes Face wird dann durch die sogenannten *Texturkoordinaten* festgelegt, welcher Ausschnitt des Textur-Bildes auf diesem Dreieck angezeigt wird. Pro Face werden also für jeden Eckpunkt zwei Werte gespeichert, durch welche eine eindeutige Position im Bild definiert wird. Da bei den meisten Vertices alle angrenzenden Faces die gleichen Texturkoordinaten verwenden, wird dieses Paar von Werten beispielsweise bei OBJ-Dateien nur einmal gespeichert, worauf anschließend bei der Beschreibung der Faces indexbasiert zugegriffen wird.

Manchem Leser stellt sich hier die Frage, ob generell die Verwendung von einem Paar Texturkoordinaten pro Vertex, welches dann für alle angrenzenden Faces verwendet wird, nicht ausreichend wäre. Hier spielt jedoch die Geometrie des 3D-Modells, genauer deren *Topologie*, eine wichtige Rolle. Entspricht diese einer (verzerrten) Ebene, so wäre diese Vereinfachung in der Tat ausreichend. Betrachtet man aber beispielsweise eine Kugel, so lässt sich das zweidimensionale Bild nicht über die Kugel legen, ohne dass eine Kante entsteht, an welcher mindestens zwei Ränder des Bildes aneinandergrenzen. Genau entlang dieser Linie, dem sogenannten *Texture Seam*, befinden sich dann die Vertices, für welche je nach angrenzendem Face verschiedene Texturkoordinaten verwendet werden müssen. Unabhängig von der soeben dargelegten Notwendigkeit dieser Texture Seams



(a) Modell mit Textur



(b) Modell ohne Textur

Abbildung 3.2: 3D-Modell des Burgfräuleins mit und ohne Textur

lässt sich durch eine sinnvolle Unterteilung der Textur auch die Qualität erhöhen, indem für alle Bereiche des 3D-Modells eine ähnliche Auflösung verwendet wird und durch starke Streckungen oder Stauchungen verursachte Verzerrungen der Textur auf dem Modell minimiert werden.

Neben der Textur gibt es noch weitere Möglichkeiten, die Oberfläche eines Modells realistischer darstellen zu können. So kann beispielsweise das Reflektanzverhalten festgelegt werden. Auf diese Möglichkeiten wird in dieser Arbeit jedoch nicht näher eingegangen, da keines der betrachteten Digitalisierungsverfahren bzw. Geräte diese Daten liefert.

### 3.3 Weitere Begriffe

**Punktewolke** Viele Digitalisierungsverfahren liefern nicht direkt ein Oberflächenmodell in Form eines Meshes, sondern eine nicht weiter strukturierte oder organisierte Menge an Messpunkten, die insbesondere nicht durch Edges miteinander verbunden sind. Solche Mengen treten auch in anderen Kontexten auf und werden oft als *Punktewolke* bezeichnet. Im betrachteten Fall stellen sie die Rohdaten dar, die es durch softwareseitige Verarbeitung in ein 3D-Modell in Form eines Meshes zu überführen gilt.

**Registrierung** Als *Registrierung* bezeichnet man einen Verarbeitungsschritt, bei welchem zwei oder mehrere oft partiellen Modelle eines Objekts, die sich in einem gewissen Bereich überlappen, aneinander ausgerichtet werden und somit in ein einheitliches Koordinatensystem überführt werden. Es werden also zusammengehörige Bereiche auf den Eingabedaten entweder durch den Benutzer angegeben oder automatisiert gesucht, woraufhin diese Korrespondenzen meist durch Drehungen und Verschiebungen der Eingabemodelle aufeinander abgebildet werden sollen. Dieses Überführen in ein gemeinsames Koordinatensystem ist ein wichtiger Schritt bei der Erstellung eines vollständigen 3D-Modells und kann auf Punktewolken, Oberflächen- oder Volumendaten durchgeführt werden.

**Segmentierung** Ein wichtiger Verarbeitungsschritt in der Bildverarbeitung ist die *Segmentierung*. Darunter versteht man das Unterteilen eines Bildes oder anderer Daten in inhaltlich zusammengehörige Regionen [25, S. 567]. Diese Aufgabe stellt sich auch bei der Verarbeitung einiger Rohdaten, die bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimenten entstanden sind: So müssen eventuelle Halterungen, die für den Digitalisierungsprozess notwendig waren, vom eigentlichen Objekt getrennt werden, um ein finales Modell ohne diese unerwünschten Bestandteile erzeugen zu können.

**Nachbearbeitung** Unter *Nachbearbeitung* wird im Rahmen dieser Arbeit die nachträgliche Verarbeitung der Geometrie und/oder der Textur eines bereits erstellten 3D-Modells verstanden, mithilfe derer während des Scan-Vorgangs oder der anschließenden Verarbeitung entstandene Artefakte manuell korrigiert werden sollen.

## 4 Digitalisierungsverfahren

In diesem Kapitel wird die grobe Funktionsweise der zum Einsatz kommenden Digitalisierungsverfahren kurz erläutert. Neben der Photogrammetrie, der Computertomographie, sowie Streifenlicht- und Laserscannern gibt es selbstverständlich noch weitere Methoden oder Varianten der beschriebenen Verfahren, mithilfe derer Objekte dreidimensional erfasst werden können, wovon auf einige in [47] eingegangen wird. Diese werden im Rahmen dieser Arbeit aber nicht behandelt.

### 4.1 Photogrammetrie

Die Grundidee der Photogrammetrie ist die Rekonstruktion eines dreidimensionalen Modells aus herkömmlichen zweidimensionalen Fotografien, die aus verschiedenen Positionen und Blickwinkeln aufgenommen wurden. Sie ist bei Luftbildaufnahmen sehr verbreitet, lässt sich jedoch auch für viele andere Anwendungszwecke einsetzen [38]. Nachfolgend wird ein Überblick über die Funktionsweise von Photogrammetrie gegeben, wobei für Einzelheiten auf die entsprechenden Referenzen verwiesen wird. Auch wenn im Folgenden der Einfachheit halber nur eine Rekonstruktion anhand von zwei Bildern betrachtet wird, werden in realen Anwendungen in der Regel deutlich mehr Bilder benötigt. Anstatt diese paarweise zu verarbeiten, erfolgt die Berechnung meist auf Basis der gleichzeitigen Betrachtung aller Bilder.

Für die photogrammetrische Verarbeitung zweier Bilder ist zunächst die Kenntnis der intrinsischen und extrinsischen Kameraparameter vonnöten. Unter letzteren versteht man die Position und Ausrichtung der Kamera (genauer deren Zentrum), während die intrinsischen Parameter beschreiben, auf welche Weise die dreidimensionale Umgebung auf die zweidimensionale Bildebene projiziert werden. Neben der Position und Skalierung des Bildes ist hierfür noch die sogenannte *Schräge* notwendig, welche oftmals jedoch als Null angenommen wird [40, S. 13ff]. Diese Parameter können entweder implizit anhand der aufgenommenen Bilder geschätzt oder durch einen expliziten Kalibriervorgang bestimmt werden, beispielsweise indem eine wie in Abbildung 4.1 dargestellte Kalibrierplatte aus verschiedenen Perspektiven fotografiert wird und diese Bilder dann durch eine spezielle Software verarbeitet werden. Eine explizite Kalibrierung ist in vielen Fällen genauer, erfordert aber einen höheren Zeitaufwand. Die Verwendung eines solchen Systems ist also sinnvoll, wenn viele Objekte gleicher Beschaffenheit digitalisiert werden sollen, ohne dass die relative Position und Ausrichtung der Kameras verändert werden muss.

Soll nun aus zwei Bildern eines Objekts aus verschiedenen Perspektiven über Photogrammetrie ein dreidimensionales Modell erstellt werden, wird zunächst eine Schätzung für den sogenannten *optischen Fluss* ermittelt. Dieser gibt für jedes Pixel im ersten Bild

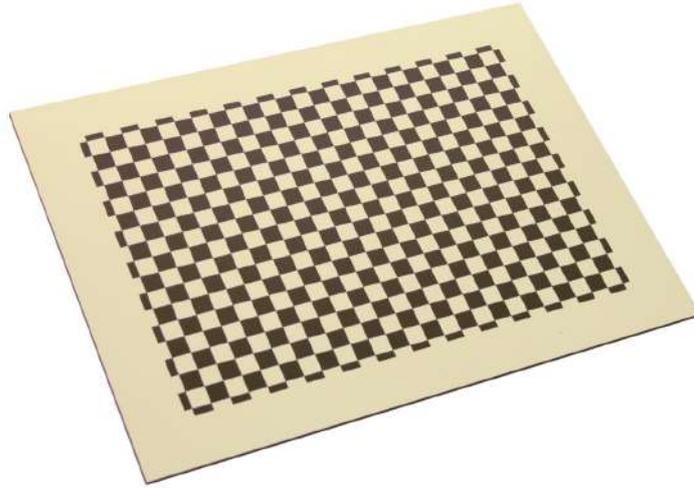


Abbildung 4.1: Kalibrierplatte zum Ermitteln der intrinsischen und extrinsischen Kameraparameter

die Verschiebung zum korrespondierenden Pixel im zweiten Bild an. Wird der optische Fluss korrekt ermittelt, hat man also die Information, welche beiden Pixel in den beiden Bildern den gleichen Punkt auf dem zu untersuchendem Objekt zeigen. Unter Verwendung dieser Zuordnung und der zuvor bestimmten Kameraparameter lässt sich nun die Oberfläche des Objekts durch diejenigen Punkte bilden, an welchen sich die Sichtstrahlen korrespondierender Pixel schneiden. Die so bestimmte *Tiefenkarte* gibt dann für jedes Pixel in einem der beiden Bilder an, wie weit die Objektoberfläche an diesem Pixel von der Kamera entfernt ist. Aus dieser Tiefenabbildung lässt sich schließlich ein dreidimensionales Modell berechnen [37]. In Abbildung 4.2 sind zwei Bilder eines Objekts mit exemplarischen Korrespondenzbeziehungen zu sehen.

Die Tiefenabbildung gibt jedoch nur Auskunft über Bereiche, welche auch auf beiden Bildern zu sehen sind. Einerseits bedeutet dies im Umkehrschluss, dass die Überlappung zwischen den beiden Aufnahmen möglichst groß sein soll. Andererseits erhält man offensichtlich keine Informationen über Bereiche, die auf den Bildern nicht zu sehen sind, wie beispielsweise die Rückseite des Objekts. Hier müssen also in der Regel weit mehr als zwei Bilder verwendet werden, die dann meist von einem dafür geeigneten Algorithmus simultan verarbeitet werden.

## 4.2 Streifenlichtscanner

Ähnlich der Photogrammetrie basiert das Streifenlicht-Verfahren auf Verzerrungen durch Betrachtungen aus verschiedenen Perspektiven. Allerdings wird bei diesem Digitalisierungsverfahren zusätzlich zu einer oder mehreren Kameras ein Projektor verwendet, der ein Muster auf das zu digitalisierende Objekt projiziert. Dies wird in Abbildung 4.3 veranschaulicht. Sehr verbreitet sind hierfür Streifenmuster. Dadurch, dass diese Streifen aus der Perspektive der Kamera, welche sich von der des Projektors unterscheidet, nicht mehr gerade sondern verzerrt erscheinen, lassen sich anhand dieser Verzerrungen Rückschlüsse

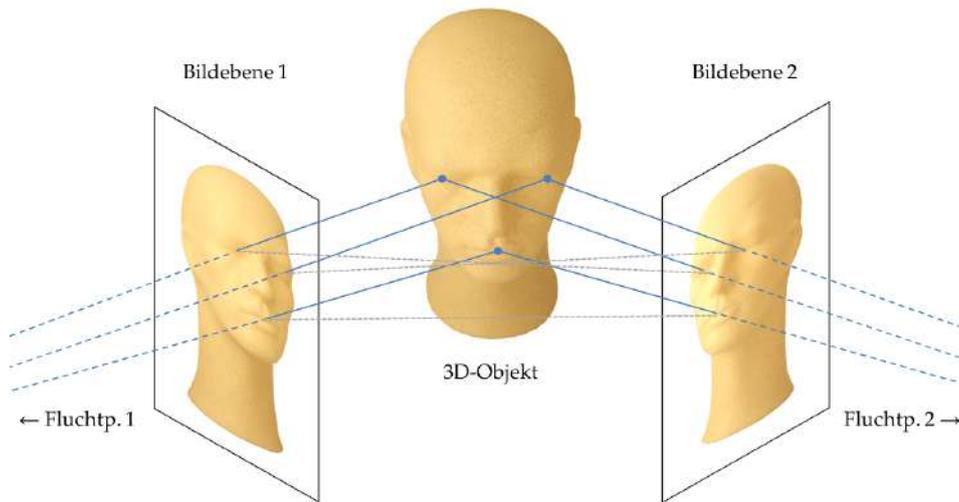


Abbildung 4.2: Funktionsprinzip der Photogrammetrie. Es werden zwei Bilder vom zu digitalisierenden Objekt aus verschiedenen Perspektiven gemacht. In diesen Bildern werden korrespondierende Pixel gesucht, aus welchen sich die Oberfläche rekonstruieren lässt.

auf die geometrische Form des Untersuchungsobjekts ziehen [47]. Das Funktionsprinzip eines Streifenlichtscanners ist in Abbildung 4.4 graphisch dargestellt. Neben stationären Streifenlichtscannern, die auf einem Stativ platziert werden, gibt es auch Varianten, die in der Hand gehalten werden und so sehr flexibel positioniert werden können.

Die im Regelfall verwendeten Projektionsmuster können als zweidimensionale Bilder angesehen werden. Zwei der am häufigsten verwendeten Muster sollen im folgenden kurz vorgestellt werden.

**Binäre Muster** Bei der Verwendung eines Streifenmusters, welches aus horizontalen oder vertikalen Streifen besteht, die abwechselnd weiß und schwarz gefärbt sind und dieselbe Breite aufweisen, lässt sich pro Hell-Dunkel-Kante ein Verzerrungsprofil ermitteln, wie in Abbildung 4.4 ersichtlich ist. Allerdings muss für eine korrekte Rekonstruktion eine eindeutige Zuordnung der Streifen im projizierten Muster zu den Streifen im durch die Kamera aufgenommenen Bild gewährleistet sein, was abhängig von der Objektbeschaffenheit schwierig bis unmöglich ist. Aus diesem Grund wird eine Sequenz von Aufnahmen gemacht, wobei die Anzahl der Streifen ausgehend von zwei Streifen (einem weißen und einem schwarzen) von Aufnahme zu Aufnahme verdoppelt wird. Hierdurch ergibt sich für jeden Streifen in der feinsten Detailstufe eine eindeutige Abfolge von Hell- und Dunkelwerten, was eine eindeutige Zuordnung ermöglicht. Dieses Verfahren ist aufgrund der binären Werte sehr robust, erfordert jedoch bei einer hohen räumlichen Auflösung eine hohe Anzahl an Projektionsmustern, was wiederum einen höheren Zeitaufwand zur Folge hat und bei beweglichen Szenen wie einem sich bewegenden Untersuchungsobjekt oder bei der Verwendung eines Handscanners problematisch sein kann. [22, S. 133f]



Abbildung 4.3: Einsatz eines Streifenlichtscanners zum Digitalisieren einer historischen Handgranate

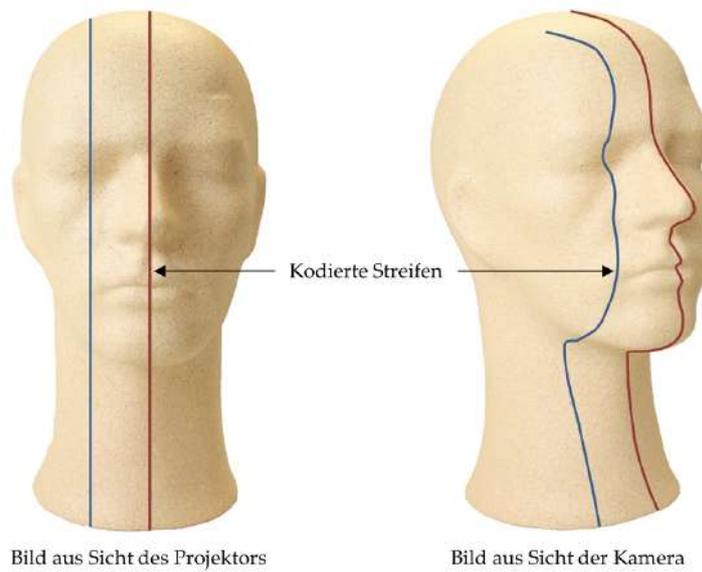


Abbildung 4.4: Idee des Funktionsprinzips eines Streifenlichtscanners. Die durch den Projektor auf der linken Seite erzeugten Streifen erscheinen auf der rechten Seite aus Sicht der Kamera verzerrt.

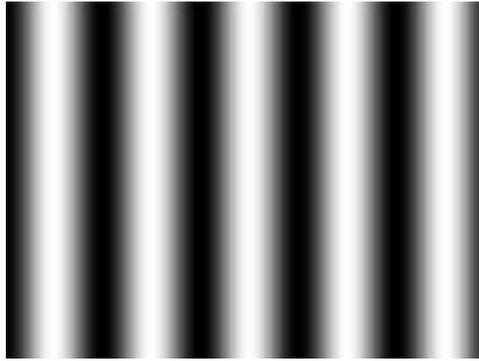


Abbildung 4.5: Beispielhaftes Projektionsmuster eines Streifenlichtscanners. Die Helligkeitswerte sind in eine Richtung konstant, während sie in der anderen Richtung sinusförmige Werte aufweisen.

**Phasenverschobene Schwingungen** Ein weiteres Beispiel für ein Projektionsmuster ist ein Bild, welches in einer Dimension konstante Helligkeitswerte aufweist, wohingegen in der zweiten Dimension die Helligkeitswerte einer Sinusschwingung entsprechend oszillieren, wie in Abbildung 4.5 zu sehen. Durch die aufgrund der anderen Perspektive entstehenden Verzerrungen resultiert auf dem durch die Kamera aufgenommenen Bild eine *Phasenverschiebung* dieser Sinusschwingungen, welche anschließend mit Mitteln der Interferometrie gemessen und erkannt werden und in einer sogenannten *Phasenkarte* eingetragen werden [56]. Probleme hierbei können Unstetigkeiten (Brüche) in der Objekt-oberfläche darstellen, bei welchen die Schwingung um mehr als eine Periode verschoben wird, da sich in diesen Fällen die Phasenverschiebung nicht korrekt ermitteln lässt, was in einer Mehrdeutigkeit resultiert. [22, S. 137].

Um die jeweiligen Nachteile der oben beschriebenen Projektionsmuster zu kompensieren, können auch Kombinationen der beiden Verfahren verwendet werden. Über diese Kombinationen und weitere mögliche Projektionsmuster, die beispielsweise auch farbige Muster verwenden, geben unter anderem [22] und [51] Auskunft. Anhand der aus den Streifenlichtaufnahmen gewonnenen Informationen lässt sich anschließend unter Kenntnis der Position von Projektor und Kamera eine *Tiefenkarte* erstellen, was dem Vorgehen bei der Photogrammetrie sehr ähnlich ist. Diese gibt für jeden Punkt auf dem Kamerabild den ermittelten Abstand des Objekts zur Kamera an, woraus sich schließlich ein dreidimensionales Modell rekonstruieren lässt.

Um eine vollständige digitale Repräsentation des Objekts zu erhalten, sind jedoch auch hier mehrere Aufnahmen aus unterschiedlichen Richtungen notwendig. Der Projektor kann nämlich auch im besten Fall nicht mehr als die Hälfte des Objektes beleuchten. Über Bereiche, die vom Projektor nicht beleuchtet werden, kann unabhängig von der Position der Kamera keine Information gewonnen werden. Durch geeignetes Umpositionieren des Objekts oder des Streifenlichtscanners müssen deshalb alle Bereiche des Objekts in mindestens einer Aufnahme erfasst werden können. Um den Aufwand zu reduzieren, können mehr als eine Kamera verwendet werden, beispielsweise eine Kamera links und eine weitere rechts vom Projektor. Eine Kamera kann im Allgemeinen näm-

lich nicht die komplette vom Projektor beleuchtete Fläche erfassen, jedoch lässt sich der Anteil der erfassten Fläche und damit die gewonnene Information pro Anordnung durch den Einsatz mehrerer Kameras vergrößern.

Um die Position und Ausrichtung von Projektor und Kamera zu ermitteln sowie weitere für die Berechnungen notwendige Parameter zu bestimmen geht dem eigentlichen Scan-Prozess auch hier eine Kalibrierung voraus, wozu eine Kalibrierplatte zum Einsatz kommt. Diese wird zunächst zur Kalibrierung der Kamera(s) verwendet. Anschließend wird durch den Projektor ein Kalibrierungsmuster auf die Platte projiziert, aus dem sich mithilfe der bereits kalibrierten Kamera die intrinsischen und extrinsischen Parameter des Projektors ermitteln lassen. Eine gute Kalibrierung ist laut [22, S. 148] essentiell für gute Digitalisierungs-Ergebnisse und sollte deshalb nicht vernachlässigt werden.

Neben den bereits erwähnten Referenzen [22] und [51] sind weitere Informationen zur Funktionsweise sowie Videos über die Arbeit mit Streifenlichtscannern beispielsweise unter [41] zu finden.

### 4.3 Laserscanner

Laserscanning, oft auch bekannt unter der Bezeichnung *Light detection and ranging (LiDAR)* [20, S. 5] ist insbesondere in der Geodäsie und in industriellen Anwendungen, wie beispielsweise der Absicherung von Maschinen oder zur Steuerung von Robotern, weit verbreitet. Doch auch zur Digitalisierung von Kulturgütern kann dieses Verfahren eingesetzt werden. Laserscanner lassen sich bezüglich des Funktionsprinzips in die beiden Kategorien *Entfernungs-Scanner* und *Triangulations-Scanner* einteilen, wobei das Prinzip je nach konkretem Anwendungsfall auszuwählen ist.

Nachfolgend soll ein kurzer Überblick über die grundlegende Funktionsweise dieser beiden Kategorien von Scannern gegeben werden. Weitere Varianten und Typen sind in den angegebenen Referenzen zu finden.

**Entfernungs-Scanner** Die Entfernungs-Scanner arbeiten nach dem sogenannten *Time-of-flight*-Prinzip [11], das auf der Tatsache basiert, dass sich Licht mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet. Ein Laser sendet kurze Lichtpulse in Richtung des zu digitalisierenden Objekts, welche von dem Objekt reflektiert werden. Diese Reflexionen werden dann von einem Detektor registriert, welcher sich möglichst nah an der Lichtquelle befindet [28, S. 350]. Für diese Anwendung wird Laserlicht verwendet, da sich dieses durch seine starke Bündelung gut auf die Objekt Oberfläche fokussieren lässt.

Der Zeitpunkt des Eintreffens der Reflexion wird dann mit dem Zeitpunkt des Aussendens des Laserpulses verglichen. Durch die konstante Lichtgeschwindigkeit lässt sich anhand dieser Zeitdifferenz die Länge der Strecke bestimmen, den das Licht von Aussendung bis Eintreffen am Laserscanner zurückgelegt hat. Unter der Annahme, dass sich Laser und Detektor an der gleichen Position befinden, entspricht diese Länge genau dem doppelten Abstand zwischen Objekt Oberfläche und Laserscanner [29, S. 37].

Durch Emission vieler dieser Laserpulse in kurzen zeitlichen Abständen und gleichzeitiger Ablenkung des Laserstrahls, meist durch einen motorisch rotierenden Spiegel, lässt

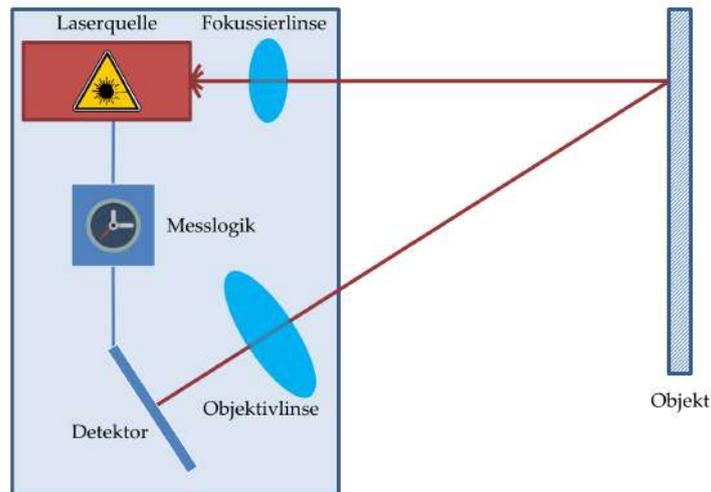


Abbildung 4.6: Funktionsprinzip eines Laserscanners, der auf dem *Time-of-flight*-Prinzip basiert. Die Zeitdifferenz zwischen ausgesandtem Laserpuls und Eintreffen der Reflexion wird gemessen, wodurch sich die vom Licht zurückgelegte Strecke berechnen lässt. Halbiert man diese Strecke, erhält man näherungsweise die Entfernung von Objekt zu Laserscanner.

sich so die Oberfläche entlang eines Profils abtasten und in eine *Tiefenkarte* überführen [28, S. 281] [29, S. 42]. Diese gibt für jeden Messpunkt entlang des Profils den gemessenen Abstand zwischen Laserscanner und Objekt an.

Das Funktionsschema von Entfernung-Laserscannern ist in Abbildung 4.6 skizziert. Um durch die Zeitmessung entstehende Ungenauigkeiten zu verringern, gibt es Varianten dieses Prinzips, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen werden soll [11] [20].

**Triangulations-Scanner** Während sich bei Entfernungsscannern Lichtquelle und Detektor möglichst am selben Punkt befinden, basieren Triangulations-Scanner auf einem festen und bekannten Abstand dieser beiden Elemente. Wie im obigen Fall wird Laserlicht von einer Quelle emittiert, vom Objekt reflektiert und anschließend von einem Detektor registriert. Jedoch wird das Licht in der Regel nicht in Pulsen sondern dauerhaft abgegeben. Wie in Abbildung 4.7 zu sehen, hängt die Position der Reflexion auf dem Detektor vom Abstand der Objektoberfläche vom Scanner ab. Da der Detektor aus mehreren einzelnen Elementen besteht, lässt sich diese variable Position ermitteln und der Winkel berechnen, unter welchem der Laserstrahl auf die Detektorkomponente trifft. Bezieht man nun noch die Kenntnis über die relative Position von Laserquelle und -detektor (genauer Fokussierlinse und Objektivlinse) mit ein, lässt sich durch ein einfaches geometrisches Verfahren (*Triangulation*) die Position der Objektoberfläche bestimmen [10, S. 7f] [11].

Fächert man einerseits den Laserstrahl durch eine geeignete Optik auf oder lenkt den Strahl entsprechend ab und konstruiert andererseits die Detektormatrix entsprechend, lässt sich auch so eine Tiefenkarte der Objektoberfläche entlang eines Profils ermitteln.

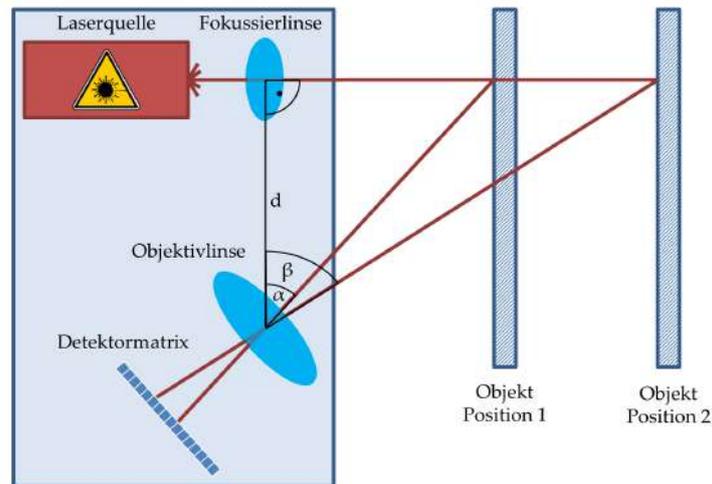


Abbildung 4.7: Funktionsprinzip eines Triangulations-Laserscanners. Die Position der Reflexion des Laserstrahls auf der Detektormatrix hängt vom Abstand des zu untersuchenden Objekts vom Laserscanner ab. Anhand dieser Position lässt sich über Triangulation der Abstand bestimmen.

**Vergleich** Während nach [10] Laserscanner, die nach dem Triangulations-Prinzip arbeiten, in der Regel für einen Abstand zwischen Scanner und zu untersuchendem Objekt von unter einem Meter konzipiert sind und dort eine Genauigkeit im Submillimeterbereich liefern, arbeiten Entfernungsscanner meist auf größere Distanzen bis mehrere hundert Meter und liefern hier zumindest absolut gesehen ungenauere Ergebnisse. Jedoch ist die Genauigkeit bei diesen Geräten weitestgehend unabhängig vom Abstand, während sie bei Triangulations-Scannern nach [11] quadratisch mit dem Abstand zwischen Objekt und Scanner abnimmt.

Während also Entfernungsscanner für geodätische Anwendungen und die Vermessung von großen Objekten wie beispielsweise Bauwerken gut geeignet sind, empfiehlt sich für die Digitalisierung von kleineren Kulturgütern aufgrund der höheren Genauigkeit bei kurzen Distanzen eher ein Gerät, welches nach dem Triangulations-Prinzip arbeitet.

Die Färbung der Objekt Oberfläche, die sogenannte Textur, lässt sich jedoch weder mit Triangulations- noch mit Entfernungsscannern erfassen.

## 4.4 Computertomographie

Die Entdeckung von Wilhelm Conrad Röntgen im Jahre 1895, dass bestimmte Strahlen, die wir heute als Röntgenstrahlen kennen, Materie durchdringen können, eröffnete in der Medizin vollkommen neue Untersuchungsmethoden, indem Einblicke in das Innere des menschlichen Körpers gewonnen werden können. [55, S. 9] Die Energie eines in den Körper eindringenden Röntgenstrahls wird abhängig von der Materie teilweise absorbiert, wodurch die Energiemenge der austretenden Strahlung kleiner als die der eintretenden Strahlung ist. Aus der Differenz dieser beiden Energiemengen lassen sich Rückschlüsse über die Materie entlang des Strahls gewinnen. Zur Messung der nach der Durchdrin-

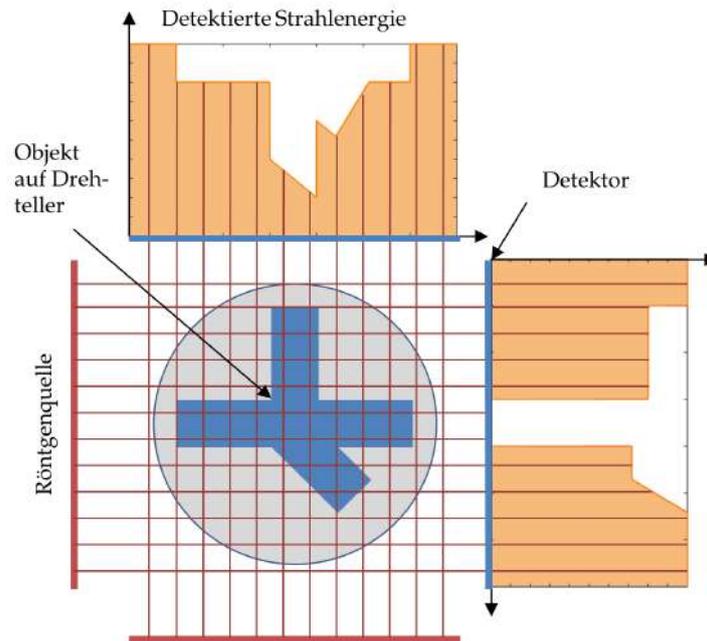


Abbildung 4.8: Funktionsprinzip eines Computertomographen. Die durch eine Röntgenquelle erzeugte Strahlung wird durch das zu untersuchende Objekt teilweise absorbiert. Die verbleibende Strahlung wird durch einen Detektor erfasst. Um ein dreidimensionales Modell errechnen zu können sind Aufnahmen aus verschiedenen Richtungen notwendig, wozu das Objekt oftmals auf einem Drehteller platziert wird, der dann schrittweise rotiert wird. In praktisch eingesetzten Tomographen verlaufen die einzelnen Strahlen jedoch nicht parallel sondern kegelförmig. Außerdem erfolgt die Absorption in der Realität exponentiell [42, S. 1], während sie in dieser Abbildung zur Vereinfachung linearisiert dargestellt wird.

gung des Körpers verbleibenden Strahlung kommen heute meist elektronische Sensoren zum Einsatz.

Bei der Analyse von Röntgenbildern steht man jedoch vor dem Problem, dass sich überlappende Strukturen im Objekt durch die stattfindende Projektion überlagern [55, S. 9]. Durch die Einführung der Computertomographen im Jahre 1971 konnte dieses Problem jedoch behoben werden. Die Computertomographie ist als eine Erweiterung der Röntgenaufnahme zu sehen. Es werden nämlich mehrere Röntgenaufnahmen aus vielen verschiedenen Winkeln angefertigt, welche dann digital erfasst und gespeichert werden. Anschließend wird aus den einzelnen Aufnahmen ein dreidimensionales Modell berechnet, das angibt, wie stark die Strahlung an einer bestimmten Stelle im Raum absorbiert wurde. So lassen sich die bei Röntgenaufnahmen problematischen Überlagerungen umgehen.

Der grundlegende Messprozess ist in Abbildung 4.8 vereinfacht dargestellt. Eine Röntgenquelle erzeugt Strahlung, welche in Richtung des Objektes abgegeben wird. Während ein Teil der Strahlungsenergie durch das Objekt absorbiert wird, kann der verbleibende Teil durch einen Detektor erfasst werden. Dieser Vorgang wird mehrfach wiederholt, wobei zum Einstellen verschiedener Perspektiven eine relative Bewegung von Objekt

zu Quelle und Detektor notwendig ist. Insbesondere bei kleinen Objekten ist es meist einfacher, das Objekt innerhalb der statischen Scanapparatur zu bewegen, indem es beispielsweise auf einem Drehteller platziert wird. Bei sehr großen oder immobilen Objekten ist es jedoch auch denkbar, die Strahlenquelle und den Detektor simultan um das Objekt zu bewegen. Durch den beschriebenen Prozess ergibt sich schließlich pro Aufnahme eine *Absorptionskarte*, die für jeden Strahl den Anteil an absorbierte Strahlung angibt.

Diese Absorptionskarten werden dann als Eingabe für einen Rekonstruktionsalgorithmus verwendet. Würden Aufnahmen aus *allen* möglichen Richtungen gemacht werden können und würden idealisierte physikalische Gegebenheiten zutreffen (z. B. monochromatische Strahlung, keine Streuungen), wäre das mathematische Modell dazu die *Inverse Radon-Transformation* [43, S. 1]. Da die Anzahl der Richtungen jedoch unendlich groß ist, kann die hierzu notwendige Menge an Aufnahmen weder erstellt noch verarbeitet werden. Bei der Frage, unter welchen realistischen Bedingungen dennoch eine theoretisch exakte Rekonstruktion möglich ist, spielen die Tuy-Kirillov-Bedingungen [59] eine wichtige Rolle. An Algorithmen zur Rekonstruktion wurde in der Vergangenheit meist die *Gefilterte Rückprojektion (FBP)* verwendet, die jedoch immer mehr von *iterativen Verfahren*, welche sich der ursprünglichen Absorptionsverteilung Stück für Stück annähern, verdrängt wird. Eine kurze nicht-technische Einführung zu diesen Algorithmen gibt [63].

Während das Hauptanwendungsgebiet der Computertomographie immer noch in der Medizin liegt, wird sie vermehrt auch in industriellen Anwendungen eingesetzt, beispielsweise im Feld der *zerstörungsfreien Prüfverfahren*. Über die Möglichkeiten und Vorteile des Einsatzes von Computertomographie in der Industrie geben [45] und [19] Auskunft. Doch auch bei der Digitalisierung von Kulturgütern kann man durch den Einsatz von Computertomographie profitieren, da sie das einzige (in dieser Arbeit behandelte) Digitalisierungsverfahren darstellt, über welches Informationen über die innere Beschaffenheit des zu untersuchenden Objektes gewonnen werden können, ohne dieses zerstören zu müssen. Allerdings lässt sich die Farbe der Oberfläche (Textur) durch Röntgenstrahlen nicht erfassen.

Neben Kenntnis über die innere Beschaffenheit lassen sich durch die Absorptionswerte auch Rückschlüsse auf die verwendeten Materialien ziehen, da verschiedene Materialien die Röntgenstrahlung unterschiedlich stark absorbieren. Während Metall sehr viel Strahlung absorbiert, kann ein Großteil der Strahlung leichtere Materialien wie beispielsweise Holz durchdringen. Bei der Digitalisierung sehr schwerer Materialien muss jedoch beachtet werden, dass beispielsweise durch den in [36, S. 389] beschriebenen Effekt der Strahlaufhärtung Artefakte im rekonstruierten Volumenmodell entstehen können.

# 5 Experimentelle Digitalisierung - Aufbau und Durchführung

## 5.1 Laserscanner

### 5.1.1 Hardware

Für die experimentelle Digitalisierung kulturellen Erbes mittels Laserscanner kam das in Abbildung 5.2 dargestellte Modell *scanCONTROL 2600-100* des Herstellers *Micro-Epsilon* zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um einen Profil-Laserscanner, der mit einer Geschwindigkeit von bis zu 300 Hz Profile mit jeweils 640 Punkten und einer Referenzauflösung von 12 µm erfasst [53]. Das Gerät arbeitet nach dem in Kapitel 4.3 vorgestellten Triangulations-Prinzip, mithilfe dessen er Oberflächen erkennen kann, die sich minimal 125 mm und maximal 390 mm vom Scanner entfernt befinden. Der daraus resultierende trapezförmige Messbereich ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

Ein roter Halbleiterlaser mit einer Wellenlänge von 658 nm wirft ein Lichtband auf das zu untersuchende Objekt, von welchem dieses Licht unter anderem in Richtung des Sensors reflektiert wird. Durch den Einfallswinkel dieser Reflexionen lässt sich nach dem Triangulationsprinzip für jeden der 640 Messpunkte pro Profil der Abstand der Objektoberfläche zum Sensor bestimmen. Ein beispielhaftes Höhenprofil ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

Um die gesamte Objektoberfläche aus einer Richtung erfassen zu können, müssen jedoch mehrere Profile gemessen werden, wobei entweder der Laserscanner senkrecht zur Profiltrichtung über das statische Objekt verschoben wird oder der Laserscanner nicht bewegt wird und stattdessen das Objekt verschoben wird. In beiden Fällen muss

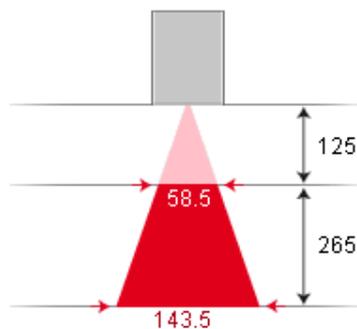


Abbildung 5.1: Messbereich des verwendeten Laserscanners *Micro-Epsilon scanCONTROL 2600-100*.  
Quelle: [https://www.micro-epsilon.de/2D\\_3D/laser-scanner/model-overview/](https://www.micro-epsilon.de/2D_3D/laser-scanner/model-overview/)



Abbildung 5.2: Der für die Experimente verwendete Laserscanner *Micro-Epsilon scanCONTROL 2600-100*

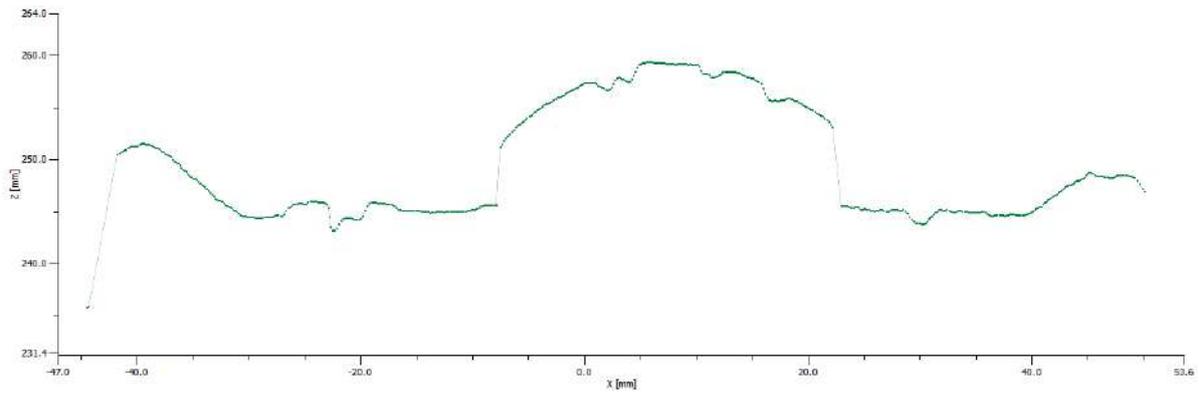


Abbildung 5.3: Ein beispielhaftes Höhenprofil beim Digitalisieren eines Tondeckels

der Vorschub zwischen zwei Profilen bekannt sein. Dies kann entweder erreicht werden, indem die Vorschub-Geschwindigkeit bekannt ist und konstant gehalten wird und die Profile in regelmäßigen zeitlichen Abständen ermittelt werden, oder indem der Vorschub gemessen wird und in regelmäßigen lateralen Abständen, die nicht notwendigerweise auch regelmäßig bezüglich der Zeit sind, Profile erstellt werden.

Um eine konstante Vorschub-Geschwindigkeit sicherzustellen, müsste ein motorisierter *Lineartisch* verwendet werden. Diese Tische arbeiten zwar sehr präzise, bedeuten aber einen enormen finanziellen Aufwand. Stattdessen wurde für die Experimente ein Aufbau konstruiert, bei welchem ein Tisch, auf dem das Objekt platziert werden kann, über eine manuell zu bedienende Kurbel an dem überhalb des Tisches platzierten Laserscanner vorbeigeführt werden kann, wie es in Abbildung 5.4 zu sehen ist. Um den manuell durchgeführten und somit im Allgemeinen unregelmäßigen Vorschub zu berücksichtigen, wird über eine unterhalb des Tisches angebrachte Zahnleiste ein Zahnrad bewegt, welches wiederum mit einem Drehgeber des Typs *WDG 58B* des Herstellers *Wachendorff Automation* [46] verbunden ist. Dieser Drehgeber sendet Impulse an den Laserscanner und triggert damit die Erfassung des nächsten Profils. Auf diese Weise werden die Profile in regelmäßigen lateralen Abständen aufgezeichnet. Dieser laterale Abstand zweier Impulse muss initial gemessen werden, um den Abstand zweier Profile am Rechner richtig skalieren zu können.

Um flexibel auf die Größe des Untersuchungsobjekts reagieren zu können, wurde der Laserscanner an einer in der Höhe verschiebbaren Vorrichtung montiert. Während bei flachen Gegenständen der Scanner nah am Objekt positioniert werden muss, um den Messbereich nicht nach oben zu verlassen, muss er bei höheren Objekten weiter entfernt platziert werden, damit sich die zu erfassende Oberfläche nicht zu nah am Laserscanner befindet. Der Abstand zwischen Sensor und Objekt bedingt auch die Auflösung in Richtung der Profile, also den Abstand zweier Messpunkte, da sich bei einem geringeren Abstand die 640 Messpunkte pro Profil auf eine geringere Profilbreite verteilen. Der Laserscanner sollte daher stets so nah wie möglich am Untersuchungsobjekt positioniert werden.

Für gute Messergebnisse ist es neben der eigentlichen Positionierung der Objekte auch wichtig, diese zu fixieren, so dass sie sich bei einer Bewegung des Tisches nicht verschieben können, wofür verschiedene Hilfsmittel verwendet wurden.

### 5.1.2 Software

Für die Erfassung der vom Laserscanner gelieferten Daten kamen die dazugehörigen Software-Produkte *scanCONTROL Configuration Tools* [16] bzw. *scanCONTROL 3D-View* [6] der Firma Micro-Epsilon zum Einsatz. Mithilfe dieser Software wurden die einzelnen Profile erfasst und zueinander korrekt ausgerichtet. Das so entstandene Abbild der Objektoberfläche wurde anschließend als STL-Datei [18] exportiert.

Um die zu untersuchenden Objekte vollständig zu erfassen, war es notwendig, Aufnahmen von mehreren Seiten und aus verschiedenen Richtungen anzufertigen, wobei jede dieser Aufnahmen in eine separate STL-Datei mündete. Zur Bearbeitung und Fusion dieser Einzelaufnahmen wurden diese in die Open-Source-Software *MeshLab* [57] im-



Abbildung 5.4: Das Objekt wird auf einem manuell verschiebbaren Tisch unter dem Laserscanner bewegt.

portiert. Dort wurde von jeder Aufnahme zunächst der Untergrund und etwaige durch Reflexionen entstandene Ausreißer entfernt. Anschließend galt es, die einzelnen Aufnahmen gegeneinander auszurichten, was als *Registrierung* bezeichnet wird. Hierzu müssen auf jeweils zwei Aufnahmen korrespondierende Punktpaare festgelegt werden. Nach der Festlegung einer ausreichenden Anzahl an Punktpaaren lässt sich dadurch für eine der beiden Aufnahmen eine Drehung und eine Verschiebung ermitteln, über welche diese Aufnahme an der anderen ausgerichtet werden kann. Wird dieser Vorgang für alle vorhandenen Aufnahmen wiederholt, ergibt sich schließlich eine vollständige Punktwolke des Objekts. Von dieser wurde anschließend mithilfe des Filters *Poisson-disk Sampling* eine regelmäßige Abtastung erstellt und über *Screened Poisson Surface Reconstruction* aus der Abtastung eine aus Dreiecken bestehende Oberfläche ermittelt. Diese Oberfläche wurde anschließend als finales Modell exportiert.

## 5.2 Stationärer Streifenlichtscanner

### 5.2.1 Hardware

Als stationärer Streifenlichtscanner kam das bereits in Abbildung 4.4 gezeigte Modell *DAVID SLS-3* [30] zum Einsatz, das inzwischen von HP vertrieben wird. Neben dem Projektor mit einer Speziallinse für einen großen Brennweitenbereich finden zwei verschiebbare Kameras auf einer Aluminium-Schiene Platz, welche wiederum an einem Dreibein-Stativ befestigt ist.

Laut Angaben des Herstellers [31] erreicht der Streifenlichtscanner eine Genauigkeit von 0,05 mm oder 0,05 % der Scangröße. Eine Aufnahme ist je nach Einstellungen und Leistungsfähigkeit des den Scanner steuernden Computers nach 2 bis 10 Sekunden abgeschlossen.

Da durch eine Aufnahme nur von einer Seite Informationen über die Objektfläche gewonnen werden können, muss entweder der Streifenlichtscanner um das Objekt rotiert oder das Objekt vor dem Scanner rotiert werden. Um diesen Vorgang zu automatisieren, kam der motorisierte Drehteller *HP 3D Automatic Turntable Pro* zum Einsatz, welcher über die zusammen mit dem Streifenlichtscanner ausgelieferte Software angesteuert werden kann.

Auch die Aufnahmen, die aus einer vollen Drehung des Objekts auf dem Drehteller resultieren, reichen in der Regel nicht aus, um ein vollständiges Computermodell erstellen zu können. Hierzu war es notwendig, das Objekt in verschiedenen Positionen auf dem Drehteller zu platzieren und dadurch Aufnahmereihen aus verschiedenen Perspektiven anzufertigen. In einigen Fällen wurden auch Einzelaufnahmen ohne Verwendung eines Drehtellers erstellt.

### 5.2.2 Software

Zur Ansteuerung des Streifenlichtscanners und des dazugehörigen Drehtellers ist die spezielle proprietäre Software *HP 3D Scan Software* notwendig, die in den Versionen 4 bzw. 5

zum Einsatz kam. Über diese muss der Scanner vor dem Einsatz kalibriert werden. Hierzu wird eine spezielle dem Gerät beiliegende Kalibrierplatte vor dem Streifenlichtscanner platziert, Fokus und Blende von Projektor und Kameras angepasst und anschließend der Kalibriervorgang gestartet. Danach dürfen Fokus und Blende sowie die relative Position und Ausrichtung der Kameras zum Projektor nicht mehr modifiziert werden. Jedoch ist es problemlos möglich, die gesamte Scan-Apparatur umzupositionieren.

Die Software erlaubt die Erstellung von Einzelaufnahmen sowie von Aufnahmereihen unter Verwendung des Drehtellers, wobei die Anzahl an Einzelaufnahmen pro Umdrehung angegeben werden kann. Diese Einzelaufnahmen gilt es anschließend zu registrieren, wobei dem Benutzer Hilfsmittel zu Verfügung gestellt werden. Sofern die Überlappung zweier Aufnahmen groß genug ist und sie ausreichend viele markante Punkte beinhalten, ist eine vollautomatische Registrierung nur unter Angabe der zwei aneinander auszurichtenden partiellen Modelle möglich. Andernfalls müssen ähnlich zum Registrierungsverfahren in *Meshlab* bei der Digitalisierung mittels Laserscanner korrespondierende Punktpaare angegeben werden, um eine korrekte Registrierung zu ermöglichen. Sind alle Einzelaufnahmen paarweise aneinander ausgerichtet, lässt sich die Registrierung durch Ausführen des Prozesses *Globale Feinregistrierung* noch verbessern. Anschließend wird durch eine Fusion aus den einzelnen partiellen Modellen ein finales texturiertes Dreiecksmodell erzeugt, welches schlussendlich exportiert werden kann.

## 5.3 Handgeführter Streifenlichtscanner

### 5.3.1 Hardware

Für die Experimente zur Digitalisierung durch einen handgeführten Streifenlichtscanner wurde das Modell *Artec Spider* des Herstellers *Artec 3D* verwendet [3]. Dieses Gerät kann nach Herstellerangaben [4] Oberflächen in einer Entfernung von 0,2 m bis 0,3 m mit einer Auflösung von bis zu 0,1 mm und einer Genauigkeit von bis zu 0,05 mm erfassen. Die Textur wird dabei mit einer Kamera mit 1,3 Megapixeln erfasst.

Auf der Vorderseite des in Abbildung 5.5 dargestellten Geräts finden sich mehrere Komponenten: In Frontalansicht rechts unten befindet sich der Projektor, welcher ein blaues Streifenmuster auf das Objekt projiziert. Dieses wird von den drei 3D-Kameras erfasst, von welchen sich zwei links vom Projektor befinden, während die oberste Komponente die dritte 3D-Kamera darstellt. Zentral befindet sich die Textur-Kamera umgeben von sechs LED-Blitzen, über welche die Oberfläche zur Texturerfassung beleuchtet wird [1].

Da alle Komponenten fest ins Gerät integriert wurden und somit relativ zueinander stets gleich ausgerichtet sind, ist eine Kalibrierung wie beim oben betrachteten stationären Streifenlichtscanner nicht notwendig. Dennoch kann ein Kalibrierprozess durchgeführt werden, um leichte Abweichungen zu korrigieren.

Der Scanner wird einerseits über ein Netzteil mit Strom versorgt und andererseits über ein USB-Kabel mit einem leistungsfähigen Rechner verbunden, der die vom Gerät erfassten Daten verarbeitet, wobei die groben Mindestanforderungen für diesen Rechner in



Abbildung 5.5: Frontansicht des verwendeten handgeführten Streifenlichtscanners *Artec Spider*

[4] angegeben werden: Es sollte mindestens ein Intel i5- oder i7-Prozessor in Verbindung mit 18 GB Arbeitsspeicher zur Verfügung stehen.

Obwohl das Gerät frei beweglich ist, hat sich im Laufe der Experimente gezeigt, dass es den Digitalisierungsvorgang etwas erleichtert, wenn das Objekt auf einem manuell zu bedienenden Drehteller platziert wird. Auf diese Weise muss sich die bedienende Person nicht um das Objekt herumbewegen, sondern variiert nur die Höhe und Neigung des Scanners. Für immobile Objekte scheidet dieses Vorgehen selbstverständlich aus. Da während des Scanvorgangs auf dem Bildschirm wichtige Informationen dargestellt werden, sollte dieser stets einsehbar sein. Insbesondere für immobile Objekte bietet sich daher ein Laptop an, da sich dieser leicht umpositionieren lässt und gegebenenfalls in der Hand gehalten werden kann.

### 5.3.2 Software

Dieser handgeführte Streifenlichtscanner kann nur mit der proprietären Software *Artec Studio* [2] betrieben werden. Über diese erfolgt sämtliche Verarbeitung der durch den Scanner erfassten Daten. Der Digitalisierungsvorgang lässt sich in mehrere *Scans* unterteilen, wobei jeder Scan wiederum aus mehreren *Frames* besteht.

Ein *Tracking*-Algorithmus schätzt die Änderung von Scannerposition und -ausrichtung von einem Frame zum nächsten, was auch als *Structure-from-motion*-Verfahren bezeichnet wird. Die gegenseitige Ausrichtung aller Frames in einem Scan kann anschließend durch die Algorithmen *Fine Registration* und *Global Registration* noch optimiert werden.

Falls der Scan unerwünschte Bestandteile, wie beispielsweise den Untergrund enthält, sollte dieser anschließend entfernt werden. Falls die Aufnahme aus mehreren Scans besteht, gilt es nun diese Scans gegeneinander zu registrieren. Auch hier lässt sich eine vollautomatische Registrierung der einzelnen Scans durchführen. Sollte diese fehlschlagen, müssen wie bei der Registrierung in *Meshlab* mehrere korrespondierende Punktepaare markiert werden, über welche die partiellen Modelle grob gegeneinander ausgerichtet werden, woraufhin sich diese grobe Registrierung noch optimieren lässt. Sind alle Scans erfolgreich ausgerichtet, empfiehlt sich erneut die Ausführung des Prozesses *Global Registration* auf alle erstellten Scans, wodurch die Position eines jeden einzelnen Frames unabhängig von dessen Scan-Zugehörigkeit final optimiert wird. Zuletzt lassen sich Frames entfernen, die eine schlechte Übereinstimmung mit umgebenden Frames aufweisen.

Nach dem Registrierungsvorgang sollten fehlerhafte Punkte manuell oder durch den Filter *Remove Outliers* entfernt werden. Anschließend lässt sich beispielsweise mit dem Algorithmus *Sharp Fusion* aus der Punktwolke eine Oberfläche generieren, welche bei Bedarf über weitere Werkzeuge texturiert werden kann. Die Software bietet zahlreiche Möglichkeiten zur Verbesserung oder Vereinfachung des resultierenden Modells vor dessen Export.

## 5.4 Photogrammetrie

### 5.4.1 Hardware

Das wichtigste Werkzeug für photogrammetrische Aufnahmen ist zweifelsohne die verwendete Kamera. Hierbei handelt es sich um eine digitale Spiegelreflexkamera des Typs *Canon EOS 100D* mit einem dazugehörigen Objektiv, wobei in vielen Fällen ein Makro-Objektiv verwendet wurde. Für alle Aufnahmen, mit Ausnahme von Digitalisierungen im Freien, wurde die Kamera auf einem Stativ positioniert, um ein Verwackeln während des Aufnahmevorgangs zu vermeiden.

Für die Erfassung wurde mit drei verschiedenen Vorgehensweisen experimentiert:

1. *Digitalisierung ohne Drehteller*: Das zu digitalisierende Objekt verbleibt statisch, wohingegen die Kamera um das Objekt bewegt wird und von unterschiedlichen Positionen und mit variierender Ausrichtung Aufnahmen erstellt werden. Hierfür muss an allen Stellen um das Objekt ausreichend Platz zur Verfügung stehen. Außerdem ist eine sehr gleichmäßige Ausleuchtung für gute Resultate unabdingbar.
2. *Digitalisierung mit Drehteller*: Bei dieser Herangehensweise wird das Objekt auf einem Drehteller platziert und vor der statischen Kamera rotiert. Auf diese Weise lassen sich zügig und in regelmäßigen Abständen Aufnahmen anfertigen. Des Weiteren genügt es, den von der Kamera einsehbaren Bereich gleichmäßig auszuleuchten. Allerdings ist hier ein sehr homogener Hintergrund ohne jegliche markante Details vonnöten, da sich dessen Position im Gegensatz zum Objekt nicht relativ zur Kamera verändert. Um dennoch unabhängig vom Hintergrund zu sein, kann

jedes einzelne Bild vor der Ausrichtung aufwendig manuell maskiert und somit der Hintergrund ignoriert werden.

3. *Digitalisierung immobilier Objekte im Freien:* Für immobile Objekte scheidet die Herangehensweise mit Drehteller selbstverständlich aus. Als einzige Lösung verbleibt das Bewegen der Kamera um das Objekt. Die gleichmäßige Ausleuchtung des Objekts durch technisches Equipment kann im Freien einen enormen Aufwand bedeuten. Allerdings hat sich während der durchgeführten Experimente gezeigt, dass eine künstliche Ausleuchtung bei ausreichend Sonnenlicht nicht notwendig ist, falls keine Objektbereiche existieren, die durch das Sonnenlicht nicht erreicht werden können. Für diese Herangehensweise eignen sich am besten helle, aber bedeckte Tage, um eine möglichst diffuse Ausleuchtung zu erreichen und die Schattenbildung zu minimieren.

Eine der größten Herausforderungen bei den ersten beiden Herangehensweisen ist die gleichmäßige Ausleuchtung aller (sichtbaren) Stellen des zu digitalisierenden Objekts. Außerdem können durch eine hohe Diffusität negative Auswirkungen durch Reflexionen bei glänzenden Oberflächen minimiert werden. Bei der Digitalisierung mit Drehteller kam daher ein Lichtzelt zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um einen Würfel aus weißem Stoff, der auf einer Seite geöffnet ist. Das Objekt wird mitsamt dem Drehteller in diesem Lichtzelt platziert und die Aufnahmen durch die geöffnete Seite hindurch erstellt. Für die Beleuchtung wurden LED-Flächenleuchten und Daylight-Sets mit aufgesetzter Softbox des Herstellers *Walimex* verwendet. Zwei Flächenleuchten wurden seitlich auf das Lichtzelt gerichtet, während sich eine weitere Leuchte oberhalb des Lichtzelts befand. Für die frontale Beleuchtung kamen zwei Daylight-Sets zum Einsatz, die neben und etwas unterhalb der Kamera platziert wurden und das Objekt durch die Öffnung der Softbox leicht von unten ausleuchteten. Durch die aufgesetzte Softbox konnte auch hier eine diffuse Beleuchtung erreicht werden. Der gesamte Aufbau ist in Abbildung 5.6 zu sehen.

Bei der Digitalisierung ohne Drehteller muss das Objekt von allen umgebenden Positionen einsehbar sein, da die Kamera um das Objekt bewegt wird. Die Verwendung eines Lichtzelts scheidet somit aus. Außerdem kann im Gegensatz zur zuvor beschriebenen Lösung die Rückseite des Objekts bei der Beleuchtung nicht vernachlässigt werden. Aus diesem Grund ist für eine vollständige und gleichmäßige Beleuchtung eine höhere Anzahl an Lampen mit aufgesetzter Softbox notwendig. Die dafür notwendigen Stativ sind jedoch bei der Aufnahme der Bilder hinderlich, da auch die Kamera auf einem Stativ platziert werden sollte. Für die Digitalisierung einer hohen Anzahl an Objekten würden sich hier jedoch lohnenswerte Lösungen finden, beispielsweise indem die Lampen an der Decke fixiert werden und Stative somit entfallen.

Sowohl für die erfolgreiche Rekonstruktion der Objektgeometrie als auch für eine qualitativ hochwertige Texturierung des entstehenden Computermodells ist es wichtig, dass auf jedem Bild ein möglichst großer Bereich scharf abgebildet wird. Hierfür ist ein möglichst hohes Maß an Tiefenschärfe erforderlich, was durch eine hohe Blendenzahl, also eine sehr kleine Blendenöffnung erreicht werden kann. Da durch diese kleine Öffnung nur verhältnismäßig wenig Licht dringt, erhöhen sich die erforderlichen Belichtungszeiten enorm. Bei Aufnahmen mit künstlicher Beleuchtung ist die Verwendung eines Stativs



Abbildung 5.6: Aufbau zur photogrammetrischen Digitalisierung mit Drehteller

aus diesem Grund unbedingt notwendig. Bei Digitalisierungen im Freien kann an hellen Tagen die natürliche Beleuchtung jedoch stark genug sein, dass trotz einer hohen Blendenzahl kurze Belichtungszeiten ausreichen. Um ein Verwackeln der Bilder beim Betätigen des Auslösers zu vermeiden, wurde meist ein Fernauslöser verwendet. In den anderen Fällen wurde eine Auslöseverzögerung eingestellt, damit eine etwaige entstandene Schwingung vor Beginn der Belichtung abschwingen kann.

Zwischen den einzelnen Aufnahmen einer Aufnahmereihe darf der Fokus der Kamera verändert werden. Die übrigen Kameraparameter, insbesondere also die Belichtungszeit und der Zoom müssen jedoch konstant gehalten werden, um eine zuverlässige softwareseitige Rekonstruktion zu ermöglichen. Es lohnt sich also, diese Parameter im Vorfeld der Digitalisierung optimal und für alle Bereiche passend einzustellen.

Für die softwaregestützte Verarbeitung der Bilder ist ein sehr leistungsfähiger Computer empfehlenswert, um die Berechnungszeit in einem überschaubaren Rahmen zu halten. Einige Rekonstruktionsschritte können durch die Verwendung einer hochwertigen Grafikkarte enorm beschleunigt werden, da sich deren Berechnungen auf Grafikkarten hochgradig parallelisiert ausführen lassen.

## 5.4.2 Software

Um die während des Aufnahmevorgangs entstandenen Bilder zu einem dreidimensionalen Computermodell des Objekts zusammenzuführen, wurde die Software *Agisoft PhotoScan* [7] verwendet. Als erster Verarbeitungsschritt erfolgt das Importieren der erstellten Bilder in die Software und falls notwendig das Maskieren. Falls das Objekt zwischen den einzelnen Aufnahmen umgelagert wurde, empfiehlt sich hier die Aufteilung der Verarbei-

tung in sogenannte *Chunks*. Auf diese Weise kann verhindert werden, dass Diskrepanzen zwischen statischen Details im Hintergrund und bewegten Details am Objekt zu Problemen bei der Ausrichtung der Bilder führen. Diese Ausrichtung der Aufnahmen erfolgt im Anschluss an den Import, gegebenenfalls separat für jeden Chunk. Hierbei werden korrespondierende Punkte in den Bildern gesucht und so eine Schätzung für die Position der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme ermittelt. Sämtliche Kameraparameter werden ebenfalls anhand der zur Verfügung stehenden Bilder geschätzt. Eine vorhergehende Kalibrierung des Systems ist nicht notwendig.

Nach der erfolgreichen Ausrichtung der Bilder muss die bisher nur aus den Korrespondenz-Punkten bestehende Punktwolke verdichtet werden, wodurch eine vollständige Punktwolke des Objekts entsteht, welche anschließend in ein Dreiecksmodell überführt werden kann. Neben diesen grundlegenden Funktionen bietet insbesondere die Variante *Agisoft PhotoScan Professional* weitere Funktionen zur Erleichterung der einzelnen Verarbeitungsschritte oder zur Nachbearbeitung des resultierenden Modells.

## 5.5 Computertomographie

### 5.5.1 Hardware

Zur computertomographischen Erfassung von Kulturgut kam ein *TomoScope*-Gerät des Herstellers *Werth Messtechnik* [39] zum Einsatz. Das zu digitalisierende Objekt wird dazu auf einem motorisch exakt rotierbaren Drehteller im Tomographen positioniert. Die Fixierung erfolgt durch Objektträger aus Kunststoff, wobei es sich als vorteilhaft herausgestellt hat, eine Schicht aus Schaumstoff zwischen Objektträger und Objekt einzufügen. Da Schaumstoff kaum Strahlung absorbiert, wird die Separierung von Objekt und Objektträger dadurch enorm erleichtert.

Pro Umdrehung des Drehtellers wurden 800 Messungen angefertigt, aus welchen anschließend ein Volumenmodell errechnet wurde. Da Verdeckungen im Gegensatz zu optischen Verfahren keine Rolle spielen, ist eine Umpositionierung des Objekts und eine anschließende Wiederholung des Messvorgangs nicht erforderlich.

Vor Beginn der Messungen müssen einige Messparameter an das zu erfassende Objekt angepasst werden. Diese umfassen unter anderem die Belichtungszeit, die durch die Glühwendel fließende Stromstärke, die an den Kondensator angelegte Spannung und die Stärke der Vorfilterung.

### 5.5.2 Software

Die Erfassung der vom Computertomographen erstellten Messungen und anschließende Überführung in ein Volumenmodell erfolgte durch proprietäre Software. Für eine eventuell notwendige Bearbeitung und die Konversion zu einem Dreiecksmodell wurde das Programm *VGSTUDIO MAX* der Firma *Volume Graphics* [24] verwendet. Etwaige im Dreiecksmodell unerwünschte Bestandteile lassen sich anschließend durch die Software *MeshLab* [57] entfernen.

# 6 Experimentelle Digitalisierung - Ergebnisse

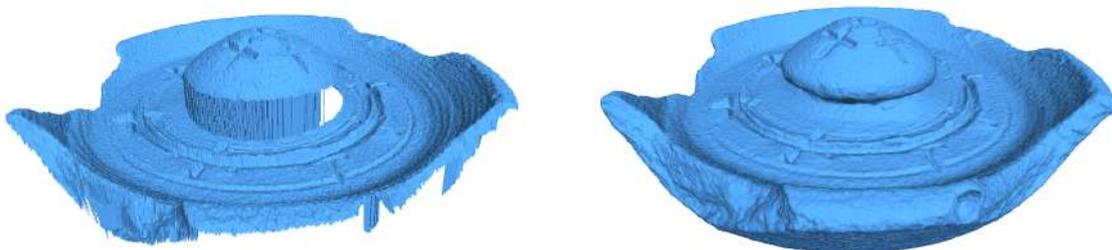
## 6.1 Laserscanner

**Tondeckel** Die Digitalisierung des Tondeckels mittels Triangulations-Laserscanner war mit einer Belichtungszeit von 1,00 ms ohne Probleme möglich. Die Beschaffenheit der Oberfläche ermöglicht rauscharme Messergebnisse, was beispielsweise auf die hohe Diffusität und die helle Farbe zurückzuführen ist. Aus diesem Grund sind die Gravuren sehr detailliert und deutlich zu erkennen, wie in Abbildung 6.1a zu sehen. Das Objekt wurde sowohl von oben und von unten als auch aus verschiedenen Winkeln und Richtungen von den Seiten erfasst. Die Registrierung dieser Einzelaufnahmen stellt aufgrund der eindeutigen und flächendeckenden Geometriedetails an der Objektoberfläche kein Problem dar. Das resultierende Modell ist in Abbildung 6.1b dargestellt.

Einzig der Bereich unterhalb des Griffs wird durch diesen verdeckt, wodurch hier keine Messwerte ermittelt werden können. Die daraus resultierenden Löcher in der Punktwolke sind jedoch klein genug, um von der im Anschluss an die Registrierung durchgeführten Oberflächenrekonstruktion geschlossen zu werden.

**Kerzenhalter** Der Kerzenhalter weist eine zwar diffuse, aber verhältnismäßig dunkle Oberfläche auf, wodurch für eine flächendeckende Erfassung die Belichtungszeit auf 5,00 ms erhöht werden musste. Anschließend war die Erfassung problemlos möglich. Vom Inneren des Halters konnten jedoch nur die oberen Randbereiche sowie der Boden erfasst werden. Von tieferliegenden Wandflächen lieferte der Scanner keine Messpunkte, da sie durch den oberen Teil des Halters verdeckt wurden.

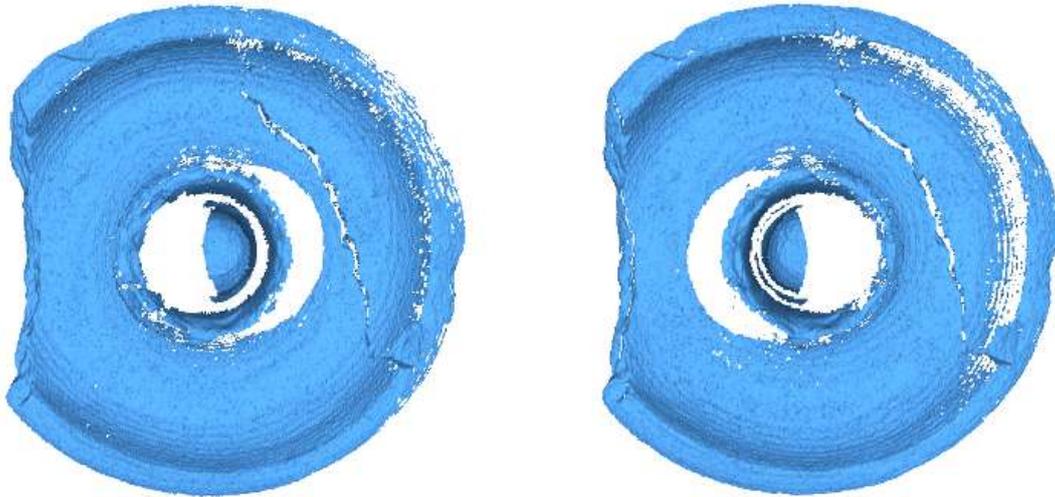
Außerdem zeigen die Aufnahmen deutlich, dass stark erhöhte Bereiche, wie in die-



(a) Einzelne Aufnahme von oben

(b) Finales Modell

Abbildung 6.1: Digitalisierung des Tondeckels mittels Laserscanner



(a) Einzelne Aufnahme des Kerzenhalters      (b) Aufnahme nach Drehung des Objekts

Abbildung 6.2: Einzelaufnahmen des Kerzenhalters durch Laserscanner mit unterschiedlicher Schattenbildung je nach Ausrichtung des Objekts

sem Fall der obere Teil des Halters, aufgrund der getrennten Positionen von Laserquelle und Detektor einen Schatten werfen, wie in Abbildung 6.2 dargestellt wird. Von diesen verschatteten Flächen erhält man ebenfalls keine Messpunkte, obwohl sie bei erster Betrachtung keinerlei Verdeckungen unterliegen. Allerdings lässt sich dieses Problem sehr einfach beheben, indem mindestens zwei Aufnahmen der gleichen Objektfläche aber mit unterschiedlicher Objektdrehung angefertigt werden, da durch die unterschiedliche Drehung auch unterschiedliche Flächen des Objekts verschattet werden.

Obwohl im unteren Bereich des Tellers zahlreiche geometrische Details vorhanden sind, die für den Registrierungsvorgang genutzt werden können, gestaltete sich dieser Prozess durch die annähernde Rotationssymmetrie im oberen Bereich des Kerzenhalters aufwendig. Eine sorgfältige Auswahl korrespondierender Punkte lieferte dennoch ein gutes Ergebnis.

**Handgranate** Während die Handgranate von der Oberflächenbeschaffenheit her unproblematisch ist, liegt das Problem hier bei der Registrierung der Einzelaufnahmen. Neben ein paar wenigen geometrisch prägnanten Punkten im Bereich der Öffnung sind die einzigen optisch wahrnehmbaren Unterschiede Variationen in der Färbung der Oberfläche. Diese wird durch den Laserscanner jedoch nicht erfasst, was eine saubere Registrierung der Aufnahmen der unteren Hälfte des Objekts unmöglich macht. Die Auswahl korrespondierender Punkte kann nur mithilfe von Schätzungen, die wiederum aus der Bewegung des Objekts zwischen den Einzelaufnahmen gewonnen werden, erfolgen. Dennoch ist das Ergebnis der fusionierten Einzelaufnahmen brauchbar, wie in Abbildung 6.3 zu sehen ist.

Klar ist jedoch, dass der Innenraum der Handgranate nicht erfasst werden kann, da er durch die Objektwände verdeckt wird. Dies ist ein allen optischen Verfahren inhärentes

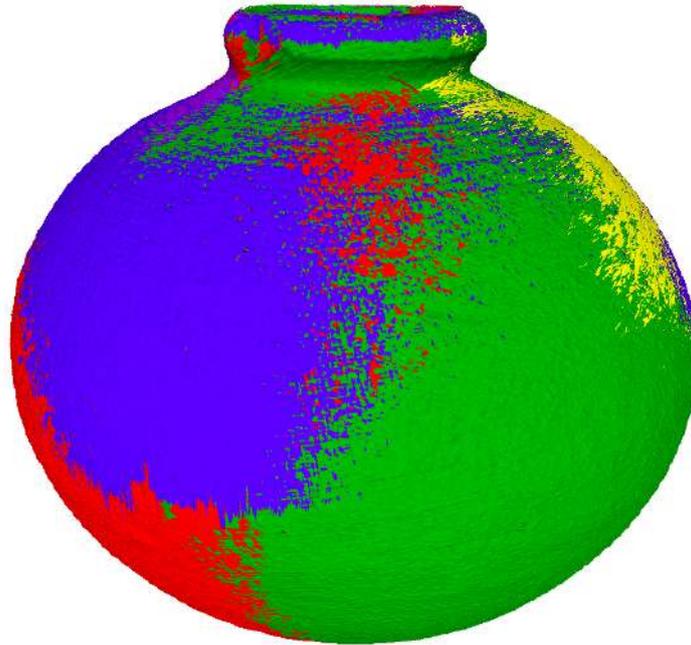


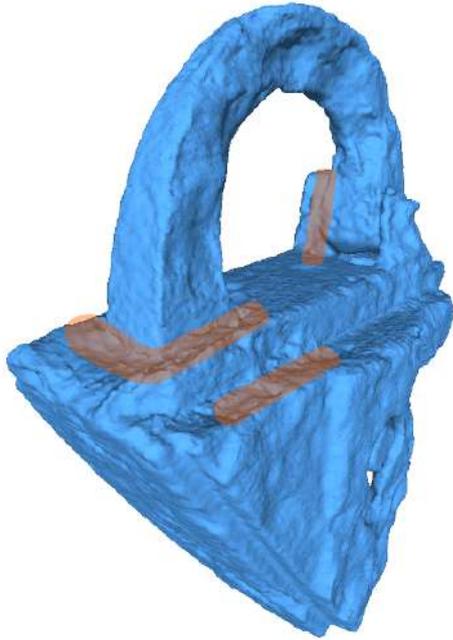
Abbildung 6.3: Registrierte Aufnahmen der Handgranate mittels Laserscanner. Jede Einzelaufnahme ist in einer unterschiedlichen Farbe dargestellt.

Problem und lässt sich mit diesen Digitalisierungsverfahren nicht vermeiden. Für die Erfassung der Außenwand waren sechs Aufnahmen, eine von oben, eine von unten, und je eine von jeder der vier Seiten, ausreichend.

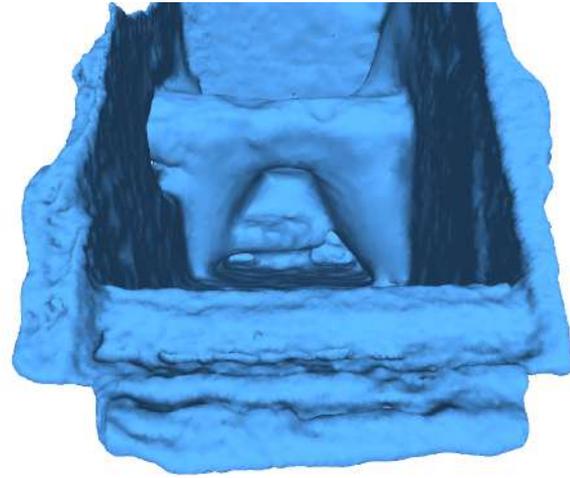
**Vorhängeschloss** Die dunkle und sehr unruhige Oberfläche des Vorhängeschlosses erforderte eine Anhebung der Belichtungszeit. Trotz der teilweisen Reflektivität des Materials treten kaum Artefakte in den Messdaten auf, weshalb die äußeren Oberflächen gut erfasst werden können.

Allerdings ist der innere Bereich schwer erfassbar, da er von Vorder- und Rückwand verdeckt wird. Damit eine Oberfläche erkannt werden kann, darf die Sichtverbindung der Oberfläche sowohl zur Laserquelle als auch zum Detektor nicht durch Hindernisse unterbrochen sein. Durch eine sorgfältige Platzierung des Objekts und mehrere Aufnahmen aus unterschiedlichen Perspektiven lässt sich diese Bedingung zwar für einen Großteil der inneren Oberflächen erfüllen, jedoch sind Lücken im hinteren Bereich kaum vermeidbar. Diese Lücken in der Punktwolke haben nach der Oberflächenrekonstruktion ein Resultat zur Folge, welches sich in diesem Bereich stark vom zugrundeliegenden Objekt unterscheidet und in Abbildung 6.4b dargestellt ist.

Eine weitere Schwierigkeit stellt der bewegliche Bügel des Vorhängeschlosses dar. Um Aufnahmen aus unterschiedlichen Perspektiven erstellen zu können, muss entweder der Scanner oder das Objekt bewegt werden. Aufgrund des oben beschriebenen Aufbaus verbleibt nur die Bewegung des Objekts als mögliche Option. Bei dieser Bewegung kann



(a) Feiner Löcher und Risse (*orange Markierungen*) werden im Modell nicht abgebildet



(b) Artefakte bei schwer einsehbaren Bereichen im Inneren

Abbildung 6.4: Probleme bei der Digitalisierung des Vorhängeschlosses mittels Laserscanner

sich der Bügel jedoch verschieben, wodurch im nachfolgenden Registrierungsprozess keine konsistente Ausrichtung der Einzelaufnahmen möglich ist. Behelfen kann man sich hier mit einer Fixierung des Bügels (beispielsweise durch Knetradiergummi). Auch diese Hilfsmittel zur Fixierung werden jedoch vom Laserscanner erfasst und müssen anschließend softwareseitig entfernt werden, was nur manuell möglich ist und somit einen gewissen Zeitaufwand zur Folge hat.

Überdies hinaus weist das Objekt an vielen Stellen kleine Risse und Löcher auf. Diese Details werden durch den Laserscanner zwar erfasst und demzufolge auch in der Punktwolke abgebildet, lassen sich bei der Oberflächenrekonstruktion jedoch kaum erhalten, wie in Abbildung 6.4a zu sehen ist. Schließlich könnten die feinen Lücken in der Punktwolke auch durch fehlende Messwerte an diesen Stellen entstanden sein. Diese Frage nach der Ursache dieser Lücken lässt sich algorithmisch nicht entscheiden. Die zugrundeliegenden mathematischen Verfahren setzen also eine gewisse Glattheit der Objektoberfläche voraus, um zuverlässige Ergebnisse zu liefern. Die komplexe Topologie des Originalobjekts kann somit im Computermodell nur unzureichend abgebildet werden.

**Holzteller** Der Holzteller hat eine gut zu erfassende Oberfläche. Die Löcher im Holz werden durch den Laserscanner erkannt und durch die Oberflächenrekonstruktion erhalten. Da vom „Boden“ der Löcher meist keine Messwerte vorhanden sind, ist die Tiefe der Löcher jedoch nicht bekannt. Im in Abbildung 6.5b dargestellten Computermodell sind

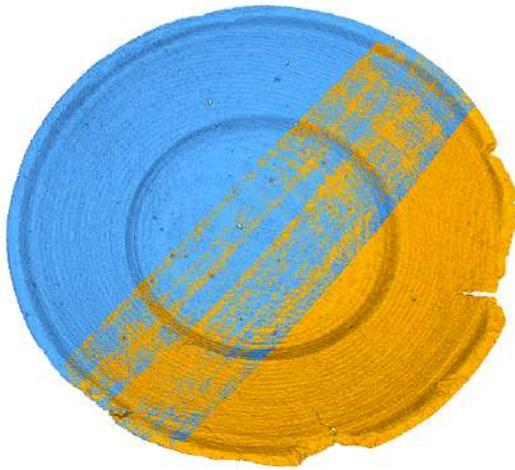
sie deshalb meist weniger tief als am realen Objekt. Allerdings lassen sich viele Löcher auch mit dem menschlichen Auge nicht oder nur schwer einsehen.

Am oberen Rand des Tellers befindet sich ein zur Mitte hin immer weiter verjüngender Riss. Irgendwann unterschreitet die Breite des Risses die Schwelle, ab welcher er durch den Algorithmus zur Oberflächenrekonstruktion als solcher erkannt wird. Unterhalb dieser Schwelle ist der Riss im Computermodell deshalb nicht erkennbar. Doch auch bei einer größeren Breite des Risses entsteht algorithmisch bedingt lediglich eine Einkerbung in der Oberfläche und keine tatsächliche Durchdringung.

Mit einem Durchmesser von knapp zwanzig Zentimetern ist der Holzteller größer als die drei zuvor betrachteten Beispielobjekte. Durch die Variation des Abstands des Laserscanners vom Objekt lässt sich die Messapparatur an das zu digitalisierende Objekt anpassen. Allerdings ist der Messbereich des Laserscanners sowohl nach unten als auch nach oben beschränkt. Durch diesen maximalen Abstand des Laserscanners zum Objekt wird auch die Größe des zu erfassenden Objekts nach oben beschränkt. Dies tritt noch deutlicher in Erscheinung, wenn sich die maximale Ausdehnung des Objekts nicht in der Grundebene, welche am weitesten vom Laserscanner entfernt ist, einstellt, sondern in einem Bereich, welcher sich näher am Laserscanner befindet. Dies ist auch beim Holzteller der Fall, welcher den maximalen Durchmesser am oberen Rand aufweist. Aus diesem Grund war es nicht möglich, den Scanner einerseits weit genug vom Beispielobjekt entfernt zu positionieren, um den gesamten oberen Rand zu erfassen, und andererseits so nah am Objekt zu platzieren, dass der Boden des Tellers noch erfasst werden kann, indem der Abstand zum Laserscanner die obere Schranke des Messbereichs nicht überschreitet. Die einzige Lösung stellt die Erfassung der Objektoberseite in zwei überlappenden Einzelaufnahmen dar, welche anschließend wie alle anderen Einzelaufnahmen auch gegeneinander registriert und anschließend fusioniert werden. Die zwei registrierten Aufnahmen von oben sind in Abbildung 6.5a zu sehen. Bei der Aufnahme von unten war eine Aufteilung hingegen nicht nötig, da sich hier die größte Ausdehnung am weitesten vom Laserscanner entfernt befindet. Während der daraus resultierende zeitliche Mehraufwand bei zwei Einzelaufnahmen (pro Perspektive) noch überschaubar ist, kann dies für größere Objekte ein relevantes Problem darstellen.

Die näherungsweise Rotationssymmetrie des Holztellers erwies sich bei der Registrierung der Einzelaufnahmen als Schwierigkeit. Als einziger Anhaltspunkt abgesehen von einigen Details am oberen Objektrand fungierten die Löcher in der Oberfläche. Durch eine sorgfältige Auswahl der Korrespondenzen konnte jedoch auch hier ein zufriedenstellendes Ergebnis gewonnen werden.

**Arzneifläschchen** Transparente oder halbtransparente Objekte stellen für viele optische Messverfahren ein Problem dar, wie auch für Laserscanner. Einerseits reflektiert die glatte Oberfläche verhältnismäßig stark, wodurch nur Messdaten von Bereichen gewonnen werden konnten, deren Oberfläche (fast) senkrecht zum Laserstrahl verläuft. Zusammen mit der teilweisen Beschichtung der Innenseite der Flasche ist das transparente Glas dafür verantwortlich, dass an manchen Stellen die Außenwand der Flasche erfasst wird, an anderen Stellen jedoch die Innenwand, wie in Abbildung 6.6 zu sehen



(a) Zwei gegeneinander registrierte Ausschnitte der Oberseite



(b) Das finale Modell des Holztellers

Abbildung 6.5: Digitalisierung des Holztellers mittels Laserscanner. Während die Risse am oberen Rand in den partiellen Scans noch zu erkennen sind, wurden sie im finalen Modell durch den Algorithmus zur Oberflächenrekonstruktion geschlossen.

ist. Da dieser Sachverhalt auch vom Winkel der Oberfläche zum Laserstrahl bedingt wird, ist eine Registrierung der Einzelaufnahmen unmöglich. Durch die uneinheitliche Oberfläche des Computermodells wäre das Resultat ohnehin unbrauchbar. Auch falls die Erfassung der Glasoberfläche zuverlässig möglich wäre, würde die Registrierung der Einzelaufnahmen der fast perfekt rotationssymmetrischen Flasche eine enorme Herausforderung darstellen.

**Krug** Die relativ dunkle Oberfläche des Kruges konnte mit einer leicht erhöhten Belichtungszeit gut erfasst werden. Artefakte waren in den gewonnen Rohdaten nicht zu erkennen, da die Reflexionen ausreichend diffus waren. Um die Innenseite der Öffnung

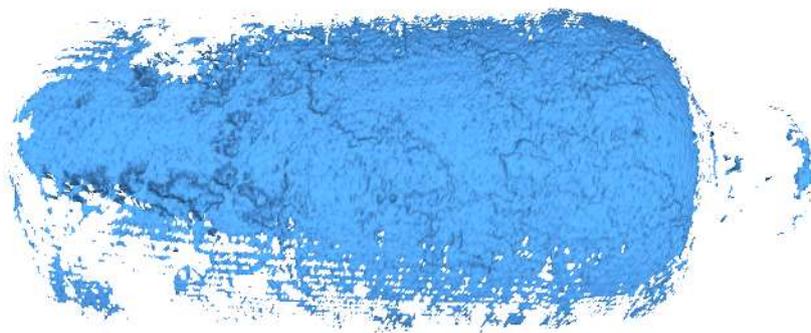
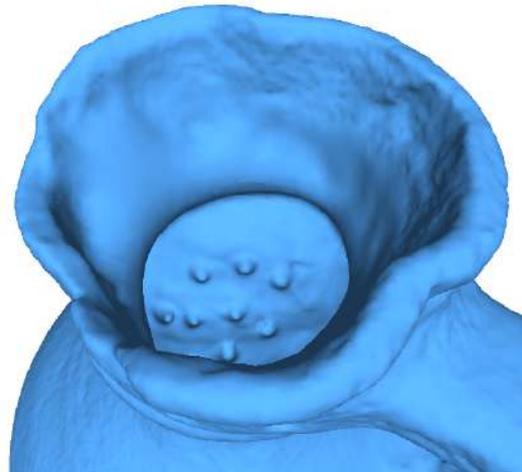


Abbildung 6.6: Digitalisierung des Arzneifläschchens mittels Laserscanner: Dieses Objekt kann auf diese Weise nicht digitalisiert werden, da das dargestellte partielle Modell große Lücken aufweist und die Außenwand nicht zuverlässig wiedergibt.



(a) Hohe Qualität des resultierenden Computermodells



(b) Durch fehlende Messpunkte verursachte Störung im Modell

Abbildung 6.7: Digitalisierung des Holztellers mittels Laserscanner. Während die Risse am oberen Rand in den partiellen Scans noch zu erkennen sind, wurden sie im finalen Modell durch den Algorithmus zur Oberflächenrekonstruktion geschlossen.

oben und des seitlichen Griffs erfassen zu können, muss das Objekt sehr genau platziert werden. Die hierfür notwendigen Versuche sind sehr zeitaufwendig. Fehlende Messpunkte im Bereich der Öffnung resultieren in einer Verjüngung dieser Öffnung in der aus der Punktwolke rekonstruierten Oberfläche, wie in Abbildung 6.7b zu sehen ist.

Während im Bereich der Öffnung und des Griffs ausreichend geometrische Merkmale vorhanden sind, um eine zuverlässige Registrierung der Einzelaufnahmen zu ermöglichen, weist die Unterseite und die vom Griff abgewandte Seite kaum geometrische Details auf. Die Registrierung ist deshalb in diesem Fall ungenau. Dennoch weist das in Abbildung 6.7a dargestellte finale Computermodell eine hohe Qualität auf.

**Scheibenleuchter** Die reflektierende Metalloberfläche des Scheibenleuchters ermöglicht es, die Belichtungszeit auf 0,75 ms zu senken und somit die Artefakte zu minimieren. Allerdings hat diese Oberflächenbeschaffenheit wie auch bei dem Arzneifläschchen zur Folge, dass nur diejenigen Bereiche erfasst werden können, deren Oberfläche fast senkrecht zum Laserstrahl verläuft. In Kombination mit dem Fehlen geometrischer Merkmale aufgrund der Rotationssymmetrie des Objekts ist eine Digitalisierung des Scheibenleuchters mittels Laserscanner praktisch nicht möglich oder zumindest mit einem außerordentlich hohen Aufwand verbunden. Eine Einzelaufnahme des Scheibenleuchters ist in Abbildung 6.8 zu sehen.

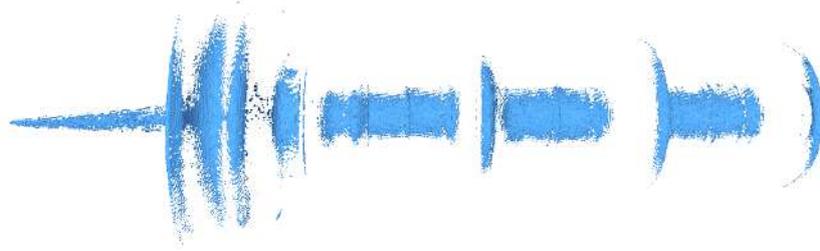


Abbildung 6.8: Die geringe Ausbeute an Messpunkten macht den für eine Digitalisierung des Scheibenleuchters mittels Laserscanner notwendigen Aufwand deutlich.

**Bahrtuchschild** Während die Vorderseite dieses metallenen Bahrtuchschildes stumpf ist und somit einfallendes Licht diffus reflektiert, ist die Rückseite glänzend. Dies hat zur Folge, dass die Vorderseite mit einer kurzen Belichtungsdauer in einer sehr hohen Qualität erfasst werden konnte. Die geometrischen Details werden sehr präzise wiedergegeben und es sind kaum Artefakte zu erkennen. Für die glänzende Rückseite trifft dies jedoch nicht zu: Im Computermodell zeigen sich zahlreiche Artefakte in Form von Spitzen oder Löchern, was eine originalgetreue Rekonstruktion unmöglich macht. Eine Möglichkeit zur Vermeidung dieses Problems wäre die Verwendung eines Matt-Sprays, um die starken Reflexionen der Oberfläche zu verhindern. Abbildung 6.9 stellt die Modelle von Vorder- und Rückseite gegenüber.

Durch die Größe des Objekts musste auch hier die Erfassung in mehrere Bereiche unterteilt werden. Für Vorder- und Rückseite wurden jeweils drei Einzelaufnahmen angefertigt. Eine Registrierung dieser Aufnahmen ist aufgrund der hohen Dichte an geometrischen Details unproblematisch.

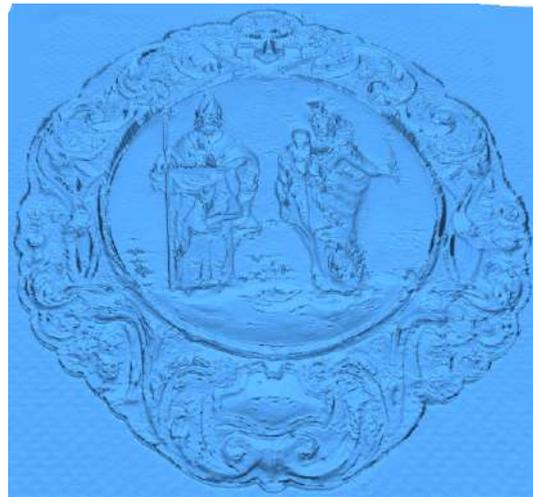
Ein weiteres Problem könnte bei der Erfassung der Seiten dieses sehr dünnen Objekts entstehen. Einerseits ist die senkrechte Fixierung des Schildes nicht leicht zu bewerkstelligen, andererseits ist die zu erwartende Anzahl an Messpunkten pro Einzelaufnahme derart gering, dass eine hohe Anzahl dieser Aufnahmen notwendig wäre und deren saubere Registrierung kaum möglich sein dürfte. Aufgrund der niedrigen Qualität des Modells der Rückseite war eine komplette Rekonstruktion des Objekts ohnehin nicht möglich, weshalb auf eine Erfassung der Seiten verzichtet wurde.

## 6.2 Stationärer Streifenlichtscanner

**Tondeckel** Für die Digitalisierung des Tondeckels via Streifenlichtscanner wurde das Objekt, wie in allen folgenden Experimenten auch, auf einem Drehteller platziert. Für dieses Objekt genügte eine Schrittweite des Drehtellers von  $45^\circ$ , was acht Aufnahmen pro Umdrehung entspricht. Neben einer Aufnahmereihe, bei welcher das Objekt eben auf dem Drehteller positioniert wurde, erfolgten vier seitliche Aufnahmereihen, je zwei von der Oberseite und der Unterseite. Hierzu wurde einseitig eine Unterlage unter den Tondeckel geschoben, welche ihn auf einer Seite anhob und so aus Sicht der Kamera je nach Position des Drehtellers einen seitlichen oder einen frontalen Blick auf das Objekt



(a) Modell der Vorderseite



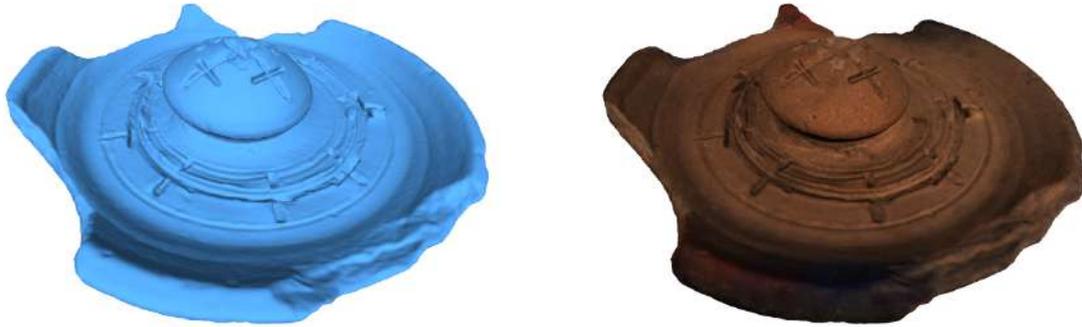
(b) Modell der Rückseite

Abbildung 6.9: Die Qualität der mittels Laserscanner erfassten Daten ist bei stark reflektierenden Oberflächen, wie der Rückseite des Bahrtuchschildes, deutlich schlechter als bei matten Oberflächen.

ermöglichte. Durch die zwei Aufnahmereihen pro Seite wurde sichergestellt, dass aus möglichst jedem Winkel eine frontale und eine seitliche Ansicht erstellt wurde. Allerdings sorgt der an vielen Stellen erhöhte Rand des Tondeckels dafür, dass ein direkter Blick auf den Bereich unterhalb des Griffs nicht möglich ist. Dennoch ist das in Abbildung 6.10a dargestellte Computermodell in allen Bereichen geometrisch hochwertig und gibt auch feine Details, wie beispielsweise die Einritzungen auf der Oberseite, akkurat wider.

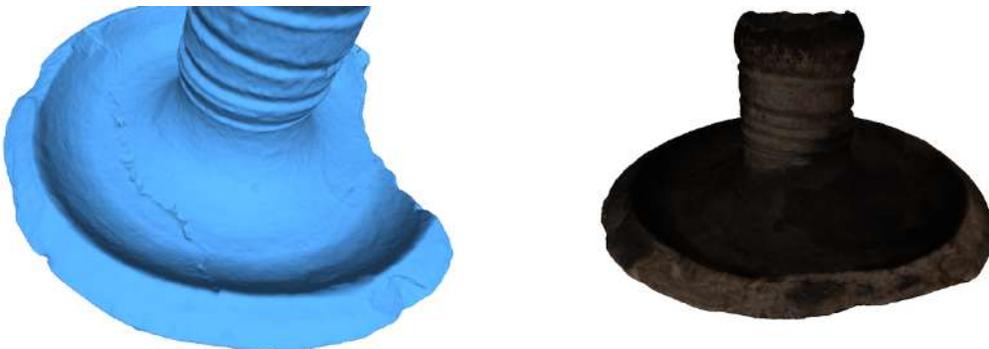
Auch die berechnete Textur des Modells zeigt, wie in Abbildung 6.10b zu sehen, kaum Störungen in Form von Artefakten. Lediglich an einigen Stellen zeigt sie Verfärbungen in der Farbe der Fixierhilfsmittel, was bei mehreren Beispielobjekten beobachtet werden konnte und vermutlich von den verwendeten Algorithmen herrührt, aber durch dunklere Fixierhilfsmittel verhindert werden könnte. Allerdings ist die Auflösung der Textur nicht sonderlich hoch. Gründe hierfür könnte einerseits eine zu geringe Tiefenschärfe bei der Bilderfassung, andererseits aber auch eine schlechte Parametrisierung des Texturatlas durch die die Rohdaten verarbeitende Software sein, die dazu führt, dass nur ein geringer Anteil der Texturdatei tatsächlich für die Texturierung des dreidimensionalen Modells verwendet wird. Unabhängig davon mussten trotz Kalibrierung des Streifenlichtscanners Farbton und Helligkeit der Texturdatei nachträglich angepasst werden.

**Kerzenhalter** Ähnlich dem Tondeckel wurde der Kerzenhalter für die Digitalisierung auf einem Drehteller platziert und sowohl Oberseite als auch Unterseite aus mehreren Winkeln erfasst. Auch bei diesem Objekt war eine Schrittweite von  $45^\circ$  ausreichend. Zusätzlich wurde eine Aufnahme direkt von oben erstellt, um möglichst viele Informationen über das Innere des Kerzenhalters zu gewinnen. Durch den Abstand zwischen Projektor und Kamera war der Winkel zwischen den beiden Sichtstrahlen jedoch zu groß, um einerseits das Streifenmuster auf der Boden des Halters zu projizieren, andererseits aber auch



- (a) Die Modellgeometrie weist keine Artefakte auf. (b) Die Textur weist Verfärbungen auf und hat eine relativ geringe Auflösung.

Abbildung 6.10: Durch einen stationären Streifenlichtscanner gewonnenes Modell des Tondeckels ohne und mit Textur



- (a) Gute Erfassung der Geometrie, jedoch Schließung des feinen Risses (b) Die Färbung der Textur ist dunkler als die des Originalobjekts.

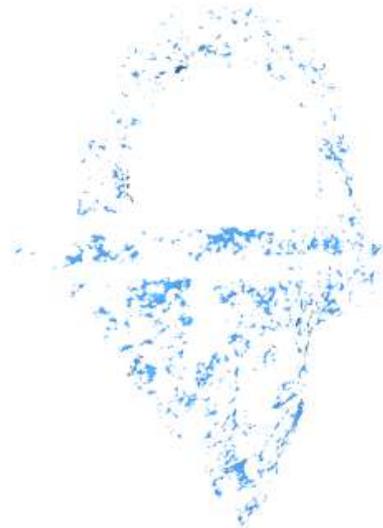
Abbildung 6.11: Ergebnis einer Erfassung des Kerzenhalters über einen stationären Streifenlichtscanner

dieses durch eine der beiden Kameras zu erfassen. Wie bei der Digitalisierung mittels Laserscanner konnte die Innenseite deshalb nur im oberen Bereich erfasst werden.

Die restlichen Bereiche des Kerzenhalters wurden jedoch zuverlässig rekonstruiert. Die feinen Oberflächenmerkmale werden detailliert wiedergegeben. Einzig der Riss im Teller des Halters erreicht im Computermodell bei Weitem nicht die Tiefe des Originals, wie in Abbildung 6.11a erkennbar ist. Dies wird durch den Algorithmus zur Oberflächenrekonstruktion verursacht, der eine glättende Wirkung hat.

Die Registrierung der Einzelaufnahmen war im Gegensatz zur Erfassung durch den Laserscanner bei dieser Digitalisierungsmethode hingegen kein Problem. Der Prozess wurde durch die Software halbautomatisch erfolgreich durchgeführt.

Bezüglich der Texturierung des Modells gelten im Wesentlichen die gleichen Erkenntnisse wie bei der Digitalisierung des Tondeckels mittels Streifenlichtscanner. Die Auflösung ist nicht hoch genug, um die Färbung der Oberfläche akkurat wiederzugeben. Des weiteren entspricht die Färbung der Oberfläche nicht der des realen Objekts, in diesem Fall ist sie zu dunkel, wie in Abbildung 6.11b zu sehen.



- (a) Die Geometrie der Handgranate wird aus-  
gezeichnet erfasst. (b) Von der Oberfläche des Vorhängeschlosses  
werden kaum Messpunkte gewonnen.

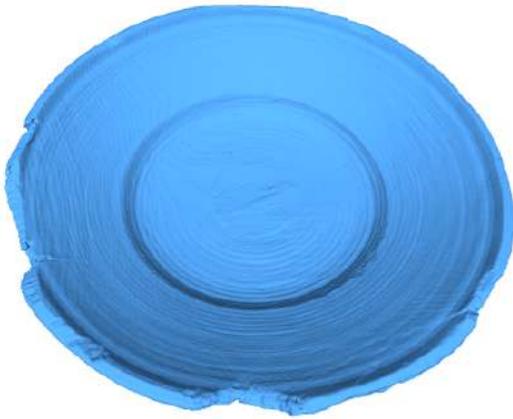
Abbildung 6.12: Digitalisierung von Handgranate und Vorhängeschloss mittels des stationären Streifenlichtscanners

**Handgranate** Auch die Handgranate konnte mithilfe des Streifenlichtscanners erfolgreich digitalisiert werden. Es wurden drei Aufnahmereihen in unterschiedlichen Höhen erstellt. Ergänzt wurden diese durch je eine Aufnahme frontal von oben und von unten.

Selbstverständlich konnten auch in diesem Fall keine Messpunkte aus dem Inneren der Handgranate gewonnen werden. Die Außenwand wird jedoch, wie in Abbildung 6.12a dargestellt, detailgetreu wiedergegeben, da selbst leichte Furchen oder Änderungen in der Rauheit der Oberfläche erkennbar sind.

Auch bei diesem Objekt war die halbautomatische Registrierung der Einzelaufnahmen durch die Software erfolgreich, während dieser Verarbeitungsschritt beim Laserscanner ein relevantes Problem darstellte. Dies lässt sich durch die Erfassung der Objekttextur erklären, welche beim Streifenlichtscanner im Gegensatz zum Laserscanner stattfindet. Durch leichte Variationen in der Oberflächenfärbung lassen sich hier wertvolle Informationen über die Position der einzelnen Aufnahmen zueinander gewinnen, welche aufgrund der fehlenden Geometriedetails nicht anderweitig ermittelt werden können.

**Vorhängeschloss** Die sehr dunkle und teilweise reflektierende Oberfläche des Vorhängeschlosses stellt bei der Digitalisierung mit dem Streifenlichtscanner ein Problem dar. Trotz einer vollständigen Verdunkelung des umgebenden Raumes konnte kein ausreichender Kontrast zwischen den Reflexionen heller und dunkler Streifen der Projektion erreicht werden. Aus diesem Grund wird die Oberfläche in vielen Bereichen nicht erfasst, was in einer Punktwolke mit vielen Lücken und Löchern resultiert, die in kein sinnvolles Modell überführt werden kann. Ein Beispiel einer solchen lückenhaften Punktwolke einer Einzelaufnahme ist in Abbildung 6.12b zu sehen.



- (a) Abgesehen von Rissen und Löchern im Holz wird die Objektgeometrie sehr gut erfasst. (b) Zwei gegeneinander registrierte Einzelaufnahmen des Arzneifläschchens zeigen eine sehr lückenhafte Oberfläche.

Abbildung 6.13: Digitalisierung von Holzteller und Arzneifläschchen mittels des stationären Streifenlichtscanners

Die Qualität, in welcher die komplexe Topologie des Schlosses erfasst wird, kann aufgrund der lückenhaften Punktwolke nicht bewertet werden.

**Holzteller** Die Geometrie des Holztellers wurde sehr detailliert erfasst, was auch in Abbildung 6.13a zu erkennen ist. Sämtliche Rillen im Holz sind gut zu erkennen. Die Löcher im Holz sind ebenfalls sichtbar, erscheinen jedoch sehr flach. Der Grund dafür liegt wie schon bei der Digitalisierung mittels Laserscanner im Algorithmus zur Oberflächenrekonstruktion aus der Punktwolke. Selbiges gilt für die Risse am oberen Rand. Diese sind mithilfe des Streifenlichtscanners erstellten Modell sehr flach und kaum zu erkennen. Durch eine Optimierung der Parameter des Algorithmus zur Oberflächenrekonstruktion könnten hier gegebenenfalls noch bessere Resultate erzielt werden.

Wie bei den vorherigen Modellen erscheint die Textur in vielen Bereichen aufgrund einer zu niedrigen Auflösung unscharf. Die Maserung des Holzes ist dennoch zu erkennen. Es soll erneut betont werden, dass diese Problematik durch eine bessere softwareseitige Umsetzung der Texturparametrisierung seitens des Herstellers behoben werden könnte und keine diesem Verfahren inhärente Schwäche darstellt.

**Arzneifläschchen** Durch die Transparenz des gläsernen Fläschchens können nur wenige der projizierten Streifen von den Kameras erkannt und in Messpunkte umgesetzt

werden. Die resultierenden Einzelaufnahmen weisen daher viele Löcher auf, wie in Abbildung 6.13b zu sehen ist. Außerdem wird wie beim Laserscanner an einigen Stellen die innere (beschichtete) Oberfläche der Flaschenwand anstatt der durchsichtigen Außenwand erkannt.

Die erfasste Textur des Arzneifläschchens ist unter verschiedenen Aufnahmewinkeln nicht konsistent genug, dass bei manueller Verarbeitung eindeutige Korrespondenzen für den Registrierungsvorgang erkannt werden können. Auch eine vollautomatische Registrierung liefert ein ungenaues Ergebnis, welches überdies hinaus aus obigem Grund nicht validiert werden kann. Insgesamt ist also auch mit diesem Digitalisierungsverfahren kein brauchbares Ergebnis erreichbar.

**Scheibenleuchter** Trotz der stark reflektierenden metallenen Oberfläche konnte die Geometrie des Scheibenleuchters sehr gut erfasst werden. Aufgrund der Höhe des Objekts mussten insgesamt 72 Einzelaufnahmen von unterschiedlichen Abschnitten angefertigt werden. Die aus einer einzelnen Aufnahme entstandenen partiellen Modelle weisen kleine Löcher auf, das aus allen Aufnahmen kombinierte Modell zeigt jedoch eine glatte und geschlossene Oberfläche, welche den gesamten Schaft, den Teller und den Dorn in einer exzellenten Qualität abbildet, wie in Abbildung 6.14a dargestellt wird. Einzig die Innenseite des Fußes konnte nicht vollständig erfasst werden. Dies wird einerseits der dunklen und stumpfen Oberfläche geschuldet, andererseits aber auch der Schwierigkeit, den Streifenlichtscanner so auszurichten, dass alle relevanten Oberflächen durch die Kameras eingesehen werden können. Derartige Hohlräume sind durch den etwas klobigen stationären Scanner schwer zu erfassen.

Während die Qualität der Geometrie im Computermodell sehr hoch ist, verschlechtern die Reflexionen die Textur enorm. Es zeigt sich deutlich, dass die Textur an Oberflächen, welche senkrecht zu einer der Scanrichtungen verlaufen, eine höhere Helligkeit aufweist als an anderen Oberflächen, was auch in Abbildung 6.14b zu sehen ist. Im Bereich des Tellers sind hier sogar harte Kanten zwischen helleren und dunkleren Bereichen zu erkennen. Während die Textur für einige Anwendungen brauchbar sein mag, zeigt sie also deutliche Unterschiede zur originalen Färbung des Scheibenleuchters.

**Bahrtuchschild** Für die Erfassung der Vorderseite des Bahrtuchschildes wurde das Objekt auch hier auf einem Drehteller platziert und aus zwei verschiedenen Höhen jeweils zwölf Einzelaufnahmen angefertigt. Trotz der Reflexionen konnten die geometrischen Details in den meisten Bereichen zuverlässig rekonstruiert werden, wie in Abbildung 6.15a zu sehen ist. Allerdings existieren kleinere Flächen, an welchen in keiner der Einzelaufnahmen Messpunkte vorliegen. Dies äußert sich auch im finalen Modell durch weniger ausgeprägte Details in diesen Bereichen. Die Form der Oberfläche wirkt hier etwas verwaschen, da sie nur anhand der umgebenden Formen geschätzt werden kann.

Wie schon bei der Digitalisierung mittels Laserscanner festgestellt wurde, reflektiert die Rückseite des Bahrtuchschildes deutlich stärker als die etwas stumpfe Vorderseite. Das hatte zur Folge, dass die Löcher in den partiellen Modellen der Einzelaufnahmen sowohl größer als auch zahlreicher wurden. Dies führte einerseits zu großen Bereichen,



(a) Darstellung ohne Textur



(b) Darstellung mit Textur

Abbildung 6.14: Mittels Streifenlichtscanner erstelltes Modell des Scheibenleuchters

die wie auf der Vorderseite verwaschen wirken, andererseits aber auch zu einem ausgefransten Rand, wie er in Abbildung 6.15c zu erkennen ist. Während die Vorderseite also mit einer guten Qualität erfasst wurde, konnte mit dem stationären Streifenlichtscanner von der Rückseite kein brauchbares Modell erstellt werden.

Durch die reflektierende Oberfläche weist die Textur starke Helligkeitsunterschiede auf, da senkrecht zu einer Scanrichtung befindliche Oberflächen deutlich heller texturiert werden als von der Scanrichtung abgewandte Flächen, die einfallendes Licht anstatt zur Kamera fast ausschließlich in andere Richtungen reflektieren. Ein texturiertes Modell der Vorderseite des Bahrtuchschilds ist in Abbildung 6.15b dargestellt. Da das Originalobjekt keine Texturdetails besitzt, bietet die für das Computermodell erstellte Textur keinen nennenswerten Mehrwert zum rein geometrischen Modell.

**Hermes** Die Hermes-Skulptur aus Bisquitporzellan hat eine helle, diffuse Oberfläche, die sich sehr gut zur Digitalisierung eignet. Das Resultat ist in Abbildung 6.15d zu sehen. Weder Topologie noch vorhandene Verdeckungen stellen für den Streifenlichtscanner ein Problem dar. Nur in schlecht einsehbaren Bereichen, wie beispielsweise zwischen den Oberschenkeln, an der Ferse des linken Fußes oder im Inneren des Sockels, werden Artefakte gebildet, die in den Abbildungen 6.15e und 6.15f dargestellt werden. Außerdem wird der sehr enge Einschnitt zwischen Oberkörper und rechtem Oberarm zu weit unten geschlossen. Ein ähnliches Phänomen tritt zwischen der Sohle des linken Fußes und



(a) Bahrtuchschild-Darstellung der Vorderseite ohne Textur



(b) Bahrtuchschild-Darstellung der Vorderseite mit Textur



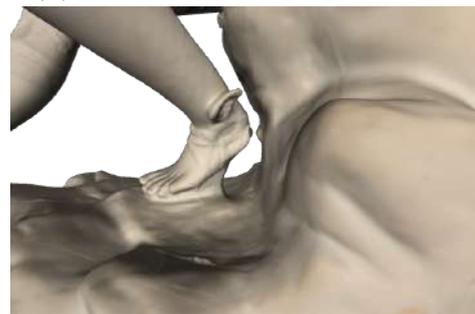
(c) Bahrtuchschild-Darstellung der lückenhaften Rückseite



(d) Hermes-Darstellung mit Textur



(e) Artefakte in durch den Scanner schlecht erreichbaren Regionen



(f) Artefakte bei in kleinem Abstand verlaufenden Flächen

Abbildung 6.15: Digitalisierung von Bahrtuchschild und Hermes mittels des stationären Streifenlicht-scanners

der Grundfläche auf, auch hier ist der Spalt zwischen den beiden Bestandteilen nicht originalgetreu ausgeprägt.

**Burgfräulein** Im Gegensatz zur Hermes-Skulptur stellt das in Abbildung 6.16a zu sehende Burgfräulein aus glasiertem Porzellan eine deutlich größere Herausforderung dar. Während die komplexe Topologie des Objekts mit Ausnahme der schwer einsehbaren Bereiche größtenteils korrekt erfasst werden konnte, zeigt die Oberfläche an vielen Stellen Artefakte in Form von Nasen, Löchern, kleinen vom eigentlichen Modell separierten Objekten und Kanten in der Oberfläche an Stellen, an welchen das Originalobjekt eine glatte Oberfläche aufweist, wie sie in den Abbildungen 6.16c und 6.16d dargestellt sind. Insbesondere die letzte Art von Artefakten wird vermutlich durch von der glänzenden Oberfläche herrührende Messfehler verursacht. Von einigen Bereichen, vorwiegend im Bereich des Rückens bzw. des Schleiers, konnte außerdem keine ausreichende Anzahl an Messpunkten ermittelt werden, um die Rekonstruktion einer Oberfläche zu ermöglichen. Mit der etwas unhandlichen Apparatur aus Projektor und Kameras ist es schwer, auch die verdeckten Bereiche zu erfassen, wie beispielsweise unter dem Hocker oder zwischen den Hüften und dem Hocker.

Ähnliche Probleme ergeben sich bei der Erfassung der Textur, welche in Abbildung 6.16b zu sehen ist. Neben den oben erwähnten Problemen durch die zu niedrige Auflösung sind aufgrund der hohen Reflektanz der Oberfläche viele glänzende Stellen zu erkennen. Außerdem sind auch in der rekonstruierten Textur Kanten zu erkennen, die keine Entsprechung am originalen Objekt haben.

Sowohl die ermittelte Geometrie als auch die Textur weisen somit starke Unterschiede zum originalen Objekt auf und sind daher nur sehr eingeschränkt brauchbar.

**Medaille** Bei der Digitalisierung einer Medaille mithilfe eines Streifenlichtscanners steht man zunächst vor der Herausforderung, wie das Objekt am besten auf dem Drehteller vor dem Scanner zu platzieren ist. Legt man die Medaille flach auf den Drehteller, so werden kaum Messpunkte von der Kante der Medaille gewonnen. Außerdem ist so die Zusammensetzung von Vorder- und Rückseite sehr anspruchsvoll, da die einzige Überschneidung die Kante darstellt, die jedoch keinerlei geometrische Details aufweist. Stattdessen wurde die Medaille durch Knetradiergummi aufrecht auf dem Drehteller fixiert und durch 16 Einzelaufnahmen aus verschiedenen Winkeln erfasst. Um einerseits die durch den Knetradiergummi verdeckten Flächen, andererseits aber auch den Rand an der Ober- und Unterseite erfassen zu können, muss die Medaille anschließend gedreht werden, woraufhin erneut Aufnahmen gewonnen werden. In diesem Fall wurde die Medaille in vier verschiedenen Drehungen im Abstand von je  $90^\circ$  im Knetradiergummi positioniert, wobei für jede Drehung 16 Aufnahmen erstellt wurden.

Trotz der glänzenden metallenen Oberfläche konnte auf diese Weise die Geometrie der Medaille ausgezeichnet erfasst werden, wovon man sich in Abbildung 6.17a überzeugen kann. Lediglich an zwei bis drei kleinen Stellen sind Artefakte in Form kleiner Nasen zu erkennen.

Auch die ohnehin sehr homogene Textur wurde erfolgreich erfasst. Entlang einiger



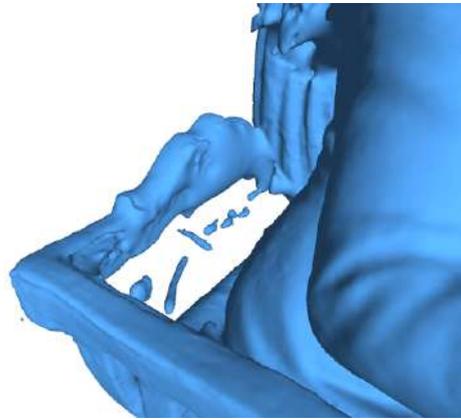
(a) Computermodell ohne Textur



(b) Computermodell mit Textur



(c) Artefakte im Bereich der Kopfbedeckung



(d) Artefakte im Bereich der Rückenlehne

Abbildung 6.16: Via Streifenlichtscanner gewonnenes Modell des Burgfräuleins



(a) Modell ohne Textur



(b) Modell mit Textur

Abbildung 6.17: Computermodell einer Medaille, welches mithilfe eines stationären Streifenlichtscanners gewonnen wurde

geometrischer Kanten sind jedoch leichte Artefakte zu sehen, die von der Parametrisierung des Texturatlas herrühren. Im Farbton zeigt sich außerdem ein verhältnismäßig starkes Rauschen, das bereits in der Textur der Einzelaufnahmen vorhanden ist. Dies wird möglicherweise durch die getrennte Erfassung der Rot-, Grün- und Blautöne durch den Streifenlichtscanner verursacht. Außerdem erscheint aufgrund der reflektierenden Oberfläche der Rand in den Bereichen, welche sich senkrecht zur Aufnahmeerichtung erstrecken, deutlich heller als in abgewandten Bereichen. Das texturierte Computermodell ist in Abbildung 6.17b dargestellt.

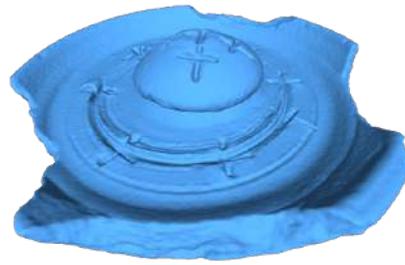
### 6.3 Handgeführter Streifenlichtscanner

**Tondeckel** Neben den bisher betrachteten Verfahren soll der Tondeckel auch mittels eines handgeführten Streifenlichtscanners digitalisiert werden, um mit der entsprechenden Hard- und Software experimentieren zu können und diese mit den andere Verfahren vergleichen zu können. Das Resultat ist in Abbildung 6.18 zu sehen. Die raue und daher diffuse Oberfläche erlaubt eine sehr gute Erfassung sowohl der Geometrie als auch der Textur des Tondeckels. Die Textur ist hochaufgelöst, allerdings erscheint sie an manchen Stellen etwas unscharf, was vermutlich dadurch verursacht wurde, das die Texturkamera nicht perfekt auf das Objekt fokussiert wurde. Da diesbezüglich keine Konfigurationsmöglichkeiten geboten werden und auch seitens des Herstellers keine weiterführenden Informationen veröffentlicht wurden, ist eine Verbesserung des Resultats hier nicht möglich.

Um die Geometrie vollständig erfassen zu können, wurden zwei partielle Modelle in zwei verschiedenen Positionen des Objekts erstellt. Für die erste Aufnahme wurde der



(a) Modell mit Textur



(b) Modell ohne Textur

Abbildung 6.18: Durch handgeführten Streifenlichtscanner erstelltes Modell des Tondeckels

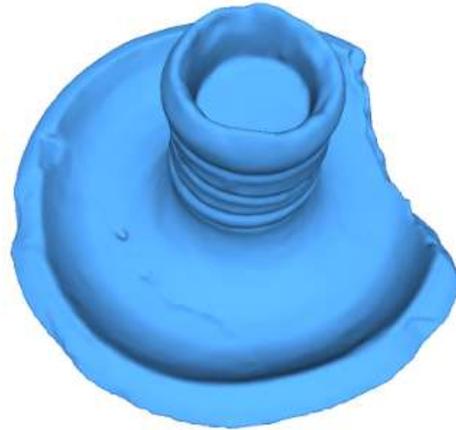
Tondeckel eben auf einem manuell bedienten Drehteller platziert, um die Oberseite erfassen zu können. Anschließend wurde das Objekt auf dem Kopf platziert, um eine Aufnahme der Unterseite zu ermöglichen, wobei auch hier ein Drehteller verwendet wurde. Der Drehteller diente ausschließlich dazu, das Objekt komfortabel von allen Seiten erfassen zu können, ohne den Scanner komplett um das Objekt führen zu müssen. Im Gegensatz zum zuvor betrachteten stationären Streifenlichtscanner wird dieser hier nicht durch die Software automatisch, sondern manuell betätigt.

Die Geometrie der partiellen Modelle weist keine Artefakte auf, einzig unter dem Griff des Tondeckels zeigen sich Unsauberheiten, da dieser Bereich kaum von außen einsehbar ist. Durch die Abbrüche an den Rändern bietet der Tondeckel Flächen, welche in beiden partiellen Modellen enthalten sind, da sie von Ober- und Unterseite einsehbar sind. Diese überlappenden Flächen sind für den Registrierungsvorgang, welcher der Zusammenführung der beiden partiellen Modelle dient, von höchster Wichtigkeit. Da die Überlappung bei diesem Objekt groß genug ist, traten beim Registrieren keine Probleme auf und es konnte ein vollständiges Modell von sehr hoher Qualität erzeugt werden.

**Kerzenhalter** Sowohl die Geometrie als auch die Textur des Computermodells des Kerzenhalters sind von hoher Qualität, wie in Abbildung 6.19 erkennbar ist. Zur Erfassung wurde der Kerzenhalter einmal stehend platziert, um die Oberseite erfassen zu können. Anschließend wurden zusätzlich zwei Aufnahmen schräg von unten erstellt, die beide die Unterseite des Kerzenhalters zeigen. Die Registrierung dieser Einzelaufnahmen war unproblematisch. Einzig das Innere des Halters konnte wie bei den bisher betrachteten Verfahren nicht erfasst werden, da trotz der Flexibilität des Gerätes die für die Geometrieerfassung wichtigen Komponenten (Streifenlichtprojektor und Kameras) einen gewissen Abstand zueinander haben und es daher nicht möglich ist, von beiden Komponenten gleichzeitig eine ununterbrochene Sichtlinie zur Innenwand des Kerzenhalters zu bilden. Außerdem wird, wie bereits bei der Digitalisierung durch den stationären Streifenlichtscanner, der Riss auf der Oberseite bei der Berechnung der Oberfläche weitgehend geschlossen. Die Auflösung der Textur ist hoch, allerdings erscheint sie an manchen Stellen etwas unscharf, was vermutlich auch hier durch eine mangelhafte Fokussierung der Texturkamera verursacht wurde.



(a) Modell mit Textur



(b) Modell ohne Textur

Abbildung 6.19: Computermodell des Kerzenhalters



(a) Modell mit Textur



(b) Modell ohne Textur

Abbildung 6.20: Modell der Handgranate, welches mittels Artec Spider erstellt wurde

**Handgranate** Auch die Handgranate konnte mittels des handgeführten Streifenlichtscanners erfolgreich digitalisiert werden. Sämtliche geometrischen Unebenheiten in der Objektoberfläche werden exakt erfasst. Doch selbstverständlich kann auch hier das Innere des Objekts nicht detektiert werden. Dank der Aufnahme der Textur konnten auch hier die einzelnen Aufnahmen erfolgreich gegeneinander registriert werden. Das resultierende Modell ist in Abbildung 6.20 dargestellt.

Ebenso zeigt die Textur des Computermodells keinerlei Artefakte, ist jedoch wie bereits bei Tondeckel und Kerzenhalter etwas unscharf.

**Vorhängeschloss** Trotz der dunklen und wenig diffusen Oberfläche konnten unter Verwendung des handgeführten Streifenlichtscanners im Gegensatz zur Digitalisierung durch den stationären Streifenlichtscanner genügend Messpunkte ermittelt werden, um ein voll-

ständiges Computermodell erstellen zu können, das in den Abbildungen 6.21a und 6.21b dargestellt ist. Um die teilweise verdeckten Flächen bestmöglich zu erfassen, wurde das Vorhängeschloss in drei verschiedenen Positionen digitalisiert und jeweils ein partielles Modell erstellt. Damit diese Modelle konsistent sind, war es notwendig, dass sich der bewegliche Bügel des Schlosses für jede Aufnahme in exakt der gleichen Position befindet. Die anschließende Registrierung der einzelnen partiellen Modelle stellte jedoch keine Schwierigkeit dar.

Durch die zahlreichen Hinterschneidungen und Verdeckungen konnten einige Bereiche des Objekts allerdings nicht erfasst werden, wie beispielsweise unterhalb der Befestigung des Bügels oder im Inneren des Schlosses. Hier zeigen sich im resultierenden Modell deutliche Artefakte, wie in Abbildung 6.21c zu sehen ist. Abbildung 6.21d zeigt, dass auch die zahlreichen schmalen Spalte und kleinen Löcher in der Oberfläche des originalen Objekts bei der Rekonstruktion der Oberfläche geschlossen werden und dadurch verloren gehen. Von diesen durch die Objektbeschaffenheit verursachten Unsauberheiten abgesehen gibt das Computermodell die Geometrie des Vorhängeschlosses detailgetreu wieder.

Auch die Textur des Objekts wird zuverlässig erfasst. Die reflektierende Oberfläche würde vermuten lassen, dass die Textur wie bei zuvor betrachteten Verfahren beim Digitalisieren reflektierender Objekte helle Verfärbungen aufweist. Dies ist hier allerdings nicht der Fall, was einerseits durch die dunkle Oberfläche verursacht wird, andererseits aber auch dadurch ermöglicht wird, dass das Objekt durch den handgeführten Scanner im Gegensatz zu Laserscanner oder stationärem Streifenlichtscanner aus sehr vielen verschiedenen Richtungen beleuchtet und erfasst wird.

**Holzteller** Die Qualität des Computermodells des Holztellers ist sowohl bezüglich der Geometrie als auch der Textur exzellent, wie in Abbildung 6.22 zu sehen ist. Die Maserung des Holzes wird ebenso wie die Löcher darin akkurat wiedergegeben. Einzig kleine Risse im Holz am oberen Rand des Tellers erscheinen im Modell nicht so tief wie im Original. Auch die Textur hat keine Spuren von Artefakten und wurde in jedem Bereich zuverlässig erfasst.

Die Erfassung des Objekts gestaltete sich jedoch nicht trivial. Da Ober- und Unterseite weitestgehend parallel verlaufen und der Rand am Zusammentreffen der beiden Flächen relativ schmal ist, haben Aufnahmen von der Ober- und von der Unterseite nur eine geringe Überschneidung. Umso wichtiger ist es, diesen Bereich sauber zu erfassen. Da die Einzelaufnahmen dort allerdings nur aus wenigen Punkten bestehen, läuft der Scanner beim Aufnahmevorgang Gefahr, das sogenannte Tracking zu verlieren, das die relative Abweichung zweier aufeinanderfolgender Einzelaufnahmen beschreibt. Hier hilft es, das Objekt auf einer texturierten Oberfläche zu platzieren, die dann sowohl für Aufnahmen von oben als auch von der Seite einsehbar ist und somit als Orientierungsebene fungieren kann.

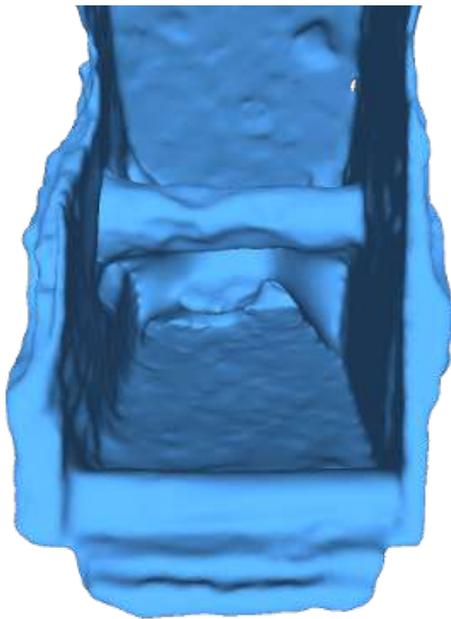
**Arzneifläschchen** Durch einen in Anbetracht der geringen Größe und einfachen Struktur des Objekts sehr langen Messvorgang konnten ausreichend viele Messpunkte ermit-



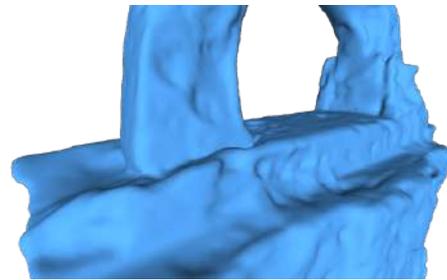
(a) Modell mit Textur



(b) Modell ohne Textur



(c) Artefakte im schwer erreichbaren Inneren

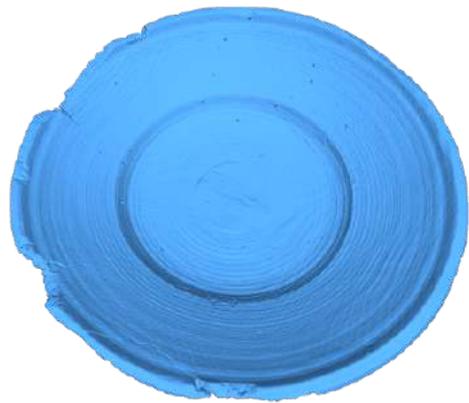


(d) Im Modell geschlossene Öffnungen und Risse

Abbildung 6.21: Computermodell des Vorhängeschlosses



(a) Oberseite mit Textur



(b) Oberseite ohne Textur



(c) Unterseite mit Textur



(d) Unterseite ohne Textur

Abbildung 6.22: Durch Artec Spider gewonnenes Modell des Holztellers

telt werden, um eine durchgängige Oberfläche rekonstruieren zu können. Während diese im oberen Bereich glatt wirkt und das Originalobjekt gut beschreibt, stellt auch hier die teilweise Beschichtung ein Problem dar. An einigen Stellen wird die Außenwand der Flasche als Objektoberfläche angenommen, an anderen Stellen jedoch die Innenwand. Das resultierende Computermodell weist somit starke Unterschiede zum originalen Arzneifläschchen auf und ist nicht brauchbar.

Um dennoch ein abgesehen vom Inneren vollständiges Computermodell zu erstellen, müssten zusätzlich Aufnahmen von der Unterseite des Arzneifläschchens erzeugt werden und diese gegen das partielle Modell der Seitenwände registriert werden. Da das Objekt jedoch kaum Merkmale aufweist, die sich als Korrespondenzpunkte für den Registrierungsprozess eignen, wären hier Probleme zu erwarten.

Das soeben beschriebene Fehlen von Oberflächenmerkmalen kann auch bei der Ausrichtung zweier aufeinanderfolgender Einzelaufnahmen, dem Tracking, zu Problemen führen. Der Digitalisierungsprozess wurde daher unterstützt, indem ein Untergrund mit einigen eindeutigen Texturmerkmalen verwendet wurde, die als Anhaltspunkte dienen. Dieser Untergrund wurde auch hier auf einem manuell zu bedienenden Drehteller aufgebracht, der für die einfache Positionierung des Objekts verwendet wurde.

**Scheibenleuchter** Die rotationssymmetrische Struktur des Leuchters erschwert das Tracking während des Aufnahmevorgangs enorm und macht außerdem die anschließende Registrierung der einzelnen Aufnahmebilder unmöglich. Mit einer Unterlage mit Texturmerkmalen wie zuvor beim Arzneifläschchen könnte man dieses Problem zwar umgehen, die Lösung scheidet jedoch aufgrund der Höhe des Leuchters aus: Beim Scannen der oberen Partien könnte der Scanner diese Unterlage nicht mehr erkennen. Die einzig verbleibende Lösung war die Platzierung von Markern auf dem Objekt. Konkret wurden hier aus Knetradiergummi kleine Pyramiden geformt, welche anschließend an unregelmäßigen Positionen auf der Objektoberfläche aufgebracht wurden. Mithilfe dieser Marker war ein erfolgreiches Tracking und eine saubere Registrierung möglich, allerdings um den Preis, dass diese Marker auch im resultierenden Computermodell enthalten sind und anschließend manuell entfernt werden müssen.

Die rekonstruierte Oberfläche ist jedoch von sehr hoher Qualität. Lediglich im Sockel des Leuchters und entlang der unteren Kante entstanden Löcher im Modell, welche sich durch zusätzliche spezifische Aufnahmen dieser Bereiche voraussichtlich schließen lassen könnten. Das Resultat inklusive der pyramidenförmigen Marker ist in Abbildung 6.23 zu sehen.

Die Textur des Originalobjekts, welche kaum Details aufweist, wird im Computermodell abgesehen von überbelichteten Stellen zuverlässig abgebildet. Durch die stark reflektierende Oberfläche und die gerichtete Beleuchtung bei der Aufnahme wird nämlich, wie schon bei anderen Objekten und Verfahren, von Oberflächen, die sich senkrecht zur Richtung der Beleuchtung befinden, deutlich mehr Licht in Richtung der Kamera reflektiert als von Oberflächen, welche nicht direkt der Lichtquelle zugewandt sind. Im Gegensatz zum Vorhängeschloss tritt dieser Effekt bei diesem Objekt auch bei der Digitalisierung durch den handgeführten Streifenlichtscanner auf, bei dem die Aufnah-

men aus vielen verschiedenen Winkeln erfolgen. Dies wird dadurch verursacht, dass die Oberfläche des Scheibenleuchters deutlich stärker reflektiert als die des Vorhängeschlosses und dass die Vielfalt der Beleuchtungsrichtungen aufgrund der prinzipiell einfachen Form und des Fehlens von Verdeckungen nicht derart ausgeprägt ist wie bei anderen Objekten.

**Bahrtuchschild** Während die glänzende Rückseite des Bahrtuchschildes weder mit dem Laserscanner noch mit dem stationären Streifenlichtscanner erfasst werden konnte, verursachte sie bei der Digitalisierung durch den handgeführten Streifenlichtscanner keine Probleme. Die Geometrie des Objekts wurde sowohl auf der Vorderseite als auch auf der Rückseite zuverlässig und mit einem ausgezeichneten Detailgrad aufgenommen, wie Abbildungen 6.24a und 6.24b aufzeigen. Selbst Details wie die in Abbildung 6.24c dargestellte Aufhängung auf der Rückseite wurden korrekt erfasst und topologisch und geometrisch korrekt wiedergegeben.

Ein Problem ergab sich jedoch bei der Zusammensetzung der beiden Aufnahmen von Vorder- und Rückseite. Der schmale Falz erlaubt nur geringe Überlappungen der beiden Seiten, wodurch keine (halb)automatische Registrierung möglich ist, sondern die beiden Bestandteile manuell gegeneinander ausgerichtet werden müssen. In der zusammen mit dem Scanner ausgelieferten Software ist diese Funktionalität jedoch nur unzureichend implementiert, weshalb ohne die Verwendung von Drittsoftware kein vollständiges Modell ohne Artefakte erstellt werden konnte, sondern nur ein Modell gewonnen werden konnte, das Löcher und Auswölbungen entlang des Falzes aufweist, wie sie in Abbildung 6.24d zu sehen sind.

Es wurde untersucht, ob sich diese Problematik durch das Anbringen künstlicher Marker vermeiden lässt. Hierzu wurden an mehreren Stellen des Randes Kugeln aus Knetradiergummi angebracht, die sowohl von der Vorder- als auch von der Rückseite einsehbar sind und somit den Registrierungsprozess unterstützen könnten. Leider konnte durch diese Maßnahme das Resultat nicht verbessert werden.

Die Textur weist auch bei diesem Objekt neben starken durch die reflektierende Oberfläche bedingten Helligkeitsschwankungen insbesondere auf der Rückseite an einigen Stellen eine gewisse Unschärfe auf. Bessere Resultate wären hier denkbar, wenn nur ein Teil der erfassten Scans zur Texturgenerierung verwendet würde oder der Blitz des Scanners während des Aufnahmevorgangs deaktiviert und stattdessen ein möglichst diffuses Umgebungslicht verwendet würde. Ansonsten sind jedoch keine Artefakte feststellbar.

**Hermes** Auch bei diesem Objekt konnte mithilfe des handgeführten Streifenlichtscanners die Geometrie größtenteils zuverlässig erfasst werden. Probleme traten im Wesentlichen an den gleichen Stellen wie bereits mit dem stationären Streifenlichtscanner auf: hinter der linken Ferse, unter dem linken Oberschenkel, zwischen linkem Arm und Oberkörper sowie unterhalb des linken Fußes, wie in Abbildung 6.25b zu sehen ist.

Die Helligkeit der Texturierung variiert, wie in Abbildung 6.25a dargestellt ist, in einer Art und Weise, wie sie am Originalobjekt nicht feststellbar ist. Außerdem zeigen sich in schlecht einsehbaren Bereichen, vor allem an den Beinen, in der Textur deutliche



(a) Modell mit Textur



(b) Modell ohne Textur

Abbildung 6.23: 3D-Modell des Scheibenleuchters mit aufgebrachtten Markern



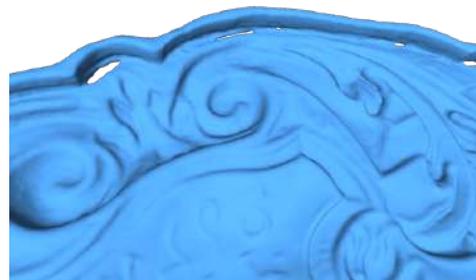
(a) Vorderseite mit Textur



(b) Rückseite ohne Textur



(c) Detailreiche Geometrie auf der Rückseite

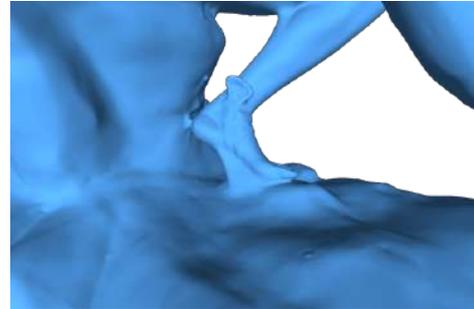


(d) Artefakte im Falz zwischen Vorder- und Rückseite

Abbildung 6.24: Computermodell des Bahrtuchschilds



(a) Gesamtes Modell mit leichten Verfärbungen



(b) Artefakte in schwer einsehbaren Bereichen

Abbildung 6.25: Mittels Artec Spider erfasstes Modell des Hermes

Artefakte. Eventuell lässt sich dieses Problem beheben, wenn bei einer Wiederholung des Digitalisierungsvorgangs ein besonderes Augenmerk auf diese Bereiche gelegt wird.

**Burgfräulein** Das Burgfräulein aus glasiertem Porzellan stellt aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit und der komplexen Topologie mit vielen Verdeckungen für optische Digitalisierungsverfahren eine Herausforderung dar. Trotzdem konnte mithilfe des handgeführten Streifenlichtscanners ein gutes Computermodell erzeugt werden. In vielen Bereichen ist dieses Modell sowohl die Geometrie als auch die Textur betreffend von außerordentlich hoher Qualität, wie auch Abbildung 6.26 aufzeigt. Die Topologie wird auch an schwer einsehbaren Stellen, wie beispielsweise zwischen dem Sitz und den Hüften, akkurat wiedergegeben. Lediglich unterhalb des Sitzes und unterhalb der linken Hand entstanden Artefakte, deren Ursprung nicht ermittelt werden konnte. Eventuell könnten sie durch mehr Sorgfalt beim Digitalisieren oder das Hinzufügen zusätzlicher Messdaten vermieden werden.

Beachtlich ist außerdem die Texturierung des Computermodells: Während sie an vielen Stellen wie bereits bei den zuvor beschriebenen Objekten nicht optimal scharf ist, sind hingegen kaum Variationen in der Helligkeit zu erkennen, wie sie bei einem reflektierenden Objekt bei anderen Verfahren auftraten. Wie schon beim Vorhängeschloss lässt sich dies dadurch begründen, dass Beleuchtung und Erfassung im Gegensatz zu anderen Digitalisierungsmethoden aus sehr vielen verschiedenen Richtungen erfolgt.



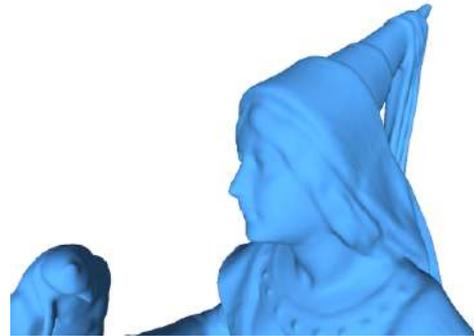
(a) Gesamtes Modell mit Textur



(b) Gesamtes Modell ohne Textur



(c) Detailaufnahme mit Textur



(d) Detailaufnahme ohne Textur

Abbildung 6.26: 3D-Modell des Burgfräuleins

**Medaille** Auch die Medaille konnte mit dem handgeführten Streifenlichtscanner erfolgreich erfasst werden, wobei das Resultat in Abbildung 6.27 dargestellt ist. Für den Digitalisierungsvorgang wurde das Objekt wie bei der Erfassung durch den stationären Streifenlichtscanner durch Knetradiergummi vertikal fixiert und Aufnahmen bei vier verschiedenen Drehwinkeln erstellt. Die Geometrie des Originalobjekts wird korrekt wiedergegeben und zeigt keine Artefakte.

Jedoch ist auch hier die Textur etwas verschommen, insbesondere im Bereich der Aufschrift. Außerdem sind vor allem auf Seite B Aufhellungen an den Grenzen der aus den einzelnen Aufnahmen entstandenen partiellen Modelle zu erkennen, die vermutlich durch Reflexionen am Knetradiergummi erzeugt werden. Ein dunkleres absorbierendes Fixiermittel könnte hier Abhilfe schaffen. Wie beim stationären Streifenlichtscanner variiert die Helligkeit an der Kante im resultierenden Modell aufgrund der geringen Diffusität der Reflexionen sehr stark. Für Anwendungen, bei welchen eine originalgetreue oder ästhetische Texturierung erforderlich ist, eignet sich das Resultat daher nicht.

**Bronzekopf** Zusätzlich zu den bisher betrachteten Objekten wurde auch eine patinierte Bronzeskulptur eines menschlichen Kopfes digitalisiert. Die Geometrie der Skulptur wurde dabei ausgezeichnet erfasst, auch leicht verdeckte Bereiche wie hinter den Ohren oder die Nasenlöcher zeigen keine Artefakte. Ebenso werden die Werkzeugspuren, die am Original erkennbar sind, im Computermodell akkurat wiedergegeben. Das Resultat ist in Abbildung 6.28 dargestellt.

Da die Oberfläche aufgrund der Patina nur verhältnismäßig wenig reflektiert, konnte auch die Texturierung mit einer hohen Qualität erfasst werden. Es sind keine Unsauberheiten zu erkennen. Die Problematik, dass die Textur oftmals unscharf erscheint, tritt hier ebenfalls nicht so deutlich zutage, weil die Originalskulptur kaum harte Kanten in der Oberflächenfärbung aufweist.

**Weitere Experimente** Mit dem handgeführten 3D-Scanner Artec Spider wurden weitere Digitalisierungsexperimente durchgeführt, von welchen an dieser Stelle nur auf die wichtigsten dabei gewonnenen Erkenntnisse eingegangen wird.

Beispielsweise wurde ein Teil einer peruanischen Mumie digitalisiert. Die Mumie war jedoch so groß, dass die Digitalisierung des gesamten Objekts sehr aufwendig gewesen wäre und die softwareseitige Nachbearbeitung kaum möglich gewesen wäre. Außerdem waren Stellen, an welchen die eigentlich tiefer liegende Baumwolle nach außen an die Oberfläche trat, mithilfe dieses Scanners nicht zu erfassen. Dieses sehr filigrane, unruhige und matte Material reflektierte zu wenig der einfallenden Streifenprojektion in einer Art und Weise, die eine Rekonstruktion der Oberfläche erlauben würde.

Ein ähnliches Problem trat bei der Digitalisierung von menschlichen Gesichtern im Bereich von Haaren und Bart auf, da auch diese keine glatte Oberfläche darstellen. Bei der Erfassung von Gesichtern sorgten außerdem Brillen für das Problem, dass der gesamte Bereich der Augen nicht korrekt erfasst werden konnte und eine große Menge an Artefakten entstand.

Weitere Experimente wurden mit Skulpturen aus unterschiedlichen Materialien und



(a) Seite A mit Textur



(b) Seite A ohne Textur



(c) Seite B mit Textur



(d) Seite B ohne Textur

Abbildung 6.27: Mittels Artec Spider erzeugtes Modell der Medaille



(a) Bronzekopf mit Textur



(b) Bronzekopf ohne Textur

Abbildung 6.28: 3D-Modell des Bronzekopfs

dreidimensionalen Bildern durchgeführt. Von den Skulpturen konnten ausnahmslos exzellente Modelle erstellt werden, auch wenn die Erfassung an einigen dünnen glänzenden Stellen sehr sorgfältig durchgeführt werden musste. Bei dreidimensionalen Bildern traten Probleme bei verdeckten Stellen und bei topologisch sehr filigranen und komplexen Bereichen (wie beispielsweise einem Drahtgeflecht) auf. Außerdem zeigte sich, dass sich die erfassten Daten an Stellen, die kaum geometrische und textuelle Merkmale aufweisen, nur schwer gegeneinander registrieren lassen. Nichtsdestotrotz konnten von diesen Objekten sehr gute 3D-Modelle erstellt werden.

## 6.4 Photogrammetrie

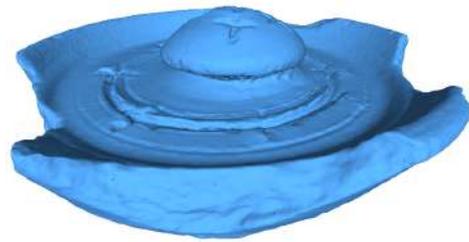
**Tondeckel** Auch eine photogrammetrische Erfassung des Tondeckels wurde untersucht. Dazu wurde das Objekt auf einem Drehteller platziert und durch eine auf einem Stativ platzierte digitale Spiegelreflexkamera fotografiert. Es wurde eine Bildreihe bestehend aus 36 Bildern von der Seite des Objekts angefertigt und vier weitere Bildreihen mit jeweils zwölf Bildern aus verschiedenen Winkeln von oben. Anschließend wurden drei weitere Bildreihen erneut bestehend aus jeweils 12 Bildern von der Unterseite des Tondeckels erstellt. Um einerseits von der Seite gute Aufnahmen zu erhalten und andererseits die Trennung von Objekt zu Hilfsmitteln zu erleichtern, wurde der Tondeckel auf einem Kartonsockel erhöht positioniert. Da es sich bei den erfassten Bildern ausschließlich Nahaufnahmen handelt, die kaum Hintergrund zeigen, war eine Maskierung des Objekts nicht notwendig. Die Bilder von Ober- und Unterseite wurden dann zunächst separat verarbeitet und während des Rekonstruktionsvorgangs gegeneinander registriert und fusioniert, was ohne größere Probleme möglich war.

Die Geometrie des Objekts konnte durch die Software erfolgreich und in einer guten Qualität rekonstruiert werden, wie in Abbildung 6.29 zu sehen ist. Einzig in den Einritzungen und unter dem Griff sind kleine Artefakte und Unsauberheiten zu erkennen. Auch die Textur wurde gut erfasst. Es sind keine Artefakte zu erkennen, sie erreicht an vielen Stellen sogar Fotoqualität. An anderen Stellen wirkt sie jedoch etwas unscharf und verwaschen. Während in manchen Bereichen bereits die Oberfläche des Originalobjekts diese Eigenschaft aufweist, wird sie ansonsten durch eine zu geringe Tiefenschärfe verursacht, was vorwiegend bei Makroaufnahmen der Fall ist. Dieses Problem könnte durch einen größeren Abstand zum Objekt oder die Verwendung eines Objektivs mit einer niedrigeren Brennweite verringert werden. Die genutzte Fläche des Bildsensors wäre dann jedoch geringer, ebenso müssten die einzelnen Bilder voraussichtlich maskiert werden, da der Hintergrund zu deutlich in den Aufnahmen zu erkennen wäre. Wahrscheinlich könnte auch durch eine noch höhere Anzahl an Bildern eine höhere Texturqualität erreicht werden, wenn dadurch alle Bereiche auf mindestens einem Bild (aber selbstverständlich möglichst vielen Bildern) scharf abgebildet werden.

**Kerzenhalter** Ähnlich wie bei der Erfassung des Tondeckels wurde auch beim Kerzenhalter zunächst eine separate Digitalisierung von Ober- und Unterseite durchgeführt. Für die Oberseite wurde der Kerzenhalter auch hier auf einem Podest platziert, worauf-



(a) Modell mit Textur



(b) Modell ohne Textur

Abbildung 6.29: Über Photogrammetrie erstelltes Computermodell des Tondeckels

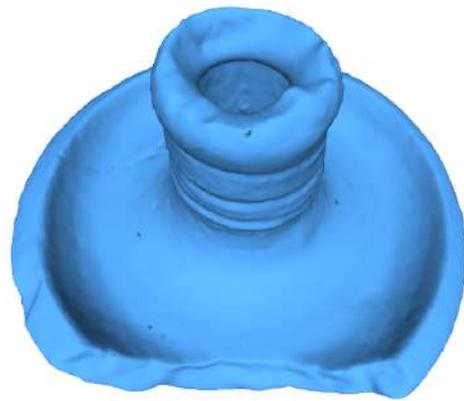
hin 36 Aufnahmen von der Seite und weiters je zwölf Aufnahmen aus drei verschiedenen Winkeln angefertigt wurden. Da sich diese Aufnahmen primär auf den Teller konzentrierten, waren weitere Fotos vom Halter in der Mitte notwendig. Hier wurden aus fünf verschiedenen Winkeln je zwölf Bilder erstellt. Um das Innere des Halters rekonstruieren zu können, wurde noch eine aus zwölf Bildern bestehende Reihe angefertigt, bei welcher sich der Blick fast senkrecht von oben auf das Objekt richtet. Für die einfacher gestaltete Unterseite waren hingegen drei Aufnahmereihen aus verschiedenen Winkeln mit jeweils zwölf Fotos ausreichend.

Die beiden partiellen Modelle konnten erfolgreich rekonstruiert werden. Ein Problem ergab sich jedoch im Gegensatz zur Digitalisierung des Tondeckels beim Zusammenfügen der beiden partiellen Modelle. Da die Überschneidung zwischen diesen Teilen sehr gering ausfällt, war eine saubere Registrierung der beiden Modelle gegeneinander nicht möglich, was sich in den Artefakten an der Verbindungslinie im in den Abbildungen 6.30a und 6.30b dargestellten resultierenden Computermodell äußert. Durch gut gewählte Aufnahmen, wie beispielsweise Bilder des gesamten Kerzenhalters von der Seite aus einer gewissen Entfernung, die es erlaubt, sowohl Rand als auch den eigentlichen Halter scharf darzustellen, könnte sich eventuell auch dieses Problem beheben lassen. Unberührt von diesen Problemen bleibt jedoch hervorzuheben, dass die Photogrammetrie das einzige der betrachteten optischen Verfahren darstellt, das eine Erfassung des Inneren des Halters erlaubt. Die Geometrie des Computermodells weist insbesondere im oberen Bereich zwar deutliche Artefakte auf, diese konnten jedoch bei einer Erstellung einer zusätzlichen Aufnahmereihe in einem zweiten Digitalisierungsversuch eliminiert werden, da die eigentliche Schwierigkeit die Erfassung der tiefer liegenden Regionen darstellt. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.30c dargestellt ist. Bei diesem zweiten Versuch wurde zusätzlich die Anzahl der Einzelaufnahmen und die Genauigkeit der Verarbeitung erhöht, was sich in einer detaillierteren Geometrie des resultierenden Modells niederschlägt und in Abbildung 6.30d zu sehen ist.

Für die Textur gelten im Wesentlichen die gleichen Erkenntnisse wie bei der Erfassung des Tondeckels. Während sie in manchen Bereichen Fotoqualität erreicht, ist sie auch hier in vielen Bereichen unscharf. Dieser Effekt ist beim Kerzenhalter sogar noch deutlicher ausgeprägt als beim Tondeckel. Beim zweiten Versuch sind die Bilder durch eine zu lange Belichtungszeit überbelichtet, was sich auch in einer unrealistischen Helligkeit der resultierenden Texturierung niederschlägt. Im Inneren des Halters zeigen sich



(a) Erstes Modell mit Textur und Artefakten im oberen Bereich



(b) Erstes Modell ohne Textur und mit Artefakten im oberen Bereich



(c) Zweiter Versuch mit überbelichteten Fotos aber guter Erfassung des oberen Bereichs



(d) Detaillierte Erfassung der Unterseite im zweiten Versuch

Abbildung 6.30: Bilder der zwei Versuche der photogrammetrischen Erfassung des Kerzenhalters



(a) Modell mit Textur

(b) Modell ohne Textur

Abbildung 6.31: Über Photogrammetrie erstelltes Computermodell der Handgranate

gewisse Artefakte, insbesondere erscheint der Boden viel zu hell, was in Anbetracht der schlechten Einsehbarkeit dieses Bereichs jedoch vertretbar erscheint.

Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass sich der Kerzenleuchter trotz der oben beschriebenen Probleme für eine photogrammetrische Erfassung eignet, da diese Probleme nicht konzeptueller Natur sind, sondern sich aller Voraussicht nach vermeiden lassen. Die Photogrammetrie bietet aufgrund der erfolgreichen Rekonstruktion der Innenwand sogar einen Vorteil gegenüber anderen optischen Verfahren. Selbst der sehr flexible handgeführte Streifenlichtscanner konnte diesen Bereich nicht erfassen, da dessen Streifenlichtprojektor und die Kameras einen zu großen Abstand zueinander haben, als dass gleichzeitig ununterbrochene Sichtlinien zur Innenwand des Kerzenhalters gebildet werden könnten.

**Handgranate** Auch für die photogrammetrische Erfassung der Handgranate wurden zunächst zwei partielle Modelle, je eines von der Ober- und der Unterseite, erstellt. Hierfür wurden jeweils vier Aufnahmereihen, bestehend aus je zwölf Bildern, durchgeführt. Das Objekt wurde dabei auf einem Drehteller platziert, während hingegen die Kamera statisch auf einem Stativ positioniert wurde. Eine Maskierung der Einzelaufnahmen war auch in diesem Fall nicht notwendig. Das Registrieren und Zusammenfügen war dank der großen Überlappung der partiellen Modelle und gewisser textueller Merkmale trotz des Fehlens geometrischer Orientierungspunkte problemlos möglich.

Die Qualität des resultierenden Modells ist sowohl bezüglich Geometrie als auch Textur sehr hoch, wie in Abbildung 6.31 zu erkennen ist. Sämtliche geometrischen Merkmale werden dort zuverlässig abgebildet. Auch die bei zuvor betrachteten Objekten aufgetretenen Probleme bezüglich der Unschärfe der Textur traten hier dank der näherungsweisen Kugelform nicht auf. Das Innere der Handgranate kann photogrammetrisch selbstverständlich nicht digitalisiert werden.

**Holzteller** Zur Digitalisierung des Holztellers wurde im Gegensatz zu den vorherigen Objekten aus experimentellen Gründen kein Drehteller verwendet, sondern das Objekt statisch auf einem Podest platziert, während die Kamera schrittweise um das Objekt bewegt wurde. Dies hat zur Folge, dass keine Softbox verwendet werden konnte. Ähnlich wie bei den zuvor betrachteten Objekten wurden anschließend von Ober- und Unterseite aus verschiedenen Winkeln Fotoreihen erstellt. Wichtig ist insbesondere eine Fotoreihe, die sowohl die Außenseite des Holztellers als auch die Innenfläche der gegenüberliegenden Seite abbildet und somit dafür sorgt, dass das partielle Modell der Oberseite auch Informationen über die Außenwand enthält, welche für die Registrierung gegen die untere Modellhälfte verwendet werden können.

Das Ergebnis des Digitalisierungsvorgangs ist in Abbildung 6.32 dargestellt. Die Geometrie des Holztellers wird gut erfasst, wenn auch nicht in dem Detailgrad wie beispielsweise bei der Digitalisierung durch den handgeführten Streifenlichtscanner, was sich insbesondere bei den Löchern im Holz und den Rissen im oberen Bereich des Tellers zeigt, wobei letztere im finalen Modell anhand der Geometrie überhaupt nicht mehr erkennbar sind. Dies lässt sich durch eine größere Anzahl an Bildern und eine feinere Einstellung für den Rekonstruktionsalgorithmus voraussichtlich verbessern. Artefakte zeigen sich jedoch an der Kante des Tellers, an welcher die beiden Modellteile aneinanderstoßen. Dies liegt an einer trotz der seitlichen Fotoreihe unsauberer Registrierung.

Die Textur weist hingegen in den meisten Bereichen eine sehr hohe Qualität auf. Bis auf wenige unscharfe Bereiche wird die Oberfläche des Holzes sehr akkurat wiedergegeben. Artefakte bilden sich jedoch auch in der Textur am oberen Rand des Tellers. Zum Einen wird dort deutlich, dass die Färbung der Innen- und Außenseite nicht einheitlich ist: Die Innenseite erscheint deutlich heller als die Außenwand. Durch eine vorteilhaftere, gleichmäßigere Beleuchtung und die Verwendung einer Softbox könnte dieses Problem umgangen werden. So sind bereits in den Originalbildern der seitlichen Aufnahmereihe hellere und dunklere Stellen zu erkennen, die von einer zu ungleichmäßigen und zu wenig diffusen Beleuchtung herrühren.

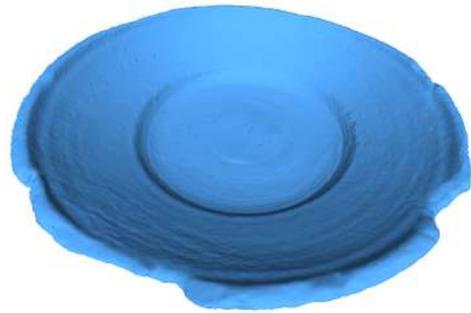
Obwohl das entstandene Modell noch brauchbar ist, lassen diese Erkenntnisse den Schluss zu, dass mit einer Erfassung unter Verwendung eines Drehtellers bessere Ergebnisse erzielt werden könnten, da dann eine Softbox eingesetzt werden könnte, die ein diffuseres Licht ermöglicht und so Reflexionen auf dem Objekt weitestgehend vermeidet.

**Arzneifläschchen** Während die Geometrie des Arzneifläschchens eine sehr einfache Struktur aufweist, stellt die teilweise transparente Oberfläche eine Herausforderung für optische Messverfahren dar. Durch die Platzierung des Fläschchens auf einer Unterlage mit eindeutigen Markierungen war eine Ausrichtung der einzelnen Bilder gegeneinander dennoch erfolgreich, da die Merkmale auf der Unterlage genügend Information bieten, sodass keine korrespondierenden Punkte auf dem Objekt selbst erkannt werden müssen.

Ungeachtet der erfolgreichen Registrierung der Einzelbilder weist das resultierende Modell, welches in Abbildung 6.33 zu sehen ist, eine sehr unruhige Oberfläche auf, da je nach Beschichtung der Oberfläche die Innen- oder die Außenwand für das ComputermodeLL verwendet wurde, wie es schon bei anderen Digitalisierungsverfahren der Fall



(a) Oberseite mit Textur



(b) Oberseite ohne Textur



(c) Unterseite mit Textur



(d) Unterseite ohne Textur

Abbildung 6.32: Digitalisierung des Holztellers mittels Photogrammetrie

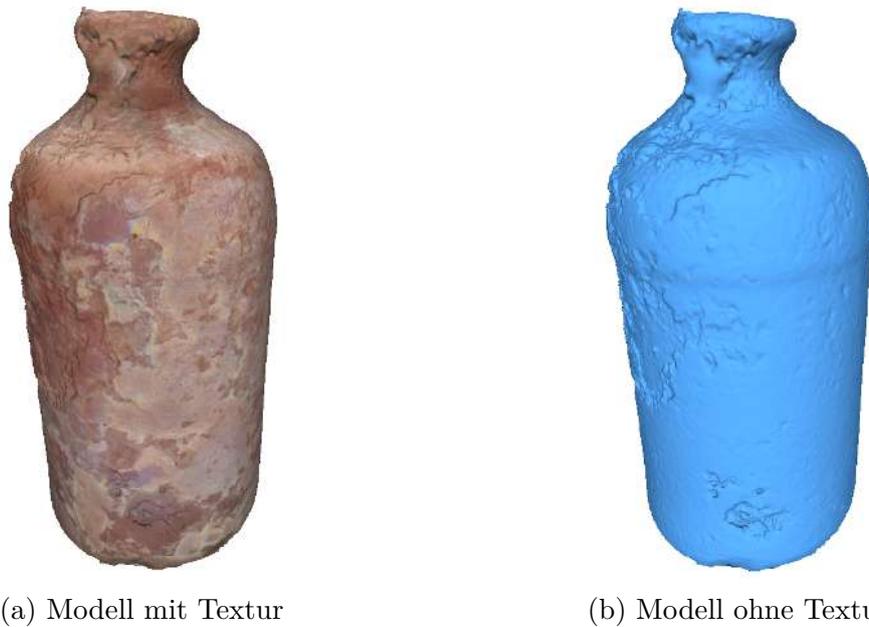


Abbildung 6.33: Über Photogrammetrie erstelltes Computermodell des Arzneifläschchens

war.

Das entstandene 3D-Modell ist somit nicht brauchbar. Im Gegensatz beispielsweise zum Laserscanner ist durch die markierte Unterlage aber zumindest die grobe Form des Objekts rekonstruierbar.

**Scheibenleuchter** Der näherungsweise rotationssymmetrische Scheibenleuchter stellt für die photogrammetrische Erfassung eine Herausforderung dar. Bei einem ersten Versuch wurde der Scheibenleuchter auf einem Drehteller platziert und von einer statischen Kamera aus verschiedenen Höhen und unter verschiedenen Winkeln fotografiert. Pro Höhe und Winkel wurden 36 Aufnahmen erstellt, zwischen welchen der Leuchter jeweils um  $10^\circ$  gedreht wurde. Durch die rotationssymmetrische Struktur des Objekts konnten die einzelnen Aufnahmen jedoch nicht aneinander ausgerichtet werden. Dieser Digitalisierungsversuch schlug somit fehl.

In einem zweiten Versuch wurden auf dem Objekt sogenannte *Coded Targets* aufgebracht. Hierbei handelt es sich um eindeutige Markierungen, welche in den Bildern erkannt werden können und anschließend aufgrund ihrer Eindeutigkeit für Korrespondenzen zwischen Bildern verwendet werden können. Bei den in diesem Fall verwendeten *Coded Targets*, wie sie in Abbildung 6.34 zu sehen sind, wird die Eindeutigkeit durch eine unterschiedliche Abfolge schwarzer und weißer Segmente im Rand der Markierung erreicht. Die verwendete Rekonstruktions-Software bietet eine Funktion zum automatischen Erkennen dieser *Coded Targets* an. Leider wurde in diesem Fall nur ein kleiner Anteil der verwendeten Marker durch den Algorithmus automatisch erkannt. Durch eine manuelle Kennzeichnung der Marker konnte dieses Problem jedoch umgangen werden. Trotz der ca. 20 auf dem Objekt verteilten *Coded Targets* konnten die einzelnen Aufnah-

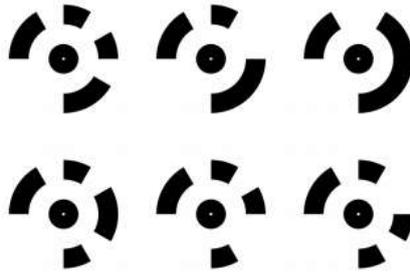


Abbildung 6.34: Sechs unterschiedliche für die Erfassung des Scheibenleuchters mittels Photogrammetrie verwendete *Coded Targets*

men nicht aneinander ausgerichtet werden. Dies kann dadurch verursacht werden, dass die einzelnen Markierungen nicht wie im Handbuch beschrieben plan auf einer ebenen Fläche auflagen, sondern auf der teilweisen geschwungenen Objektoberfläche angebracht werden mussten. Eine Platzierung auf der Grundfläche rund um das Objekt war aufgrund der Höhe des Scheibenleuchters nicht möglich. Die Erfassung unter Verwendung von *Coded Targets* war daher ebenfalls nicht erfolgreich. Auch wenn die Rekonstruktion aus den Aufnahmen dieses Versuchs gelungen wäre, würde das resultierende Modell auch die auf dem Objekt angebrachten Markierungen beinhalten. Diese müssten dann aufwendig manuell entfernt und die verdeckte Objektoberfläche rekonstruiert werden. Eine praktikable Lösung würde dieses Verfahren also ohnehin nicht darstellen.

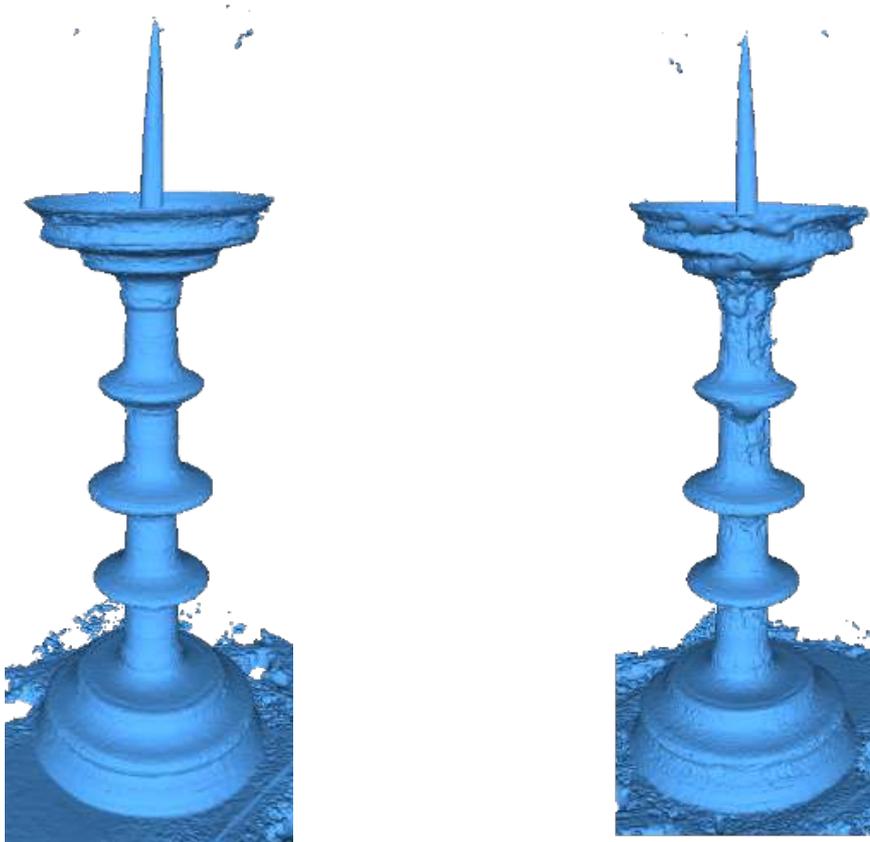
In einem dritten Versuch wurde der Scheibenleuchter anstatt auf dem Drehteller direkt auf der Grundfläche platziert und die Kamera um das nun statische Objekt bewegt. Merkmale im Bildhintergrund konnten nun als Orientierungspunkte bei der Ausrichtung der Bilder dienen. Jedoch war es auch auf diese Weise nicht möglich, die Ausrichtung eines jeden Bildes zu bestimmen. Wurden jedoch nur die erfolgreich ausgerichteten Aufnahmen selektiert, so war die Konstruktion eines Computermodells möglich, welches in Abbildung 6.35 dargestellt ist. Dieses weist jedoch aufgrund der zu ungenauen Ausrichtung der Bilder eine sehr unruhige Oberfläche mit extrem vielen Artefakten auf und ist daher unbrauchbar.

Insgesamt lässt sich also festhalten, dass eine photogrammetrische Digitalisierung des Leuchters nicht erfolgreich war.

**Bahrtuchschild** Für die Erfassung des Bahrtuchschildes durch Photogrammetrie wurde das Objekt auf einem Drehteller platziert und aus drei Winkeln von der Vorderseite und vier Winkeln von der Rückseite jeweils 36 Aufnahmen im Abstand von jeweils  $10^\circ$  erstellt.

Die in Abbildung 6.36 gezeigte Rekonstruktion der Vorderseite lieferte sowohl bezüglich Geometrie als auch bezüglich Textur ein sehr gutes Ergebnis. Da im Gegensatz zu den bisher betrachteten Digitalisierungsverfahren die Beleuchtung nicht vom Gerät ausgeht, sondern durch verhältnismäßig diffuses Umgebungslicht erfolgt, treten Reflexionen in der Objektoberfläche weniger stark zur Geltung, was sich in einer natürlichen Färbung der Textur äußert.

Auch das Modell der Rückseite ist von einer hohen Qualität. Der relativ filigrane



(a) Gut erfasste Seite mit dennoch unruhiger Oberfläche (b) Seite mit deutlich ausgeprägten Artefakten

Abbildung 6.35: Photogrammetrisch gewonnenes Modell des Scheibenleuchters



(a) Vorderseite mit Textur



(b) Vorderseite ohne Textur



(c) Rückseite mit Textur



(d) Rückseite ohne Textur

Abbildung 6.36: Ergebnis der photogrammetrischen Erfassung des Bahrtuchschilds: Die Löcher entstehen durch ungenaue Passung von Vorder- und Rückseite.

Aufhänger des Schildes wird jedoch in der Geometrie des Modells nicht abgebildet.

Bei beiden partiellen Modellen befinden sich um den Rand der eigentlichen Objekt-oberfläche weitere Datenpunkte, die durch den homogenen Hintergrund entstehen. Diese müssen manuell entfernt werden, was einen enormen Mehraufwand verursacht.

Ähnlich wie bei der Erfassung durch den handgeführten Streifenlichtscanner tritt hier das Problem bei der Kombination der partiellen Modelle von Vorder- und Rückseite auf. Aufgrund der geringen Überschneidung der beiden Objektteile ist eine exakte Registrierung nicht möglich, wodurch trotz der beiden exzellenten partiellen Modelle kein brauchbares Gesamtmodell erstellt werden konnte. Die durch die ungenaue Registrierung entstehenden Löcher sind ebenfalls in Abbildung 6.36 zu sehen.

**Passauer Töpel** Neben den bisher beschriebenen kleineren Objekten wurde auch der Passauer Töpel, eine im Freien angebrachte circa 1 m hohe Steinskulptur in der Nähe des Passauer Stephansdoms, als Vertreter der größeren und insbesondere immobilien Objekte photogrammetrisch erfasst. Dazu wurde zunächst eine auf einem Stativ montierte digitale Spiegelreflexkamera in mehreren Höhen und Abständen um das Objekt

bewegt, wobei in mehr oder weniger regelmäßigen Abständen Aufnahmen erstellt wurden. Anschließend wurden noch von einigen wichtigen Stellen oder anderweitig schwer erreichbaren Bereichen Bilder angefertigt.

Durch die hohe Intensität des Sonnenlichts, das eine künstliche Beleuchtung überflüssig machte, konnten selbst bei der Tiefenschärfe förderlichen hohen Blendenzahlen niedrige Belichtungszeiten verwendet werden. Die Einzelbilder schwer erreichbarer Stellen konnten somit ohne Stativ erstellt werden, was die Flexibilität zusätzlich erhöhte. Für photogrammetrische Aufnahmen im Freien empfiehlt sich ein heller, aber bedeckter Tag, da die Beleuchtung dann zwar möglichst hell ist, gleichzeitig aber auch diffus genug, um eine gleichmäßige Ausleuchtung des Objekts zu ermöglichen und negative Einflüsse durch Schattenbildung zu verringern.

Stein eignet sich hervorragend für eine Digitalisierung mittels Photogrammetrie, da er sehr diffus reflektiert und die Oberfläche sowohl in der Form als auch in der Färbung etwas unruhig ist, sodass Merkmale zur Ausrichtung der Bilder vorhanden sind. Aufgrund der direkten Sonneneinstrahlung am Tag der Aufnahme zeigt die Textur des entstandenen Modells allerdings deutliche Schatten, wie in Abbildung 6.37 zu erkennen ist. Durch die Aufhängung und Überdachung des Tölpels konnten außerdem die Rück- und Oberseite des Objekts nicht erfasst werden. Die direkte Erzeugung eines geschlossenen Modells war daher nicht möglich. In den vorderen und seitlichen Bereichen ist das resultierende Computermodell abgesehen von der Schattenbildung und einigen wenigen etwas unscharf texturierten Bereichen jedoch von exzellenter Qualität.

## 6.5 Computertomographie

**Tondeckel** Die Dichte des Tons ist einerseits niedrig genug, um Artefakte in den gemessenen Daten zu vermeiden, und andererseits hoch genug, um die Separierung des eigentlichen Objekts von Fixier-Hilfsmitteln und Luft zu ermöglichen. Aus diesem Grund ist die Qualität des entstandenen Volumenmodells gut. Auch feine Oberflächendetails werden im aus den Volumendaten extrahierten Oberflächenmodell zuverlässig abgebildet. Allerdings weist das Material leichte Unterschiede in der Materialdichte auf, die beispielsweise durch Lufteinschlüsse verursacht werden könnten. Diese werden durch Computertomographie jedoch ebenfalls erfasst, wodurch das Modell an einigen Stellen Artefakte in Form von Löchern in der Oberfläche aufweist, die auch in Abbildung 6.38 zu sehen sind. Hier ist es schwer, zwischen tatsächlich vorhandenen Oberflächendetails und Artefakten zu unterscheiden.

Allerdings ist es mithilfe dieser Digitalisierungstechnik möglich, andersartige Materialeinschlüsse im Inneren des Tondeckels zu erkennen: Ein kleiner Bereich höherer Dichte könnte auf einen metallenen Einschluss hinweisen.

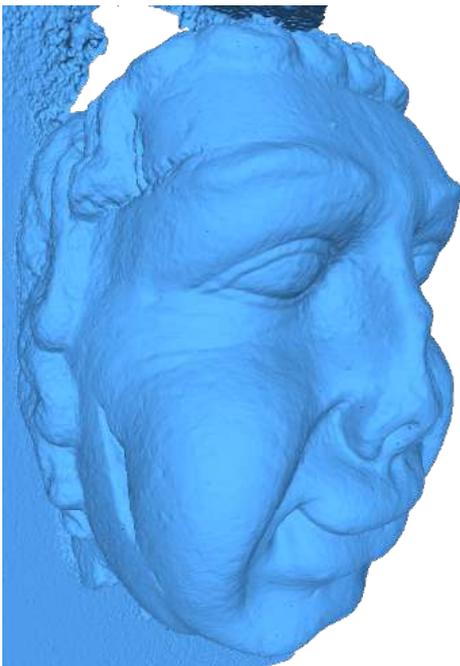
**Kerzenhalter** Auch die Dichte des Kerzenhalters eignet sich gut für die Erfassung mittels Computertomographie. Das erfasste Computermodell weist eine hervorragende Qualität auf. Auch die Innenwand des Kerzenhalters kann, wie in Abbildung 6.39a dargestellt ist, mit dieser Methode problemlos erfasst werden, da optische Verdeckungen



(a) Frontalansicht



(b) Seitliche Ansicht mit Textur



(c) Seitliche Ansicht ohne Textur



(d) Detailaufnahme mit sehr hoher Qualität der Textur

Abbildung 6.37: Digitalisierung des Passauer Tölpels mittels Photogrammetrie

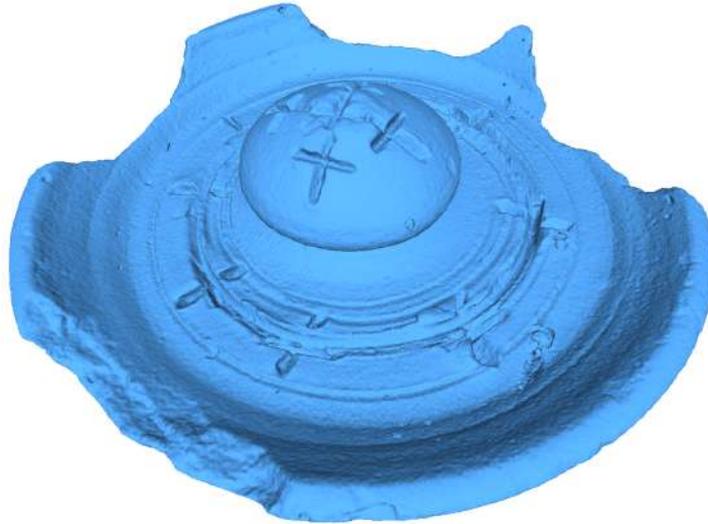


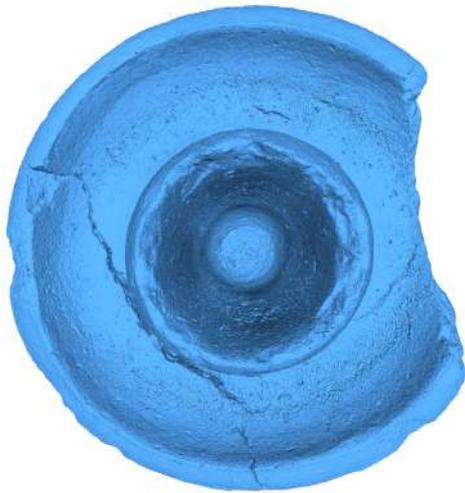
Abbildung 6.38: Aus den Volumendaten extrahiertes Oberflächenmodell des Tondeckels

hier kein Hindernis darstellen.

Bei der Untersuchung des Volumenmodells wird deutlich, dass sich der Riss im Bereich des Tellers durch das komplette Objekt zieht und die beiden Teile des Kerzenhalters nur noch an einer verhältnismäßig kleinen Fläche zusammengehalten werden. Selbst im in Abbildung 6.39b gezeigten Oberflächenmodell wird ersichtlich, dass der Riss von oben nach unten durch das gesamte Objekt schneidet, was mit optischen Verfahren nicht möglich gewesen wäre, da solch feine Risse bei der Erstellung des Modells geschlossen worden wären. Aus derartigen Erkenntnissen lässt sich der Zustand des Objekts besser bewerten, weshalb diese aus konservatorischer Sicht relevant sein können.

**Handgranate** Wie die beiden zuvor betrachteten Objekte weist auch die Handgranate ein Material auf, welches eine gute Digitalisierung mittels Computertomographie ermöglicht. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.40a zu sehen. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen optischen Verfahren kann mit dieser Methode auch die Innenwand der Handgranate erfasst werden, wie in Abbildung 6.40b dargestellt ist. Nur mit dieser Methode war also eine vollständige Erfassung der Oberfläche des gesamten Objekts möglich.

**Vorhängeschloss** Im Gegensatz zu Ton ist absorbiert das Metall des Vorhängeschlosses deutlich mehr Röntgenstrahlung. Während dies für die Separierung von Luft und Objekt förderlich ist, entsteht durch die hohe Dichte eine große Menge an Artefakten. Ein Absorptions-Schwellwert, bei welchem einerseits die meisten Artefakte entfernt werden, andererseits aber auch alle zum Objekt gehörigen Voxel als Materie klassifiziert werden, ist bei diesem Objekt nicht möglich, wie in den Abbildungen 6.41a und 6.41b zu sehen ist. Für die exakte Erfassung eines derartigen metallenen Objekts wäre ein leistungsfähigerer Tomograph, bei dem die Elektronen mit einer höheren Geschwindigkeit auf das Objekt treffen, notwendig. Ein Dreiecksmodell mit einer Oberfläche, welche dem realen



(a) Ansicht von oben

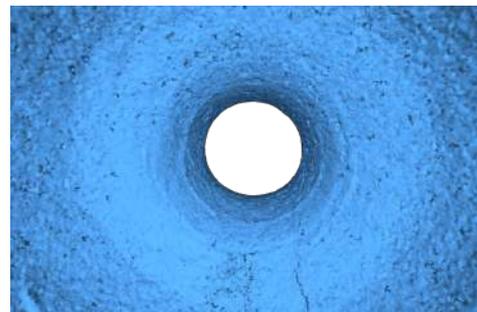


(b) Ansicht von unten

Abbildung 6.39: Oberflächenmodell des Kerzenhalters, das aus dem via Computertomographie gewonnenen Volumenmodell erstellt wurde

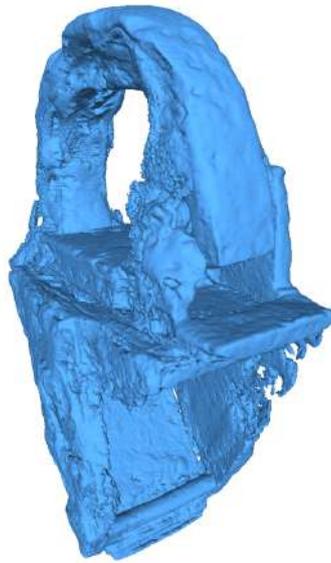


(a) Ansicht von außen



(b) Ansicht von innen

Abbildung 6.40: Aus Volumendaten gewonnenes Oberflächenmodell der Handgranate



(a) Ansicht von außen



(b) Innenbereich

Abbildung 6.41: Das Oberflächenmodell des Vorhängeschlosses weist gleichzeitig sowohl Löcher in der Oberfläche als auch Artefakte auf

Objekt entspricht, konnte aus den entstandenen Volumendaten daher nicht bestimmt werden.

**Holzteller** Die generierten Volumendaten weisen eine sehr hohe Qualität auf. Selbst kleine Löcher und Fasern im Holz werden akkurat wiedergegeben, wie in den Abbildungen 6.42a und 6.42b zu sehen ist. Das Holz, aus dem der Teller besteht, ist jedoch sehr leicht und hat sogar eine geringere Dichte als die Fixier-Hilfsmittel aus Kunststoff. Durch einen Schwellwert können Objekt und Halterung also nicht separiert werden. Hierzu ist ein manuelles Entfernen der Fixierungen notwendig. An den Berührungspunkten beider Materialien ist dies jedoch sehr aufwendig bis unmöglich. Deshalb empfiehlt es sich, zwischen Objekthalterung und Objekt selbst eine dünne Schicht eines sehr leichten Materials einzufügen, die anschließend durch eine entsprechende Wahl des Schwellwerts wieder entfernt werden kann. Der dadurch entstehende Abstand zwischen Objekt und Halterung vereinfacht die Trennung der beiden Bestandteile enorm. Diese Trennung von Objekt und Halterung ist im Wesentlichen nur ein Beispiel für eine Segmentierungsaufgabe. Solche Aufgaben umfassen die Trennung unterschiedlicher Regionen oder Materialien und treten nicht nur bei der Computertomographie, sondern auch bei vielen anderen Daten auf. Sie stellen in vielen Fällen eine enorme Herausforderung dar.

**Arzneifläschchen** Während das gläserne Arzneifläschchen die bisher beschriebenen optischen Digitalisierungsverfahren an deren Grenzen brachten, stellt die Transparenz bzw.

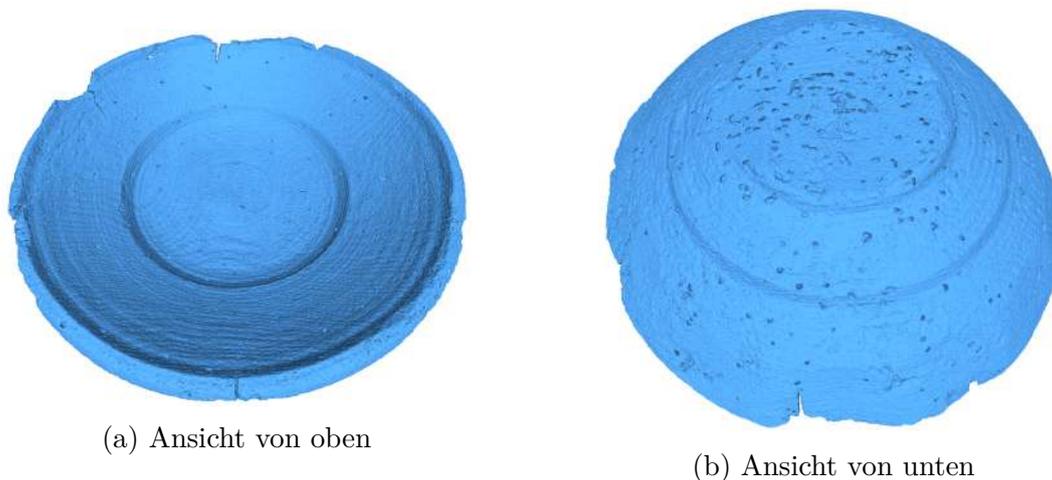


Abbildung 6.42: Akkurate Details im Modell des Holztellers

Halbtransparenz des Materials für Röntgenstrahlung keine Herausforderung dar. Das erfasste Computermmodell weist, wie in Abbildung 6.43a zu sehen ist, eine dem originalen Objekt entsprechende glatte Oberfläche von ausgezeichneter Qualität auf, was im Gegensatz zu den Resultaten beispielsweise mit dem Laserscanner steht. Außerdem ist die Homogenität von Glas dem guten Resultat zuträglich. Ähnlich wie bei der Handgranate ist die Computertomographie das einzige betrachtete Digitalisierungsverfahren, das auch eine Erfassung der in Abbildung 6.43b dargestellten Innenwand des Objekts zulässt.

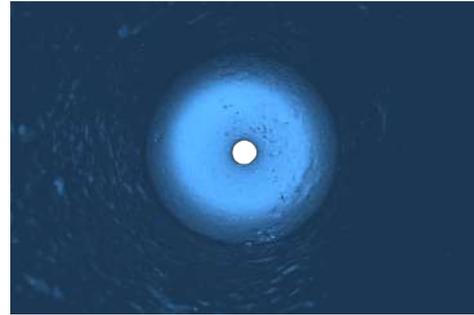
**Krug** Auch der Krug eignet sich gut für die Digitalisierung mittels Computertomographie. Das homogene Material ermöglicht ein qualitativ hochwertiges Volumendatenmodell mit einer glatten Oberfläche, wie in Abbildung 6.44a zu sehen ist. Die Höhe des Krugs schöpfte allerdings die maximal mögliche Höhe des verwendeten Tomographen fast aus. Auch in diesem Fall sind mittels Computertomographie Einblicke in das Innere des Krugs möglich, wie Abbildung 6.44c zeigt.

Besonders interessant an diesem Objekt war die Beobachtung, die bei einem höheren Schwellwert deutlich wurde: Einzelne Fragmente ließen sich dadurch entfernen, wodurch das in Abbildung 6.44b dargestellte Gerippe aus zusammengefügtten Fragmenten verblieb. Das Objekt wurde also vermutlich repariert oder restauratorisch vervollständigt, wobei ein von den Originalfragmenten abweichendes Material verwendet wurde. Durch entsprechende Wahl des Schwellwertes lassen sich so diese neuen Fragmente von den Originalfragmenten separieren. Dies zeigt auf, dass durch Computertomographie gewonnene Volumendaten auch für Forschungszwecke interessante Informationen liefern können.

**Votivkrone** Bei einem aufwendigen Objekt wie der Votivkrone ist die Erfassung durch einen Computertomographen besonders interessant. Die hohe geometrische Auflösung gibt auch die feinen Details zuverlässig wieder. Durch die verschiedensten in diesem Objekt verarbeiteten Materialien mit wiederum unterschiedlichsten Absorptionswerten kann jedoch kein Schwellwert gewählt werden, bei welchem einerseits alle zum Objekt



(a) Ansicht von außen



(b) Ansicht von innen

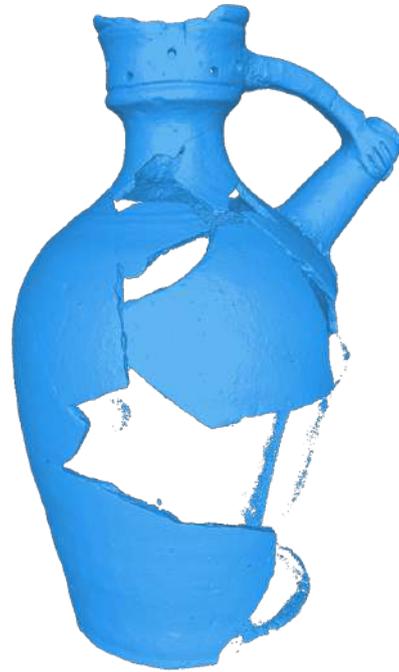
Abbildung 6.43: Exzellente Qualität des Oberflächenmodells des Arzneifläschchens

gehörigen Materialien sichtbar sind und andererseits nur eine vertretbare Menge an Artefakten auftritt. Für derart heterogene Objekte könnte die Verwendung eines *Multi-Energy-CTs* [21] Vorteile bieten.

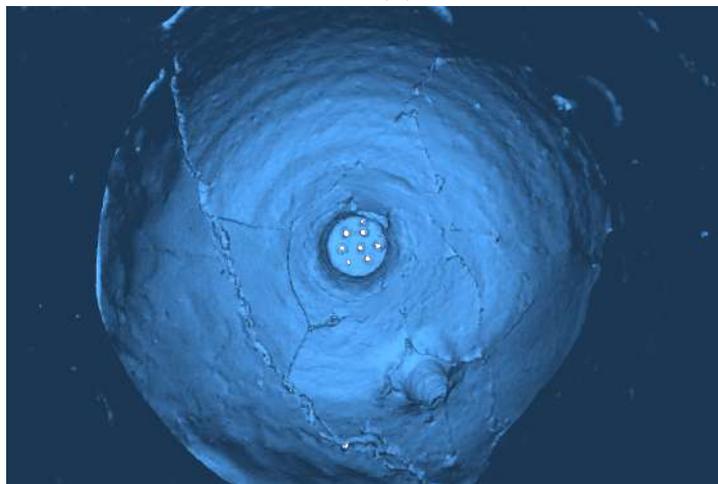
Dennoch zeigt das Resultat auch hier die Möglichkeiten, die sich durch Computertomographie ergeben. So kann beispielsweise die Fassung der Edelsteine auch in Bereichen untersucht werden, die mit bloßem Auge nicht sichtbar sind, indem ein Schwellwert gewählt wird, bei welchem zwar die Fassung dargestellt wird, die Dichte der Edelsteine selbst jedoch unterhalb des Schwellwerts liegt und diese somit nicht angezeigt werden. Die in Abbildung 6.45 dargestellten beispielhaften Ansichten der CT-Daten geben einen ersten Eindruck von den sich bietenden Möglichkeiten.



(a) Ansicht von außen

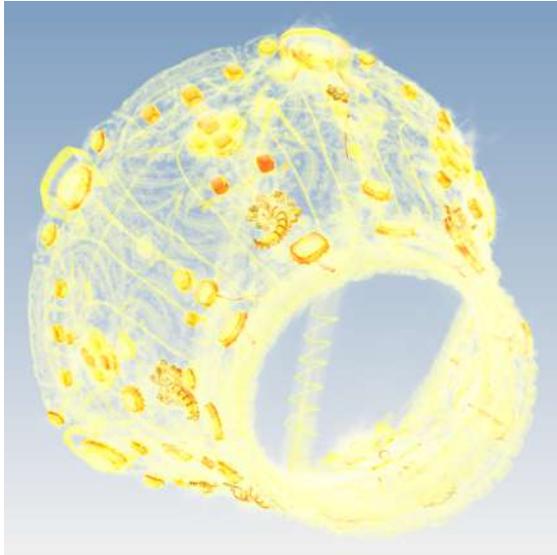


(b) Filterung der Fragmente nach Schwellwert

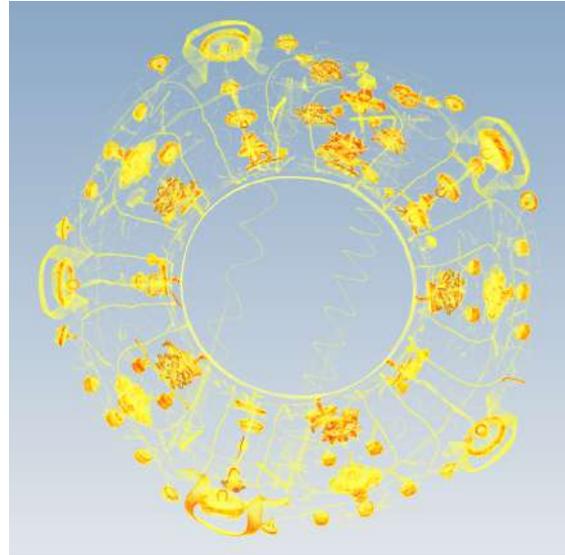


(c) Ansicht von innen

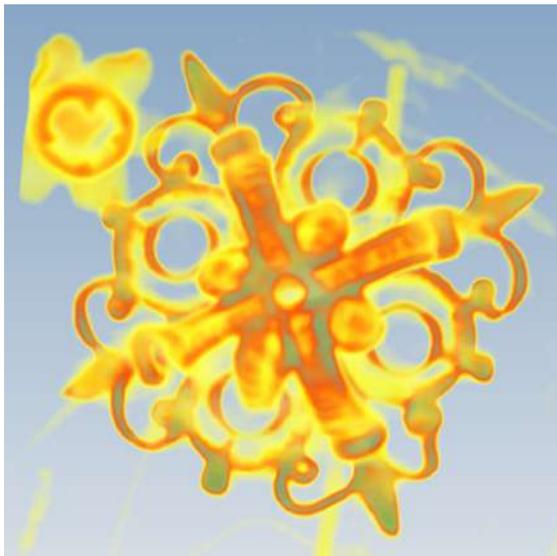
Abbildung 6.44: Aus den Volumendaten extrahiertes Oberflächenmodell des Krugs



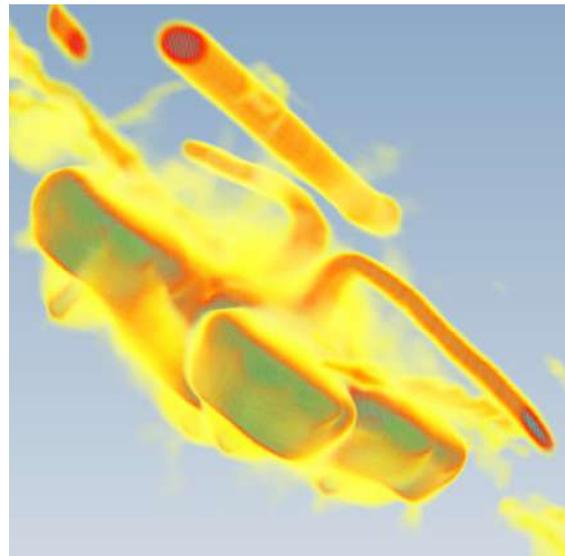
(a) Gesamtes Modell der Votivkrone



(b) Höherer Schwellwert blendet Stoff aus



(c) Isolierte Verzierung



(d) Befestigung einer Verzierung

Abbildung 6.45: Unterschiedliche Ansichten der CT-Daten der Votivkrone

# 7 Abstraktion der Ergebnisse

Während im letzten Kapitel die Digitalisierung konkreter Beispielobjekte und dabei auftretende Probleme behandelt wurden, soll in diesem Kapitel unter Verwendung der dabei gewonnenen Erkenntnisse eine Abstraktion von diesen Beispielobjekten hin zu allgemeinen Objekteigenschaften erfolgen.

## 7.1 Objektgröße

Eine erste wichtige Eigenschaft ist zunächst die physische Größe des Objekt. Diese wird auf die drei möglichen Werte *klein*, *mittel* und *groß* diskretisiert, wobei ein Objekt der Größe 10 cm in jeder Dimension als konzeptioneller Prototyp für Objekte mittlerer Größe angenommen wird. Objekte, deren Größe deutlich von diesem Prototypen abweicht, werden dann als *klein* bzw. *groß* klassifiziert. Es wird angenommen, dass das zu digitalisierende Objekt mobil ist und daher einerseits zur Scaneinrichtung befördert, andererseits aber auch unter dem Scanner bewegt werden kann. Der Fall immobiler Objekte wird im nächsten Kapitel in Abschnitt 8.2 behandelt.

**Laserscanner** Der Messbereich des Laserscanners ist sowohl nach oben als auch nach unten beschränkt, wodurch der Scanner einerseits nicht in einem beliebig kleinem Abstand zu einem kleinen Objekt, andererseits aber auch nicht beliebig weit von einem großen Objekt entfernt platziert werden kann. Für große Objekte lässt sich die Oberfläche abschnittsweise erfassen (zum Beispiel bei Holzteller und Bahrtuchschild), was jedoch einen erhöhten Aufwand erfordert. Kleine Objekte stellen bei der Erfassung prinzipiell kein Problem dar, allerdings erstreckt sich das Objekt nur über eine eingeschränkte Anzahl an Messpunkten pro Profil, während die verbleibenden Messpunkte ungenutzt bleiben. Derartige Objekte können also mit der gleichen absoluten Auflösung wie Objekte mittlerer Größe erfasst werden, jedoch lässt sich diese Auflösung für kleinere Gegenstände nicht anpassen. Die absolute Genauigkeit bleibt also gleich, während die Genauigkeit relativ zur Objektgröße für kleinere Objekte abnimmt. Dies kann einen negativen Einfluss auf die Qualität haben. Selbstverständlich sind auch Modelle erhältlich, die einen anderen Messbereich aufweisen und daher für die Erfassung kleinerer bzw. größerer Objekte besser geeignet sind. Für die Digitalisierung sehr großer Objekte eignen sich insbesondere Laserscanner, die nach dem *Time-of-flight*-Prinzip arbeiten.

**Stationärer Streifenlichtscanner** Bei der Verwendung des stationären Streifenlichtscanners gibt es mehrere limitierende Faktoren. Dies sind zum Einen die Brennweitenbereiche des Projektors und der Kamera(s). Außerdem muss für die Kalibrierung eine

passende Größe der Kalibrierplatte gewählt werden. Diese Limitierungen lassen sich durch die Verwendung angepasster Objektive und eine entsprechend skalierte Kalibrierplatte in einem gewissen Rahmen verschieben. Für große Objekte müsste außerdem ein Projektor mit einem angemessenen Lichtstrom verwendet werden. Mit den für die Experimente zur Verfügung stehenden Materialien trifft man allerdings auf ähnliche Restriktionen wie beim zuvor betrachteten Laserscanner: Für große Objekte verbleibt als einzige Option die aufwendige abschnittsweise Erfassung. Bei kleinen Objekten hingegen wird nur ein geringer Teil des nutzbaren Messbereichs ausgenutzt, was eine suboptimale Qualität des resultierenden Modells zur Folge haben kann. Die durchgeführten Experimente haben gezeigt, dass die Qualität der Geometrie der erstellten Computermodelle in einigen Fällen nicht an den Detailgrad anderer Digitalisierungsverfahren heranreicht, was die beschriebene Problematik bei kleinen Objekten zusätzlich verstärkt.

**Handgeführter Streifenlichtscanner** Wie schon beim Laserscanner ist der Messbereich des handgeführten Streifenlichtscanners nach oben und unten beschränkt. Dies schränkt auch hier theoretisch die Qualität von Modellen kleiner Objekte ein. Allerdings haben Experimente gezeigt, dass die Auflösung der Geometrie sehr hoch ist, wodurch sich auch kleine Objekte mit einer guten Qualität erfassen lassen. Ebenso gilt es bei großen Objekten die größere Oberfläche abzutasten, ohne den Scanner beliebig weit vom Objekt zu entfernen, was auch hier einen erhöhten Aufwand zur Folge hat. Gegebenenfalls kann es zur Beschleunigung der Algorithmen zur Nachverarbeitung hilfreich sein, das Objekt abschnittsweise mit einer gewissen Überlappung zu digitalisieren, zu verarbeiten und diese partiellen Modelle anschließend zu fusionieren. Diese Herangehensweise wurde aber experimentell nicht überprüft. Vom gleichen Hersteller sind jedoch auch andere Modelle mit einem für größere Objekte geeigneten Messbereich verfügbar [5].

**Photogrammetrie** Bei der photogrammetrischen Digitalisierung ist es wichtig, dass in jedem Bild ein möglichst großer Bereich des Objekts scharf dargestellt wird. Dies wird in erster Linie durch das verwendete Objektiv bedingt, was insbesondere bei kleinen Objekten eine Rolle spielt. Mit den zur Verfügung stehenden Makro- und Standard-Objektiven ist eine Erfassung kleiner, mittelgroßer und großer Objekte problemlos möglich. Als Beispiel sei hier der Passauer Töpel angeführt, jedoch sind nach oben hin kaum Grenzen gesetzt: Auch ganze Gebäude oder Landschaften können photogrammetrisch erfasst werden. Für die nachfolgende softwareseitige Verarbeitung spielt die Größe des originalen Objekts (abgesehen von der dadurch eventuell höheren Anzahl an Bildern) keine Rolle.

**Computertomographie** Die Möglichkeiten bei der Erfassung von Objekten verschiedener Größe hängen natürlich primär vom verwendeten Computertomographen ab. Der für die Experimente verwendete Tomograph eignet sich für die Digitalisierung kleiner und mittelgroßer Objekte. Um auch bei kleinen Objekten die komplette Detektorfläche nutzen zu können, kann der Drehteller mitsamt dem Objekt näher zur Strahlenquelle bewegt werden, wodurch sich die Projektion auf dem Detektor vergrößern lässt. Große Objekte stellen jedoch ein unüberwindbares Problem dar. Einerseits ist die Größe des die

Verfahren	Klein	Mittel	Groß
Laserscanner	Verringerte Qualität	Problemlos	Aufwendig
Stationärer Streifenlichts.	Verringerte Qualität	Problemlos	Aufwendig
Handgeführter Streifenlichts.	Problemlos	Problemlos	Aufwendig
Photogrammetrie	Problemlos	Problemlos	Problemlos
Computertomographie	Problemlos	Problemlos	Problematisch

Tabelle 7.1: Eignung der Digitalisierungsverfahren für Objekte unterschiedlicher Größe

Projektionen erfassenden Detektors begrenzt. Andererseits absorbieren größere Objekte je nach Beschaffenheit auch eine größere Menge an Strahlung. Um Artefakte zu vermeiden, muss daher auch die Energie der verwendeten Strahlung erhöht werden, was jedoch nur in begrenztem Maße möglich ist. Auch eine abschnittsweise Erfassung, wie sie bei den zuvor betrachteten Digitalisierungsverfahren möglich war, scheidet hier aufgrund der konzeptuellen Methodik des Verfahrens in den meisten Fällen aus. Es existieren Computertomographen, mit welchen die Erfassung großer Objekte, wie beispielsweise von Autos, möglich ist, allerdings sind diese sowohl in der Anschaffung als auch im Betrieb exorbitant teuer. Außerdem kann die hohe Energie der Strahlung das Objekt gegebenenfalls beschädigen, wie es beispielsweise bei Farben oft der Fall ist.

Die Eignung der betrachteten Digitalisierungsverfahren in Bezug auf unterschiedliche Objektgrößen ist zusammenfassend in Tabelle 7.1 dargestellt.

## 7.2 Oberflächenhelligkeit

Neben der Größe des Objekts hat auch die Helligkeit der Oberfläche einen Einfluss auf die Ergebnisse des Digitalisierungsvorgangs. Hier wird eine Diskretisierung in lediglich zwei Klassen vorgenommen.

**Laserscanner** Objekte, die für einen Betrachter hell erscheinen, rufen dieses Empfinden hervor, da sie weniger Licht absorbieren als dunkler erscheinende Objekte. Dies gilt für natürliches Licht ebenso wie für Laserlicht. Von dunkleren Objekten wird also weniger Licht in Richtung des Detektors reflektiert. Durch eine Anpassung der Belichtungszeit des Laserscanners kann dem jedoch Rechnung getragen werden, wodurch bei diffusen Oberflächen kein Qualitätsunterschied zwischen den Resultaten hellerer und dunklerer Objekte feststellbar ist.

**Stationärer Streifenlichtscanner** Die Ausführungen zur Oberflächenhelligkeit im vorherigen Abschnitt gelten selbstverständlich auch für das Licht, das vom Projektor des Streifenlichtscanners ausgesandt wird. Hier hat sich jedoch beispielsweise bei der Digitalisierung des Vorhängeschlosses, das zudem an manchen Stellen eine reflektierende Oberfläche aufweist, gezeigt, dass selbst bei erhöhter Blendenöffnung der Kameras und Abdunklung des umgebenden Raumes die Lichtstärke des Projektors nicht ausreicht, um auf dem Objekt einen Kontrast zwischen hellen und dunklen Streifen hervorzurufen,

Verfahren	Dunkel	Hell
Laserscanner	Problemlos	Problemlos
Stationärer Streifenlichts.	Problematisch	Problemlos
Handgeführter SLS	Problemlos	Problemlos
Photogrammetrie	Problemlos	Problemlos
Computertomographie	Problemlos	Problemlos

Tabelle 7.2: Eignung der Digitalisierungsverfahren für unterschiedliche Oberflächenhelligkeiten

der eine Rekonstruktion der Objektoberfläche erlaubt. Sehr dunkle Objektoberflächen stellen somit ein Problem für die Erfassung mittels Streifenlichtscanner dar.

**Handgeführter Streifenlichtscanner** Da der handgeführte Streifenlichtscanner nach dem gleichen Funktionsprinzip wie der stationäre Streifenlichtscanner arbeitet, sind hier bei dunklen Oberflächen die gleichen Schwierigkeiten zu erwarten. Dennoch zeigt das verwendete Modell eine hohe Robustheit gegenüber dunklen Oberflächen. Dies kann beispielsweise durch die kleinere durch den Projektor beleuchtete Fläche oder durch die verwendete Lichtquelle verursacht werden.

**Photogrammetrie** Durch die Veränderung der Belichtungszeit der Kamera kann bei der Erfassung der Bilder flexibel auf helle oder dunkle Objektoberflächen reagiert werden. Falls die Oberfläche jedoch eine sehr dunkle Färbung aufweist, kann das Problem auftreten, dass bei einer Belichtungszeit, die in einer originalgetreuen Helligkeit des Objekts im Bild resultiert, in diesem Bild kaum ausgeprägte Details zu erkennen sind, die für eine photogrammetrische Rekonstruktion genutzt werden können. Falls dies zu Problemen bei der softwareseitigen Verarbeitung führt, können die Aufnahmen durch eine längere Belichtungszeit leicht überbelichtet werden, wodurch Merkmale leichter erkennbar werden. Nach der Erstellung des Computermodells kann die Helligkeit der Textur dann an die Färbung des Originalobjekts angepasst werden.

**Computertomographie** Durch einen Computertomographen wird im Gegensatz zu den zuvor betrachteten Verfahren nicht die Objektoberfläche, sondern das gesamte Volumen erfasst, da die Röntgenstrahlung das Objekt durchdringt und anhand der nach der Durchleuchtung verbleibenden Strahlungsmenge Informationen über die Beschaffenheit des Objekts gewonnen werden, anstatt diese aus den Reflexionen an der Oberfläche abzuleiten. Somit hat auch die Färbung der Oberfläche keinerlei Einfluss auf das Resultat einer tomographischen Erfassung.

Die soeben beschriebenen Erkenntnisse über die Abhängigkeit des Ergebnisses des Digitalisierungsvorgangs von der Helligkeit der Objektoberfläche sind in Tabelle 7.2 zusammengefasst.

## 7.3 Oberflächendetails

Für viele der betrachteten Verfahren ist es direkt bei der Erfassung oder bei der darauf folgenden Verarbeitung wichtig, sich markante Details auf der Objektoberfläche zunutze zu machen. Hier gilt es zwischen geometrischen Details und Merkmalen in der Textur zu unterscheiden. Es wird betrachtet, welche Auswirkungen das Vorhandensein oder Fehlen dieser beiden Arten von Merkmalen auf den Digitalisierungsprozess hat.

**Laserscanner** Da ein Laserscanner keine Farbe erfasst, spielen auch Details in der Textur keine Rolle für den Digitalisierungsvorgang. Aufgrund des kalibrierten Aufbaus sind für einen einzelnen Messvorgang, also eine Aneinanderreihung von gemessenen Profilen, keinerlei Merkmale in der Objektoberfläche notwendig. Sollen allerdings mehrere der daraus entstandenen partiellen Modelle gegeneinander registriert werden, sind solche Details unabdingbar. Da die Textur nicht erfasst wird, können derartige Merkmale dafür nicht genutzt werden, weshalb geometrische Details für die Erstellung eines vollständigen Modells notwendig sind.

**Stationärer Streifenlichtscanner** Für eine Einzelaufnahme sind auch in diesem Fall aufgrund der zuvor durchgeführten Kalibrierung keine Anforderungen an Merkmale in der Objektoberfläche zu stellen. Werden jedoch ganze Aufnahmereihen betrachtet oder sollen mehrere solcher Aufnahmereihen kombiniert werden, müssen auch hier die aus jeder Einzelaufnahme resultierenden partiellen Modelle aneinander ausgerichtet werden, was die Existenz von Oberflächenmerkmalen voraussetzt. Da der Streifenlichtscanner auch die Objekttextur detektiert, können im Gegensatz zum Laserscanner hier neben geometrischen Merkmalen auch markante Details in der Textur verwendet werden.

**Handgeführter Streifenlichtscanner** Für den handgeführten Streifenlichtscanner gelten im Wesentlichen die gleichen Erkenntnisse wie für den stationären Streifenlichtscanner. Auch wenn keine offiziellen Herstellerangaben dazu vorliegen, lassen Beobachtungen dennoch vermuten, dass das projizierte Streifenmuster im Gegensatz zum stationären Streifenlichtscanner nicht variiert wird. Dies hat zur Folge, dass auch die aus einer Einzelaufnahme ableitbare Menge an geometrischen Informationen kleiner ist. Die gleiche Folge hat der beim handgeführten Streifenlichtscanner in der Regel kleinere Ausschnitt des Gesamtobjekts, der in einer Aufnahme erfasst werden kann. Im Gegenzug ist dort jedoch die Frequenz der Messungen deutlich höher. Die Ausrichtung aufeinanderfolgender Messungen erfolgt durch das *Tracking*, welches auf eine ähnliche Weise wie die herkömmliche Registrierung funktioniert und daher ebenfalls Merkmale in Geometrie oder Textur erfordert. Bei kleineren Objekten, die jedoch weder Geometrie- noch Textur-Merkmale aufweisen, kann in vielen Fällen Abhilfe geschaffen werden, indem zusätzliche Marker neben oder unterhalb des Objekts angebracht werden. So wurde beispielsweise der manuelle Drehteller mit einem gemusterten Untergrund versehen, der beim Tracking kleiner Objekte wertvolle Hilfe leistet.

**Photogrammetrie** Die Photogrammetrie basiert auf der Erkennung korrespondierender Punkte in verschiedenen Bildern. Im theoretischen Fall eines perfekt diffusen Objekts ohne Texturdetails würde bei ebenfalls perfekt gleichmäßiger Beleuchtung jede Aufnahme unabhängig von Objektgeometrie und Kameraposition ein einfarbiges Bild darstellen und daher exakt identisch erscheinen. Hier wäre ein Finden von Korrespondenzen also gänzlich unmöglich, dem jedoch durch eine ausreichende Menge an Texturmerkmalen Abhilfe geschaffen werden könnte. Derartige Extrembedingungen sind in der Realität selbstverständlich nicht anzutreffen, wodurch sich beispielsweise auch durch Unregelmäßigkeiten in der Beleuchtung in Kombination mit Geometriemerkmale des Objekts erkennbare Beziehungen zwischen Bildern ergeben, die für die photogrammetrische Verarbeitung genutzt werden können. Daher war es bei jedem betrachteten Beispielobjekt möglich, die Bilder gegeneinander auszurichten. Außerdem sind bereits leichte Strukturen oder Verfärbungen, die fast jedes Objekt aufweist, in den meisten Fällen ausreichend für eine korrekte Ausrichtung der Aufnahmen. Lediglich bei der Digitalisierung des rotationssymmetrischen und sehr gleichmäßig gefärbten Scheibenleuchters unter Verwendung eines Drehtellers war dies nicht möglich, wobei allerdings auch die reflektierende Metalloberfläche des Leuchters einen störenden Einfluss hatte.

Wurden alle Bilder aus einer Aufnahmereihe korrekt ausgerichtet, lassen sich darüber Informationen über die geometrische Beschaffenheit des Objekts ableiten. Diese Informationen können dann zusätzlich zu den Texturmerkmalen dazu verwendet werden, um die vorliegenden partiellen Modelle gegeneinander zu registrieren. Während diese geometrischen Merkmale im ersten Schritt bei der Ausrichtung der Bilder also nur indirekt verwendet werden können, sind sie bei der darauf folgenden Registrierung der partiellen Modelle direkt von Nutzen.

**Computertomographie** Wie bereits im vorherigen Abschnitt bemerkt, wird durch einen Computertomographen anstelle der Objektoberfläche das gesamte Objektvolumen erfasst. Die Oberflächentextur wird nicht erfasst, weshalb Texturmerkmale keinerlei Rolle für den Aufnahmeprozess oder die nachfolgende Verarbeitung spielen. Außerdem spielt auch die konkrete Form der Oberfläche keine Rolle. Da sich durch einen Tomographen in der Regel das gesamte Objekt in einem Aufnahmevorgang erfassen lässt und eine Aufteilung in mehrere partielle Modelle ohnehin nicht ohne Weiteres möglich wäre, ist kein Registrierungsprozess vonnöten, für den geometrische Merkmale notwendig wären.

Tabelle 7.3 zeigt die gewonnenen Erkenntnisse in Abhängigkeit von den Oberflächeneigenschaften auf.

## 7.4 Transparenz

Da transparente Objekte die eintreffende Strahlung kaum reflektieren, stellen sie für optische Digitalisierungsverfahren eine besondere Herausforderung dar. Aus diesem Grund soll die Digitalisierung derartiger Objekte im Folgenden betrachtet werden.

Geometriemerkmale	Nein	Nein	Ja	Ja
Texturmerkmale	Nein	Ja	Nein	Ja
Laserscanner	Problematisch	Problematisch	Problemlos	Problemlos
Stationärer SLS	Problematisch	Problemlos	Problemlos	Problemlos
Handgeführter SLS	Problematisch	Problemlos	Problemlos	Problemlos
Photogrammetrie	Problematisch	Problemlos	Evtl. probl.	Problemlos
Computertomogr.	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos

Tabelle 7.3: Eignung der Digitalisierungsverfahren für Objekte mit unterschiedlichen Merkmalen

**Laserscanner** Ein Triangulations-Laserscanner basiert auf der Erfassung des von der Laserquelle ausgesandten und vom Objekt reflektierten Strahlung durch einen Detektor. Da die Laserstrahlung jedoch nicht oder nur kaum reflektiert wird, kann sie durch den Detektor nicht erkannt werden, wodurch keine Messpunkte ermittelt werden können.

**Stationärer Streifenlichtscanner** Im Gegensatz zum Laserscanner wird das zu digitalisierende Objekt nicht mit Laserstrahlung sondern mit einem Streifenmuster beleuchtet. Allerdings wird auch dieses nicht reflektiert, weshalb keine Informationen über die geometrische Beschaffenheit des Objekts gewonnen werden können.

**Handgeführter Streifenlichtscanner** Für den handgeführten Streifenlichtscanner zeigen die Experimente dieselben Resultate wie beim stationären Streifenlichtscanner.

**Photogrammetrie** Um korrespondierende Punktepaare zu finden, müssen die entsprechenden Punkte in beiden Bildern ähnliche Eigenschaften aufweisen, wie beispielsweise eine gleiche Färbung oder eine ähnliche geartete Nachbarschaft umgebender Bildpunkte. Bilder transparenter Objekte zeigen jedoch meist nicht das Objekt selbst, sondern den Hintergrund. Lediglich Reflexionen sind in vielen Fällen, wie beispielsweise bei Glas, anzutreffen. Das menschliche Auge erkennt diese Objekte daher anhand dieser Spiegelungen und Verzerrungen im Hintergrund. Diese sind jedoch stark von Position und Ausrichtung der Kamera abhängig und können deshalb nicht für die Suche nach Korrespondenzen zwischen Bildern herangezogen werden. Eine Digitalisierung transparenter Objekte mittels Photogrammetrie ist daher nicht möglich.

**Computertomographie** Während intransparente Objekte sichtbare Strahlung reflektieren, kann die kurzwelligere Röntgenstrahlung das Objekt durchdringen, wobei ein gewisser Teil absorbiert wird. Transparente Objekte hingegen können beide Strahlungstypen durchdringen. Die Objekttransparenz stellt also keine Schwierigkeit für die Computertomographie dar.

Die Eignung der betrachteten Digitalisierungsverfahren für die Erfassung transparenter Objekte ist in Tabelle 7.4 zu sehen.

Verfahren	Transparent	Intransparent
Laserscanner	Problematisch	Problemlos
Stationärer SLS	Problematisch	Problemlos
Handgeführter SLS	Problematisch	Problemlos
Photogrammetrie	Problematisch	Problemlos
Computertomographie	Problemlos	Problemlos

Tabelle 7.4: Eignung der Digitalisierungsverfahren für transparente Objekte

## 7.5 Reflexionen

In dieser Kategorie werden zwei sich gegenseitig ausschließende Eigenschaften betrachtet, welche die Reflexionen einfallenden Lichtes an intransparenten Objektoberflächen beschreiben. Einerseits werden *spiegelnde* Objekte betrachtet, die den größten Teil der einfallenden Strahlung in eine bestimmte Richtung reflektieren. Oberflächen, die einfallendes Licht jedoch diffus reflektieren, werden als *matt* bezeichnet.

**Laserscanner** Diffus reflektierende Objektoberflächen stellen bei der Digitalisierung mittels Laserscanner kein Problem dar. Bei spiegelnden Oberflächen, wie beispielsweise der Rückseite des Bahrtuschschilds, tritt jedoch eine große Menge an Artefakten auf, was zu einem unbrauchbaren Ergebnis führt.

**Stationärer Streifenlichtscanner** Während sich matte Oberflächen gut für eine Erfassung durch den stationären Streifenlichtscanner eignen, stellen spiegelnde Objekte ein Problem dar, da das auf die Oberfläche projizierte Streifenmuster bei spiegelnden Oberflächen nur erfasst wird, wenn die Objektoberfläche annähernd senkrecht zur Achse, die Projektor und Kamera bilden, verläuft. Nur in diesem Fall wird nämlich das Muster in Richtung der Kamera reflektiert und kann für die Rekonstruktion der Objektgeometrie verwendet werden. Eine Erfassung der Rückseite des Bahrtuschschildes war daher auch mit dem Streifenlichtscanner nicht möglich, da das entstandene partielle Modell an zahlreichen Stellen Löcher durch fehlende Messpunkte zeigte. Auch bei leicht spiegelnden Objekten, die eine korrekte Erfassung der Oberflächengeometrie ermöglichen, zeigt die Textur starke Qualitätseinbußen in Form von Helligkeitsschwankungen, da die Helligkeit der Oberfläche stark von der Scanrichtung abhängt.

**Handgeführter Streifenlichtscanner** Obwohl dieses Gerät auf dem gleichen Prinzip wie der stationäre Streifenlichtscanner basiert, zeigt es doch eine deutlich höhere Robustheit gegenüber spiegelnden Oberflächen. Alle Beispielobjekte mit derartigen Oberflächen konnten ohne größere Probleme digitalisiert werden. Dies wird zumindest teilweise dadurch bedingt, dass die Aufnahmen durch die manuelle Bewegung aus vielen verschiedenen Richtungen erstellt werden und die Ausrichtung somit stärker variiert. Somit verlaufen auch größere Bereiche der Oberfläche annähernd senkrecht zur Richtung mindestens einer Einzelaufnahme, was genau den Bereichen entspricht, aus welchen sich auch bei re-

Verfahren	Matt	Spiegelnd
Laserscanner	Problemlos	Problematisch
Stationärer SLS	Problemlos	Problematisch
Handgeführter SLS	Problemlos	Verringerte Qualität
Photogrammetrie	Problemlos	Aufwendig
Computertomographie	Problemlos	Problemlos

Tabelle 7.5: Eignung der Digitalisierungsverfahren für matte und spiegelnde Objekte

flektierenden Oberflächen Messpunkte ermitteln lassen. Diese Aussage wird unterstützt durch die Beobachtung, dass der Erfassungsvorgang bei spiegelnden Objekten oft eine längere Zeit in Anspruch nimmt als bei matten Objekten.

Auch die Qualität der Textur ist aus ebendiesem Grund den mithilfe des stationären Streifenlichtscanners gewonnenen Resultaten derartiger Objekte in vielen Fällen etwas überlegen, da einzelne Richtungen, aus welchen bestimmte Bereiche zu hell erscheinen, nicht so stark ins Gewicht fallen. Eventuell ließe sich die Texturqualität weiter erhöhen, indem die Blitzlampe des *Artec Spider* deaktiviert und zur Ausleuchtung des Objekts stattdessen ein möglichst diffuses Umgebungslicht verwendet würde.

**Photogrammetrie** Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Verfahren fungiert bei der Photogrammetrie keine im Gerät integrierte Komponente als Lichtquelle, sondern es wird das Umgebungslicht verwendet. Durch eine sehr gleichmäßige Ausleuchtung lassen sich negative Einflüsse durch Reflexionen vermeiden, wodurch sich auch spiegelnde Objekte photogrammetrisch erfassen lassen. Dies betrifft sowohl die Geometrie des resultierenden Computermodells als auch die Originaltreue der Textur. Allerdings ist es verhältnismäßig aufwendig, eine derartige gleichmäßige Beleuchtung zu erreichen. Stattdessen sind in solchen Fällen andere Rekonstruktionsverfahren vorzuziehen, wie beispielsweise die Deflektometrie.

**Computertomographie** Reflektivität ist eine Eigenschaft von Oberflächen, die für eine Digitalisierung mittels Computertomographie nicht von Bedeutung ist, da das Volumen des Objekts erfasst wird. Somit eignen sich sowohl matte als auch spiegelnde Oberflächen für eine tomographische Erfassung.

In Tabelle 7.5 ist zusammenfassend dargestellt, welche Folgen matte und reflektierende Oberflächen bei einer Digitalisierung mit bestimmten Verfahren haben.

## 7.6 Flachheit

Bei der generellen Form der zu digitalisierenden Objekte gilt es zwischen *flachen* und *gleichförmigen* Strukturen zu unterscheiden. Während der Holzteller oder das Bahrtuchschild zu den Vertretern der flachen Objekte zählen, ist die Handgranate ein typisches Beispiel für ein gleichförmiges Objekt. Der Einfluss dieser Eigenschaft auf die unterschiedlichen Digitalisierungsverfahren soll nun beleuchtet werden.

**Laserscanner** Bei sehr flachen Objekten ist die Erfassung von Vorder- und Rückseite unproblematisch, während hingegen die sehr schmalen Seitenwände zum Problem werden können. Einerseits muss das Objekt hierfür vertikal unter dem Laserscanner platziert werden, was sich als Problem herausstellen kann. Andererseits sind auch bei einer perfekten Ausrichtung des Objekts nur sehr wenige Messpunkte pro Messvorgang zu erwarten. Da der seitliche Rand vollständig erfasst werden muss, ist dadurch eine hohe Anzahl solcher Messvorgänge notwendig, was einen gewissen Aufwand verursacht. Weitere Probleme treten bei der Registrierung der Einzelaufnahmen auf. Einerseits lässt sich in diesen seitlichen Ausschnitten aufgrund der geringen Anzahl an Messpunkten nur schwer eine ausreichende Menge an Punkten finden, die sich für die Angabe von Korrespondenzen eignen. Andererseits treten unabhängig von den Seitenwänden Probleme beim Registrieren von parallel verlaufenden Vorder- und Rückseiten auf. Da diese sehr ähnlich geformt sind, neigen die bei der softwareseitigen Bearbeitung verwendeten Optimierungsalgorithmen dazu, Vorder- und Rückseite aufeinander zu ziehen, wodurch der Abstand zwischen den beiden Flächen verschwindet und das Resultat unbrauchbar ist. Hier hilft in vielen Fällen nur eine manuelle Ausrichtung der beiden partiellen Modelle, die jedoch in der Regel nicht exakt ist.

Bei größeren und sehr gleichförmigen Objekten kann im Gegensatz dazu das Problem auftreten, dass der Messbereich des Laserscanners zu klein ist, um sowohl nah am Scanner befindliche als auch weiter entfernte Flächen erfassen zu können. In diesem Fall müssen in unterschiedlichen Abständen zum Objekt Aufnahmen erstellt werden, wobei jede Aufnahme Flächen abbildet, deren Abstand zum Laserscanner sich innerhalb eines gewissen Intervalls befinden. Diese Aufnahmen werden dann anschließend softwareseitig gegeneinander registriert. Dieses Prozedere erhöht jedoch den für die Digitalisierung aufzubringenden Aufwand. Bei den vorliegenden Beispielobjekten war es jedoch nicht notwendig.

**Stationärer Streifenlichtscanner** Für die Digitalisierung mittels stationärem Streifenlichtscanner gelten im Wesentlichen die gleichen Erkenntnisse wie für den Laserscanner. Die Erfassung schmaler Seitenwände ist schwer bis unmöglich und bei der Registrierung parallel verlaufender Vorder- und Rückseiten tritt auch hier obiges Problem auf. Die Beschränkung des Messbereichs wie beim Laserscanner ist bei diesem Verfahren nicht vorhanden, jedoch können bei sich stark unterscheidenden Entfernungen zwischen Scanner und Objektoberfläche Probleme mit der Fokussierung von Projektor und Kamera ergeben. Bei den betrachteten Objekten verursachte diese Tatsache jedoch keine Schwierigkeiten.

**Handgeführter Streifenlichtscanner** Auch mit diesem Gerät stellt die Erfassung von schmalen Seitenwänden eine Herausforderung dar. Durch die Flexibilität bezüglich Position und Ausrichtung des Scanners entfällt hier jedoch die aufwendige Platzierung und Fixierung des Objekts. Außerdem erhält man durch die während des Scanvorgangs auf dem Rechner dargestellte Vorschau eine direkte Rückmeldung, welche Bereiche bereits erfasst wurden. Damit während der Digitalisierung dieser schmalen Seiten der Tracking-

Algorithmen die aktuelle Bewegung nachvollziehen kann, sind aufgrund der geringen Anzahl an Messpunkten sehr ruhige und langsame Bewegungen des Geräts notwendig. Allerdings ist es nach erfolgreichem Tracking im Gegensatz beispielsweise zum Laser-scanner nicht notwendig, viele Einzelaufnahmen der Seiten gegeneinander zu registrieren. Bei der Ausrichtung parallel verlaufender Vorder- und Rückseiten mit geringem Abstand sind jedoch auch hier die gleichen Probleme zu beobachten, wie sie schon bei den beiden vorherigen Verfahren geschildert wurden.

Im Gegensatz dazu verursachen sehr gleichförmige Objekte keine Schwierigkeiten, obwohl auch der Messbereich des verwendeten Streifenlichtscanners von oben und unten beschränkt ist. Allerdings lässt sich einerseits die Ausrichtung des Scanners durch die manuelle Bedienung auf den Verlauf der Oberfläche anpassen, andererseits ist es aufgrund des automatischen Trackings ohne Mehraufwand möglich, mehrere Aufnahmen von verschiedenen Positionen zu erstellen und aneinander auszurichten.

**Photogrammetrie** Bei der Erstellung von Bildern von schmalen Objektseiten lässt sich durch die Auswahl eines geeigneten Objektivs und die Anpassung des Zooms theoretisch ein beliebig großer Bereich des Bildes durch das Objekt ausfüllen, wodurch sich viele Messpunkte bestimmen lassen. Allerdings erhöht sich dadurch auch die insgesamt notwendige Anzahl an Bildern der Objektseite. Außerdem ist es wichtig, dass die jeweils sichtbaren Flächen scharf dargestellt werden, was eine umso höhere Tiefenschärfe erfordert. Bei der Registrierung treten im Wesentlichen die gleichen Schwierigkeiten auf wie bei den zuvor betrachteten Digitalisierungsverfahren.

Gleichförmige Objekte stellen für die photogrammetrische Erfassung keinerlei Probleme dar, da Position, Ausrichtung und Fokus der Kamera von Bild zu Bild angepasst werden kann und somit optimale Flexibilität gewährleistet ist.

**Computertomographie** Schmale Oberflächen, wie beispielsweise die Seitenwände eines flachen Objekts, sind für eine Digitalisierung mittels Computertomographie nicht relevant. Da keine Registrierung von Einzelaufnahmen notwendig ist, sind auch die hierbei auftretenden Probleme bei der Digitalisierung mit einem Tomographen nicht von Bedeutung. Lediglich die Auflösung des Geräts muss bei flachen Objekten so hoch sein, dass das Volumen des Objekts erfasst werden kann. Allerdings ist eine gleichmäßige Durchstrahlungslänge äußerst wichtig für die Qualität der erfassten Daten: Um zu vermeiden, dass das Objekt die gesamte entlang eines Strahls ausgesandte Energie absorbiert, ist es bei flachen Objekten meist sinnvoll, dieses aufrecht auf dem Drehteller im Tomographen zu platzieren, so dass bei einem Großteil der Einzelaufnahmen die Röntgenstrahlen nur einen sehr kurzen Weg innerhalb des Objektinneren zurücklegen. Um diese vertikale Platzierung zu erreichen, sind geeignete Halterungen und Fixierhilfsmittel vonnöten. Mit der Laminographie gibt es jedoch für die tomographische Erfassung flacher Objekte geeignetere Verfahren.

Tabelle 7.6 zeigt die Eignung der einzelnen Verfahren für die betrachteten Objekteigenschaften auf.

Verfahren	Flach	Gleichförmig
Laserscanner	Problematisch	Evtl. aufwendig
Stationärer SLS	Problematisch	Evtl. aufwendig
Handgeführter SLS	Verringerte Qualität	Problemlos
Photogrammetrie	Aufwendig	Problemlos
Computertomographie	Problemlos	Problemlos

Tabelle 7.6: Eignung der Digitalisierungsverfahren für flache und gleichförmige Objekte

## 7.7 Selbstverdeckungen

Eines der größten Probleme bei optischen Digitalisierungsverfahren sind Selbstverdeckungen, also Bereiche auf der Objektoberfläche, die durch einen anderen Teil des Objekts verdeckt werden und daher schwer einzusehen sind. Für die nachfolgenden Ausführungen wird die Ausprägung von Selbstverdeckungen auf die drei möglichen Werte von *keinen*, *flachen* und *tiefen* Selbstverdeckungen quantisiert, wobei die Grenzen fließend sind.

Eine flache Verdeckung ist beispielsweise der Bereich des Griffs beim Objekt „Krug“, während Beispiele für tiefe Verdeckungen durch das Innere des Vorhängeschlosses oder des Kerzenhalters gegeben sind. Der Bereich unterhalb des Griffs beim Beispielobjekt „Deckel“ ist hingegen nicht eindeutig einer der beiden Kategorien zuzuordnen.

**Laserscanner** Damit eine Oberfläche durch den Laserscanner erfasst werden kann, muss sie einerseits der durch die Lichtquelle emittierte Laserstrahl erreichen, andererseits muss die Reflexion dieses Strahls auch durch den Detektor erkannt werden können. Bei tiefen Verdeckungen ist dies jedoch meist nicht möglich, weshalb sich die Digitalisierung mittels Laserscanner für Objekte mit derartigen Verdeckungen nicht eignet. Auch bei leichten Verdeckungen ist oft eine präzise Positionierung des Objekts unter dem Scanner notwendig. Um die aktuelle Positionierung zu überprüfen, muss allerdings zunächst der Scanvorgang durchgeführt und das Resultat bewertet werden. Dieser Vorgang muss so lange wiederholt werden, bis die gewonnen Messdaten den gewünschten Oberflächenabschnitt zeigen, was in vielen Fällen mit einem hohen Aufwand verbunden ist.

**Stationärer Streifenlichtscanner** Auch beim stationären Streifenlichtscanner muss die zu erfassende Oberfläche durch den Projektor beleuchtet und durch die Kamera abgebildet werden können, weshalb auch hier tiefe Verdeckungen ein unüberwindbares Problem darstellen. Ebenso ist die Erfassung leichter Verdeckungen mit einem erhöhten Aufwand verbunden, da entweder das Objekt oder die Apparatur bestehend aus Kamera(s) und Projektor korrekt positioniert und ausgerichtet werden muss, um den Einfluss von Selbstverdeckungen zu minimieren. Hier ist jedoch sowohl die Projektion auf dem Objekt als auch das Bild der Kamera in einer Vorschau am Rechner sichtbar, was den Vorgang erleichtert. Sollte dafür jedoch eine Umpositionierung der Kameras relativ zum Projektor oder eine Änderung bezüglich Blende oder Fokus notwendig sein, ist eine erneute

Kalibrierung des Streifenlichtscanners notwendig. Durch die Verwendung mehrerer Kameras, wie bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimenten, lässt sich der durch flache Selbstverdeckungen verursachte Mehraufwand zwar verringern aber nicht vermeiden.

**Handgeführter Streifenlichtscanner** Für tiefe Verdeckungen gelten beim handgeführten Streifenlichtscanner die gleichen Erkenntnisse wie in obigen Ausführungen. Auch für flache Selbstverdeckungen ist eine Aufnahme aus einer bestimmten Richtung notwendig. Diese ist jedoch durch die manuelle Führung und daher sehr flexible Handhabung des Scanners einfach realisierbar. Eine Rückmeldung erhält der Benutzer durch die Echtzeitschau auf dem Rechner. Objekte mit solchen flachen Verdeckungen sind mit einem handgeführten Streifenlichtscanner also ohne relevanten Mehraufwand digitalisierbar.

**Photogrammetrie** Bei der Photogrammetrie erfolgt die Beleuchtung des Objekts im Gegensatz zu den zuvor betrachteten Verfahren nicht aus Richtung des Detektors, sondern diffus durch die umgebende Beleuchtung. Aus diesem Grund ist es für die erfolgreiche Rekonstruktion einer aufgrund einer tiefen Selbstverdeckung nur schwer einsehbaren Fläche ausreichend, wenn diese in irgendeiner Form beleuchtet wird und auf mehreren Einzelaufnahmen zu sehen ist. Die Erstellung solcher Bilder und die Überprüfung, ob diese eine erfolgreiche Rekonstruktion ermöglichen, ist jedoch aufwendig. Trotzdem ist die Photogrammetrie das einzige optische Verfahren, mithilfe dessen eine tiefe Verdeckung wie das Innere des Kerzenhalters erfolgreich erfasst werden konnte. Auch flache Selbstverdeckungen erfordern selbstverständlich passende Bilder. Da es bei derartigen Verdeckungen aber meist möglich ist, eine ausreichende Anzahl an Aufnahmen (als Faustregel sollten es mindestens drei, besser aber vier oder mehr sein) des entsprechenden Bereichs aus unterschiedlichen Richtungen zu erstellen, so dass eine erfolgreiche Rekonstruktion gewährleistet wird, entfällt die bei tiefen Verdeckungen notwendige Überprüfungsschleife, was den Mehraufwand im Rahmen hält.

**Computertomographie** Da die Röntgenstrahlung das gesamte Objekt durchdringt und nicht an der aus Sicht der Röntgenquelle ersten Objektoberfläche reflektiert wird, sind auch Selbstverdeckungen für die Erfassung durch einen Computertomographen nicht von Bedeutung. Selbst Objekte mit tiefen Verdeckungen können so ohne jedweden Mehraufwand digitalisiert werden. Verdeckungen können höchstens durch stark absorbierende Materialien verursacht werden, was sich in Artefakten äußert und im nächsten Abschnitt behandelt wird.

Die unterschiedlichen Auswirkungen von Selbstverdeckungen sind in Tabelle 7.7 dargestellt.

## 7.8 Materialabsorption

Während die Dichte des Materials des zu digitalisierenden Objekts für die optischen Verfahren, die nach dem Prinzip der Photogrammetrie oder unter Verwendung eines

Verfahren	Keine	Flach	Tief
Laserscanner	Problemlos	Aufwendig	Problematisch
Stationärer SLS	Problemlos	Aufwendig	Problematisch
Handgeführter SLS	Problemlos	Problemlos	Problematisch
Photogrammetrie	Problemlos	Problemlos	Aufwendig
Computertomographie	Problemlos	Problemlos	Problemlos

Tabelle 7.7: Auswirkungen von flachen und tiefen Selbstverdeckungen auf unterschiedliche Digitalisierungsverfahren

Laserscannern oder eines Streifenlichtscanners arbeiten, nicht von Belang ist, darf ihre Bedeutung für die tomographische Erfassung nicht unterschätzt werden.

Genauer ist jedoch nicht die Materialdichte ausschlaggebend, sondern der Absorptionskoeffizient des Materials [8, S. 7], der angibt, in welchem Ausmaß eintreffende Strahlung durch das Material absorbiert wird. Die nicht absorbierte Strahlung tritt aus dem Objekt aus und wird durch den Detektor erfasst. Die Dichte kann hierbei jedoch zur groben Orientierung dienen, da der Absorptionskoeffizient von Styropor beispielsweise niedriger ist als von Holz oder Ton und dieser wiederum niedriger ist als der Absorptionskoeffizient von Metall.

Dieser Koeffizient ist für die Digitalisierung relevant, da bei einem hohen Anteil an absorbierte Strahlung durch den in [36, S. 389] beschriebenen Effekt der Strahlaufhärtung Artefakte entstehen, wie in den obigen Experimenten beim metallenen Vorhängeschloss zu sehen ist. Aus diesem Grund sind für die Digitalisierung von Materialien mit einem hohen Absorptionskoeffizient sehr leistungsfähige und daher kostenintensive Computertomographen erforderlich. Spätestens an diesem Punkt ist eine Digitalisierung meist nur noch durch die Beauftragung von Messdienstleistern möglich. Sehr große Tomographen stehen jedoch auch hier nur einer Handvoll Unternehmen zur Verfügung, wobei namentlich das Fraunhofer Entwicklungszentrum Röntgentechnik (EZRT) [35] genannt werden soll.

Umgekehrt absorbieren sehr leichte Materialien nur einen sehr geringen Anteil der eintreffenden Strahlung, weshalb der Kontrast zwischen diesem Material und der umgebenden Luft oder eventuell vorhandenen Haltevorrichtungen sehr gering ist. Gegebenenfalls kann es hier schwierig sein, einen geeigneten Schwellwert zu wählen.

Tabelle 7.8 zeigt den Einfluss des Absorptionskoeffizienten auf die unterschiedlichen Digitalisierungsverfahren.

Verfahren	Niedrig	Normal	Hoch
Laserscanner	Problemlos	Problemlos	Problemlos
Stationärer SLS	Problemlos	Problemlos	Problemlos
Handgeführter SLS	Problemlos	Problemlos	Problemlos
Photogrammetrie	Problemlos	Problemlos	Problemlos
Computertomographie	Evtl. probl.	Problemlos	Problematisch

Tabelle 7.8: Eignung der Digitalisierungsverfahren für Materialien mit unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten

# 8 Weitere Kriterien

In den vorherigen Abschnitten wurde ausführlich dargelegt, welchen Einfluss bestimmte Objekteigenschaften, wie beispielsweise die Größe oder die Oberflächenbeschaffenheit, auf den Digitalisierungsprozess mit einer bestimmten Methode haben. Darüber hinaus sind jedoch weitere Kriterien für die Auswahl eines geeigneten Digitalisierungsverfahrens von Bedeutung, welche im Folgenden behandelt werden sollen. Zur Auswahl dieser Kriterien wird die „Nine-Criteria-Table“ aus [47] herangezogen, wobei nicht sämtliche dort aufgelisteten Kriterien betrachtet werden und einige Punkte bereits in obigen Ausführungen behandelt wurden.

## 8.1 Kosten

Neben den oben ausführlich behandelten Möglichkeiten, die eine bestimmte Digitalisierungstechnik bietet, sind auch die damit verbundenen Kosten für viele Anwender relevant. Jedoch weisen die Kosten auch innerhalb eines Digitalisierungsverfahrens starke Unterschiede auf. Aus diesem Grund werden nachfolgend die ungefähren Kosten der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Geräte betrachtet, wobei diese in manchen Fällen auf Schätzungen basieren, da sie aus vielen Einzelkomponenten bestehen oder kein Listenpreis ermittelt werden konnte. Kleinere Posten werden ebenfalls nicht berücksichtigt. Die nachfolgenden Betrachtungen dienen also lediglich zur groben Orientierung.

Für jedes der betrachteten Verfahren ist der Einsatz eines Computers unvermeidlich, sowohl für die Erfassung und Verarbeitung als auch für das anschließende Betrachten des erstellten Modells. Dieser Abschnitt bezieht sich jedoch ausschließlich auf die Computersysteme zur Erfassung und Verarbeitung, wobei die Anforderungen hier oft höher sind als für das reine Betrachten. Bei Computern gibt es deutliche Unterschiede bezüglich der Leistungsfähigkeit, was sich wiederum im Preis niederschlägt. Um die nachfolgende Bewertung im einem übersichtlichen Rahmen zu halten, wird hier nur zwischen folgenden zwei Rechnertypen unterschieden:

1. *Einfache Workstation*: An diesen Rechner werden keine außerordentlich hohen Anforderungen gestellt. Da es große Datenmengen zu verarbeiten gilt, sollte er dennoch gut ausgestattet sein. Als Kosten werden hierfür 1000 € veranschlagt. Referenzkonfiguration:
  - Prozessor: Intel Core i7
  - Arbeitsspeicher: 16 GB / 32 GB
  - Einfache dedizierte Grafikkarte: NVIDIA GeForce

Komponente	Geschätzte Kosten
Laserscanner	3500 €
Rahmen	2500 €
Drehgeber	250 €
Einfache Workstation	1000 €
Summe	7250 €

Tabelle 8.1: Geschätzte Materialkosten für die Digitalisierungs mittels Laserscanner

2. *Leistungsfähige Workstation*: Dieser Computer ist speziell auf intensive Rechenprozesse ausgelegt und daher ausgesprochen leistungsfähig, was sich auch in einem höheren Preis äußert. Hierfür werden 3000 € veranschlagt, wobei nach oben keine Grenzen gesetzt sind. Referenzkonfiguration:

- Prozessor: Intel Core i7 / Intel Xeon
- Arbeitsspeicher: 64 GB / 128 GB
- Hochwertige dedizierte Grafikkarte: NVIDIA GeForce / NVIDIA Quadro

**Laserscanner** Für die Digitalisierungs mittels Laserscanner ist neben dem eigentlichen Scanner und einer einfachen Workstation auch der Rahmen mit der Halterung für den Laserscanner und dem beweglichen Tisch notwendig, der zusätzlich mit einem Drehgeber versehen wird. Bessere Messergebnisse lassen sich voraussichtlich mit einem Lineartisch erreichen, der jedoch preislich wesentlich höher zur Buche schlägt. Die genauen Preise hängen von Verfahrenweg, Qualität und Genauigkeit ab, wobei mit einem Betrag in der Größenordnung von €10000 zu rechnen ist. Die in Tabelle 8.1 dargestellte Auflistung ergibt geschätzte Materialkosten von etwa 7250 € für die Digitalisierung mittels Laserscanner. Insbesondere die Kosten für den Rahmen hängen jedoch massiv von dessen Konstruktion und vom verwendeten Material ab. Der angegebene Wert beinhaltet außerdem keine Personalkosten, die für einen etwaigen Eigenbau zusätzlich kalkuliert werden müssen.

**Stationärer Streifenlichtscanner** Während es sich bei der für die Digitalisierung mittels Laserscanner verwendeten Apparatur größtenteils um einen Eigenbau handelt, können die Komponenten des Streifenlichtscanners fertig eingekauft und eingesetzt werden. Das Grundpaket, welches aus dem Projektor, einer Kamera, einer dazu passenden Halterung, der dazugehörigen Software und der Kalibrierplatte besteht, wurde durch eine zweite Kamera und einen über die Software ansteuerbaren Drehteller erweitert. In Verbindung mit einer einfachen Workstation ergibt dies nach Tabelle 8.2 Gesamtkosten in Höhe von 5700 €.

**Handgeführter Streifenlichtscanner** Neben dem eigentlichen handgeführten Streifenlichtscanner selbst inklusive der dazugehörigen Software sind außer einer leistungsfähigen Workstation keine weiteren Komponenten für die Digitalisierung erforderlich.

Komponente	Geschätzte Kosten
Grundpaket	2800 €
Zweite Kamera	1000 €
Drehteller	900 €
Einfache Workstation	1000 €
Summe	5700 €

Tabelle 8.2: Ungefähre Materialkosten für den verwendeten stationären Streifenlichtscanner

Komponente	Geschätzte Kosten
Streifenlichtscanner	20 000 €
Leistungsfähige Workstation	3000 €
Summe	23 000 €

Tabelle 8.3: Ungefähre Materialkosten für die Digitalisierung durch einen handgeführten Streifenlichtscanner

Hilfreich ist ein manuell zu bedienender Drehteller, welcher jedoch für einen niedrigen zweistelligen Eurobetrag zu erhalten ist und daher hier vernachlässigt wird. Insgesamt ergibt sich dadurch der in Tabelle 8.3 dargestellte Gesamtbetrag von 23 000 € [3].

**Photogrammetrie** Bei der Digitalisierung mittels Photogrammetrie wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Ansätze verfolgt, die nicht zuletzt im Preis Unterschiede aufweisen. Deshalb wird an dieser Stelle zwischen der photogrammetrischen Erfassung im Freien und im Studio unterschieden. Werden die Aufnahmen im Studio durchgeführt, sind Einrichtungen für eine gleichmäßige Beleuchtung notwendig, welche einen relevanten Anteil der Gesamtkosten darstellen. Auch ein Lichtzelt kann gute Dienste leisten. Bei vielen Digitalisierungsvorhaben im Freien sind jedoch weder Lichtzelt noch künstliche Beleuchtung vonnöten, weshalb diese Posten in der entsprechenden Kalkulation entfallen.

Unabhängig vom gewählten Ansatz sind die durchzuführenden Berechnungen sehr aufwendig, weshalb es sich empfiehlt, eine leistungsfähige Workstation zu verwenden. Obwohl die digitale Spiegelreflexkamera das zentrale Gerät dieses Digitalisierungsverfahrens darstellt, haben die durchgeführten Experimente gezeigt, dass auch mit günstigen Modellen gute Ergebnisse erzielt werden können. Jedoch sollte insbesondere bei Aufnahmen ohne Verwendung eines Drehtellers Wert auf ein flexibles und hochwertiges Stativ gelegt werden, um einen zügigen Aufnahmeprozess zu ermöglichen.

Bei der verwendeten Software *Agisoft PhotoScan* sind zwei verschiedene Versionen mit einem deutlichen Preisunterschied verfügbar [7]: Während die *Standard*-Version alle grundlegenden Funktionen beinhaltet, bietet die *Professional*-Version weitere Möglichkeiten, wie beispielsweise die automatische Detektion von *Coded Targets* oder die Verarbeitung von Georeferenzen, und verfügt über weitergehende Funktionen zur Nachbearbeitung des entstandenen Modells. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimente wurden fast ausschließlich Funktionen der *Standard*-Version verwendet,

Komponente	Geschätzte Kosten
Kamera mit Objektiv	750 €
Stativ	100 €
Lichtzelt	100 €
Beleuchtung	2000 €
Leistungsfähige Workstation	3000 €
Software (Variante: <i>Professional</i> -Version)	200 € (3200 €)
Summe	6150 € (9150 €)

Tabelle 8.4: Ungefähre Materialkosten für photogrammetrische Erfassung unter Studiobedingungen

Komponente	Geschätzte Kosten
Kamera mit Objektiv	750 €
Stativ	100 €
Leistungsfähige Workstation	3000 €
Software (Variante: <i>Professional</i> -Version)	200 € (3200 €)
Summe	4050 € (7050 €)

Tabelle 8.5: Ungefähre Materialkosten für photogrammetrische Erfassung im Freien

weshalb diese als Berechnungsgrundlage für die Materialkosten verwendet wird. Allerdings sind auch Anwendungen denkbar, die eine Verwendung der teureren Version mit einem Preis von ungefähr 3200 € unabdingbar machen.

Während Tabelle 8.4 die Materialkosten für die photogrammetrische Digitalisierung im Studio auflistet, zeigt Tabelle 8.5 die ungefähren Ausgaben, die getätigt werden müssen, wenn die Aufnahmen im Freien erstellt werden.

**Computertomographie** Das mit Abstand finanziell aufwendigste der betrachteten Digitalisierungsverfahren ist die Computertomographie. Für die entsprechenden Geräte sind mindestens sechsstelligen Summen zu veranschlagen. Zusätzlich erforderliches Zubehör wie eine leistungsfähige Workstation, die mit den enorm großen Datenmengen (bei großen Tomographen oder sehr hochauflösenden Systemen im einstelligen Terabyte-Bereich pro Objekt) umgehen kann, und entsprechende spezialisierte Software (als prominenter Vertreter soll VGSTUDIO MAX von Volume Graphics [24] genannt werden), bei welcher mit einem mittleren vierstelligen Betrag zu rechnen ist, fallen dabei kaum ins Gewicht, weshalb eine Auflistung der Einzelposten entfällt. Es ist außerdem zu beachten, dass derartige Geräte um des Strahlenschutzes willen nur von speziell dafür geschulten Personen betrieben werden dürfen. Aus diesem Grund sind tomographische Erfassungen meist nur durch die Beauftragung von Dienstleistern möglich, wobei für die Gerätenutzung je nach verwendeter Hardware mit €200 bis €1000 pro Stunde zu rechnen ist. Auch in diesem Fall ist jedoch eine leistungsfähige Workstation erforderlich, um die vom Dienstleister erstellten Daten betrachten und gegebenenfalls bearbeiten zu können, auch wenn die sehr rechenaufwändige Rekonstruktion der Volumendaten aus den Absorptionskarten vom Dienstleister durchgeführt wird.

Digitalisierungsverfahren	Geschätzte Kosten
Laserscanner	Moderat
Stationärer SLS	Moderat
Handgeführter SLS	Hoch
Photogrammetrie (im Studio)	Moderat
Photogrammetrie (im Freiem)	Günstig
Computertomographie	Sehr teuer

Tabelle 8.6: Vergleich der geschätzten Materialkosten für die betrachteten Digitalisierungsverfahren

**Zusammenfassung** Teilt man die soeben geschätzten Materialkosten in die Klassen

- *Günstig*: bis 5000 €
- *Moderat*: 5000 € bis 15 000 €
- *Teuer*: 15 000 € bis 50 000 €
- *Sehr teuer*: ab 50 000 €

auf, so ergibt sich die in Tabelle 8.6 dargestellte Zusammenfassung.

## 8.2 Portabilität der Ausrüstung

Durch die Immobilität vieler Objekte oder durch konservatorische und politische Restriktionen bezüglich des Transports von Objekten ist es in vielen Fällen nicht möglich, das zu digitalisierende Artefakt zur Digitalisierungsstation zu bringen. Stattdessen muss die Digitalisierungsausrüstung zum Objekt transportiert werden, wofür sich einige Methoden jedoch nicht eignen. Außerdem ist in vielen Fällen eine Stromversorgung vor Ort notwendig, welche in Feldeinsätzen nicht notwendigerweise gegeben ist. In diesen Fällen müsste mit Stromaggregaten oder leistungsstarken Batterien Abhilfe geschaffen werden.

**Laserscanner** Obwohl Laserscanner in vielen Fällen für die Vermessung von Gebäuden oder Terrain mobil eingesetzt werden, kann der in dieser Arbeit verwendete Aufbau, der einen Profil-Laserscanner verwendet, nicht ohne weiteres transportiert werden. Ein derartiger Laserscanner muss nämlich in Verbindung mit einem Lineartisch oder, wie in diesem Fall, einem mit einer Messeinrichtung versehenen und manuell verfahrbaren Tisch eingesetzt werden, was die Portabilität enorm einschränkt. Für kleinere Objekte lassen sich unter Umständen portable Lösungen konstruieren.

Da sowohl der Laserscanner als auch der die erfassten Daten verarbeitende Rechner mit Strom versorgt werden müssen, ist eine Stromquelle vor Ort unverzichtbar. Beim Einsatz eines Notebooks verbleibt nur die Versorgung des Laserscanners, was mithilfe leistungsfähiger Batterien möglich sein sollte, da die Stromaufnahme des Scanners überschaubar ist.

**Stationärer Streifenlichtscanner** Alle Komponenten des stationären Streifenlichtscanners können ohne Probleme transportiert werden, wobei eine Rekalibrierung nach dem Transport sinnvoll ist. Da dies ohnehin nach jeder Anpassung des Scanners an die Objektbeschaffenheit notwendig ist, entsteht dadurch jedoch kein Mehraufwand. Bei der Verwendung eines Notebooks ist die Portabilität also gegeben.

Auch in diesem Fall benötigen einige Komponenten eine durchgehende Spannungsversorgung, weshalb eine Stromquelle vor Ort notwendig ist. Aufgrund der moderaten Stromaufnahme sollte auch diese durch leistungsfähige Batterien gewährleistet werden können.

**Handgeführter Streifenlichtscanner** Der verwendete handgeführte Streifenlichtscanner wird in einem Transportkoffer geliefert und kann ohne Probleme transportiert werden. Während des Digitalisierungsvorgangs muss allerdings auch hier ein Rechner zur Verfügung stehen. Beim Einsatz eines Notebooks ist aber auch hier die Portabilität gewährleistet.

Da für den Scanner als Zubehörartikel ein Akku verfügbar ist, der den Scanner laut [4] für bis zu sechs Stunden mit Strom versorgt, ist für den Einsatz keine durchgehende Stromversorgung notwendig, wenn dabei ein akkubetriebener Rechner verwendet wird.

Andere Geräte des gleichen Herstellers (Artec Leo, Preis mit ca. 23 000 € etwas höher) haben einen werksseitig installierten Akku und einen integrierten Rechner, so dass während des Aufnahmevorgangs kein externer Rechner notwendig ist, sondern erst für die Nachverarbeitung, welche nicht vor Ort stattfinden muss [3].

**Photogrammetrie** Photogrammetrie eignet sich mit der im Abschnitt 5.4.1 beschriebenen Methode für die Digitalisierung immobiler Objekte, welche sich auch im Freien befinden können. Allerdings kann in diesem Fall kein Drehteller verwendet werden, was insbesondere im Inneren eine sehr gleichmäßige Ausleuchtung des zu digitalisierenden Objekts notwendig macht. Prinzipiell ist vor Ort lediglich eine Kamera zur Erstellung der Fotos notwendig, welche problemlos transportiert werden kann. Eine Vorschau des resultierenden Modells ist ohne Rechneinsatz jedoch nicht möglich. Digitale Spiegelreflexkameras besitzen außerdem einen integrierten Akku, wodurch diese Herangehensweise keine Stromversorgung vor Ort erfordert.

**Computertomographie** Computertomographen sind große Geräte, welche nicht ohne Weiteres transportiert werden können. Es gibt zwar einige portable Geräte, diese eignen sich allerdings nur für die Digitalisierung sehr kleiner Objekte mit einer Größe im einstelligen Zentimeterbereich. Durch die geringe Größe sind außerdem weniger Maßnahmen zum Strahlenschutz möglich, weshalb hier mit niedrigerer Energie gearbeitet wird, was bei stark absorbierenden Materialien zu Artefakten führt. Aufgrund von Größe oder Material ungeeignete Objekte müssen für die Erfassung unweigerlich zu einem immobilen Computertomographen befördert werden. Auch hier ist für den Betrieb eine Stromversorgung erforderlich.

Digitalisierungsverfahren	Portabel	Unabh. v. Stromversorgung
Laserscanner	Nein	Nein
Stationärer SLS	Ja	Nein
Handgeführter SLS	Ja	Ja
Photogrammetrie	Ja	Ja
Computertomographie	Nein	Nein

Tabelle 8.7: Portabilität der betrachteten Geräte zur Digitalisierung

**Zusammenfassung** In Tabelle 8.7 werden die Ergebnisse dieses Abschnitts bezüglich Portabilität und Stromversorgung zusammengefasst.

## 8.3 Notwendige Fertigkeiten

Keines der in dieser Arbeit betrachteten Geräte ermöglicht die vollautomatische Digitalisierung, da sie stets die manuelle Konfiguration, Steuerung oder Bewegung des Scanners erfordern. Dennoch gibt es Unterschiede bezüglich der dafür notwendigen Fertigkeiten. Um diese Unterschiede bewerten zu können, wird der Prozess der Digitalisierung eines Objekts in folgende drei Phasen unterteilt:

1. *Vorbereitung*: Aufbau, Konfigurierung und Kalibrierung
2. *Erfassung*: Erhebung der Rohdaten
3. *Bearbeitung*: Überführung der Rohdaten in ein finales 3D-Modell

**Laserscanner** Da der verwendete Aufbau für die Digitalisierung mittels Laserscanner ein Eigenbau ist, gibt es keine vom Hersteller bereitgestellten Kalibrierungsverfahren für den Vorschub des beweglichen Tisches. Für die Kalibrierung war deshalb ein technisches Verständnis der verwendeten Komponenten notwendig. Soll für ein großes Digitalisierungsvorhaben eine Anlage für die Digitalisierung mittels Laserscanner eingerichtet werden, empfiehlt sich für technisch nicht versierte Endanwender die Anschaffung eines vollständigen Systems, bei welchem nicht der Eigenbau einzelner Komponenten erforderlich ist. Auch das Finden einer zum Objekt passenden Konfiguration in der Software ist eine anspruchsvolle Aufgabe und erfordert ein gewisses Verständnis für die eingesetzte Technik.

Für die Datenerfassung selbst genügt es, das Objekt geeignet unter dem Scanner zu platzieren, in der Software den Aufnahmevorgang zu starten und das Artefakt anschließend unter dem Scanner hindurch zu bewegen. Hierfür sind keine speziellen Kenntnisse erforderlich.

Die Bearbeitung der erfassten Daten erfordert das Entfernen von Hintergrund und Messfehlern und das Registrieren der entstandenen partiellen Modelle. Diese werden zuletzt in ein finales 3D-Modell des gesamten Objekts überführt. Obwohl diese Vorgänge auch bei anderen Digitalisierungsverfahren durchgeführt werden müssen, bietet die

verwendete Software MeshLab zahlreiche Konfigurationsmöglichkeiten. Die Auswahl geeigneter Werte erfordert auch in diesem Schritt tiefere Kenntnisse über die zu Grunde liegenden Verfahren.

**Stationärer Streifenlichtscanner** Der Erfassung eines Objekts durch den stationären Streifenlichtscanner geht beim betrachteten Modell ein Kalibriervorgang voraus. In dessen Vorfeld werden Position, Ausrichtung und Fokus von Projektor und Kameras an das Objekt angepasst. Außerdem muss die Blende der Kameras derart eingestellt werden, dass die entstehenden Bilder weder unter- noch überbelichtet sind, da andernfalls Artefakte im daraus berechneten Modell verursacht werden können. Passende Werte für die genannten Parameter hängen von den Objekteigenschaften wie beispielsweise der Objektgröße oder der -helligkeit ab. Um die gesamte Objektoberfläche erfassen zu können, sind in der Regel mehrere Aufnahmereihen notwendig. Für jede dieser Aufnahmereihen muss das Objekt geeignet vor dem Scanner platziert werden, um einerseits ein möglichst lückenloses partielles Modell des erfassten Abschnitts zu erhalten, andererseits aber auch, um durch eine ausreichend große Überlappung zwischen diesen Aufnahmereihen die Kombination der einzelnen partiellen Modelle zu ermöglichen. Auch wenn für diesen Vorgang kein technisches Detailwissen von Nöten ist, stellt er eine anspruchsvolle Tätigkeit dar, für die eine gewisse Erfahrung äußerst vorteilhaft ist.

Die Erfassung einer Aufnahmereihe hingegen kann bei der Verwendung eines Drehtellers vollautomatisch erfolgen, weshalb in diesem Schritt kein Fachwissen erforderlich ist. Allerdings muss nach jeder Aufnahmereihe, wie oben beschrieben, das Objekt geeignet replatziert werden.

Die Bearbeitung erfolgt in der proprietären Software, welche nur einen verhältnismäßig geringen Funktionsumfang bietet und daher vergleichsweise einfach zu bedienen ist. Sollte die gebotene Funktionalität jedoch nicht ausreichen, müssen andere Softwarelösungen zum Einsatz kommen, die in der Regel für allgemeinere und komplexere Aufgaben konzipiert wurden und daher anspruchsvoller zu bedienen sind.

**Handgeführter Streifenlichtscanner** Während beim stationären Streifenlichtscanner nach jeder Anpassung von Position, Ausrichtung oder Fokus der Kameras oder des Projektors eine Rekalibrierung notwendig ist, muss der handgeführte Streifenlichtscanner aufgrund der konstanten Position der einzelnen Komponenten relativ zueinander nicht oder nur äußerst selten kalibriert werden. Aufgrund der größeren Flexibilität des handgeführten Scanners ist die exakte Positionierung des zu erfassenden Objekts darüber hinaus nicht von einer derart großen Bedeutung wie bei der stationären Variante.

Allerdings erfordert der Digitalisierungsvorgang an sich eine gewisse Übung, um einerseits den Abstand zwischen Scanner und Objekt innerhalb des zulässigen Messbereichs zu halten, andererseits aber auch, um den Scanner derart zu bewegen, dass der Software das Tracking für die Registrierung der Einzelaufnahmen zueinander gelingt. Durch die Echtzeit-Anzeige der erfassten Daten ist die Vermeidung von Lücken im Modell verhältnismäßig einfach, dennoch ist ein sorgfältiges Vorgehen notwendig, um die Registrierung der partiellen Modelle zu einem vollständigen Gesamtmodell zu ermöglichen.

Auch in diesem Fall erfolgt die Bearbeitung in der proprietären Software des Scanner-Herstellers, wodurch die gebotene Funktionalität exakt auf die Anforderungen zugeschnitten ist und daher vergleichsweise einfach zu bedienen ist. Außerdem bietet die Software eine Autopilot-Funktion, die bei hinreichend guten Rohdaten weitestgehend vollautomatisch ein finales 3D-Modell erstellt. Dies ist jedoch spezifisch für den Hersteller Artec 3D [3] und kann bei Geräten anderer Hersteller, die nach dem gleichen Prinzip arbeiten, anders sein.

**Photogrammetrie** Zu den vorbereitenden Schritten für einen photogrammetrischen Digitalisierungsprozess zählt zunächst die Entscheidung, ob ein Drehteller verwendet werden soll. Abhängig davon muss anschließend die Beleuchtung geeignet eingerichtet und das Objekt passend platziert werden. Zuletzt müssen die Kameraparameter so gewählt werden, dass sich die erstellten Bilder möglichst gut als Eingabe für den Photogrammetrie-Prozess eignen. Hierzu sind grundsätzliche Kenntnisse über die Funktionsweise einer Kamera erforderlich.

Bei der Erstellung der Bilder muss darauf geachtet werden, dass die Überlappung zwischen den Fotos groß genug ist, um ausreichend viele korrespondierende Punkte für die Rekonstruktion der Oberfläche zu erhalten. Außerdem müssen sämtliche Bereiche der Objektoberfläche in einem ausreichenden Maße abgedeckt werden. Da während des Aufnahmevorgangs keine Vorschau verfügbar ist, erfordert dies ein sehr sorgfältiges Vorgehen, weshalb man von der Erfahrung der digitalisierenden Person profitieren kann.

Weisen die erfassten Fotos eine hinreichend hohe Qualität auf, so gestaltet sich die Erzeugung des 3D-Modells in der verwendeten Software sehr einfach. Wird jedoch die Verwendung von Masken, kodierten Markern oder sonstigen Hilfsmitteln erforderlich, so verkompliziert sich die Bearbeitung in manchen Fällen enorm, wodurch auch hier Kenntnis über die Funktionsweise der Photogrammetrie und Erfahrung mit der verwendeten Software unabdingbar wird. In einem Großteil der betrachteten Beispielobjekte war dies jedoch nicht notwendig.

**Computertomographie** Während die bisher behandelten Digitalisierungsverfahren mit sichtbarem Licht arbeiten, verwendet ein Computertomograph wesentlich energiereichere Röntgenstrahlung. Die davon ausgehenden Gefahren machen die intensive Auseinandersetzung mit den notwendigen Maßnahmen zum Strahlenschutz erforderlich. Insbesondere erfordert dies die Bestellung eines Strahlenschutzbeauftragten.

Vor der eigentlichen Digitalisierung müssen einige Parameter geeignet gesetzt werden, was speziell geschultes Personal mit Erfahrung und einem tiefen Verständnis der zugrundeliegenden physikalischen Begebenheiten erfordert. Der Aufnahmevorgang selbst kann dann weitgehend vollautomatisch durchgeführt werden, wobei auch hier aus Gründen des Strahlenschutzes entsprechend ausgebildete Mitarbeiter vor Ort sein müssen.

Der Umgang mit den Volumendaten und die Parametrisierung der Verarbeitungsschritte erfordert auch hier ein gewisses Maß an Erfahrung. Sofern ein Oberflächenmodell erstellt werden soll, muss für die Generierung aus den Volumendaten ein passender Schwellwert für den Absorptionswert gewählt werden.

Digitalisierungsverfahren	Vorbereitung	Erfassung	Bearbeitung
Laserscanner	Hoch	Moderat	Hoch
Stationärer SLS	Moderat	Niedrig	Moderat
Handgeführter SLS	Niedrig	Moderat	Moderat
Photogrammetrie	Moderat	Moderat	Moderat
Computertomographie	Hoch	Hoch	Moderat

Tabelle 8.8: Für die einzelnen Digitalisierungsverfahren erforderliche Kenntnisse und Erfahrungen

**Zusammenfassung** In Tabelle 8.8 werden die Ergebnisse dieses Abschnitts in Form der für die einzelnen Digitalisierungsverfahren und Phasen notwendigen Kenntnisse und Erfahrungen zusammengefasst.

# 9 Zusammenfassung

## 9.1 Informationsgehalt

Aufgrund der unterschiedlichen Funktionsweisen der betrachteten Digitalisierungsverfahren liefern diese teilweise auch unterschiedliche Informationen über das Originalobjekt. So erfassen der Laserscanner und der Computertomograph im Gegensatz zu den übrigen Verfahren nicht die Oberflächentextur. Hingegen liefert nur der Computertomograph Daten über das Innere des Objekts und lässt Rückschlüsse auf unterschiedliche Materialien zu. Auf diese Weise lassen sich Informationen gewinnen, welche auch mit dem menschlichen Auge nicht ohne Weiteres wahrnehmbar sind: Beispielsweise kann so, wie in Abbildung 9.1 dargestellt ist, das Innere einer Mumie untersucht werden [33] [32], ohne diese zu zerstören, was insbesondere für Forschungszwecke von Interesse sein kann. In Tabelle 9.1 sind die Informationen zusammengefasst, die mittels unterschiedlicher Digitalisierungsverfahren gewonnen werden können.

## 9.2 Objekteigenschaften

Ausgehend von den oben gewonnenen Erkenntnissen über den Einfluss bestimmter Objekteigenschaften auf den Digitalisierungsprozess und den damit verbundenen Aufwand, soll in diesem Abschnitt zusammengefasst werden, welche Digitalisierungsverfahren sich am besten für welche Objektklassen eignen.

Zunächst stellt sich die Frage, ob neben der Oberfläche auch das Innere des Objekts erfasst werden muss, was nur mithilfe eines Computertomographen möglich ist. Außerdem ist entscheidend, ob auch die Oberflächentextur erfasst werden muss. Ist dies der Fall, scheiden der Laserscanner und der Computertomograph bereits aus. Es gibt also kein Verfahren, das sowohl das Innere des Objekts als auch die Oberflächentextur erfassen kann. Dies ist nur durch die Kombination zweier Verfahren (*Multimodalität*) möglich. Außerdem ist die Computertomographie das einzige betrachtete Verfahren, das sich zum Digitalisieren transparenter Objekte oder von Oberflächen, welche weder Geometrie- noch Texturmerkmale aufweisen, eignet. Auch für spiegelnde und flache Objekte sowie Gegenstände mit Selbstverdeckungen eignet sich diese Methode am besten, da derartige optische Effekte nicht zum Tragen kommen. Die durch das Objekt verursachten Herausforderungen sind bei Computertomographen grundlegend andere als bei optischen Verfahren. Gegenstände, die sehr groß sind oder sehr viel Strahlung absorbieren, sind beispielsweise nur durch sehr leistungsfähige Computertomographen erfassbar, während umgekehrt die Strahlungsabsorption für optische Herangehensweise keine Rolle spielt.

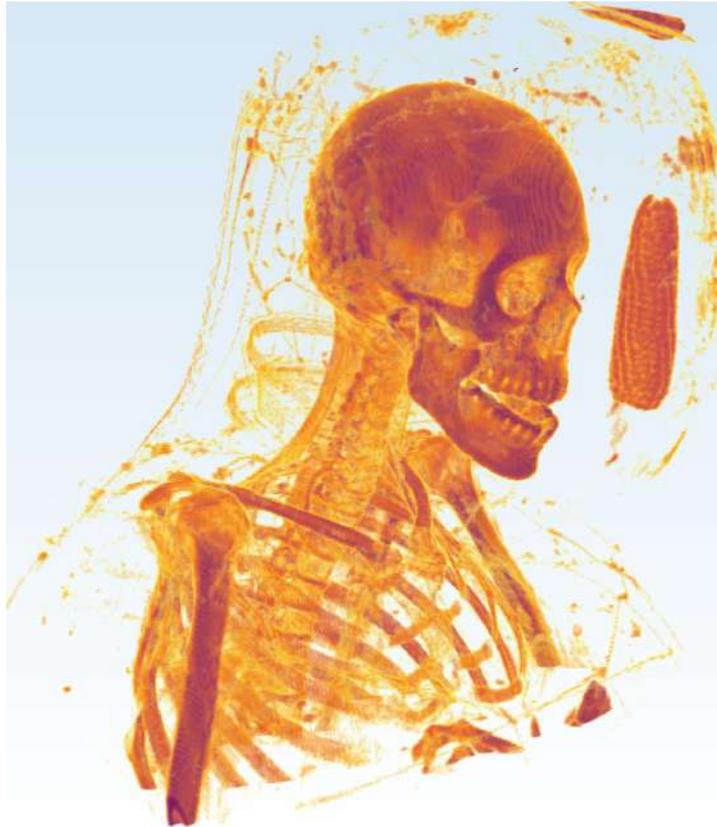


Abbildung 9.1: Darstellung des Inneren einer peruanischen Mumie: Mittels Computertomographie konnte das Innere einer Mumie untersucht werden, ohne die Mumie selbst zu öffnen (Lindennuseum Stuttgart, Daten via Fraunhofer EZRT).

Information	Laserscanner	Stationärer SLS	Handgeführter SLS	Photogrammetrie	Computertomographie
Oberflächenform	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Oberflächentextur	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein
Formung im Inneren	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja
Materialunterscheidung	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja

Tabelle 9.1: Informationen über das Objekt, die durch unterschiedliche Digitalisierungsverfahren gewonnen werden können

Kommt eine tomographische Digitalisierung nicht in Frage, kann einigen dieser Herausforderungen, wie beispielsweise den Selbstverdeckungen, nur durch eine sehr sorgfältige und aufwendige photogrammetrische Erfassung und teilweise auch durch den handgeführten Streifenlichtscanner begegnet werden.

Soll eine Reihe ähnlicher Objekte digitalisiert werden, können mit einem einmalig zu kalibrierenden stationären Streifenlichtscanner halbautomatisch verhältnismäßig schnell gute Ergebnisse erzielt werden. Sind jedoch für verschiedene zu digitalisierende Objekte häufig Anpassungen des Streifenlichtscanners notwendig, die wiederum eine Rekalibrierung erfordern, verliert dieses Verfahren an Effizienz und damit auch einen entscheidenden Vorteil. Der handgeführte Streifenlichtscanner ist der stationären Variante nämlich in vielen Bereichen überlegen und erlaubt durch die große Flexibilität für viele Objektklassen die zügige und qualitativ hochwertige Digitalisierung. Außerdem bietet die mit dem mobilen Streifenlichtscanner vertriebene Software mehr Funktionalität und wirkt robuster. Allerdings schlägt sich dies auch in einem höheren Preis im Gegensatz zur stationären Variante nieder und ist kein dem Verfahren inhärenter Vorteil, sondern durch den Hersteller der Software bedingt.

Auch die Photogrammetrie weist eine hohe Flexibilität auf, die sie insbesondere bei sehr großen Objekten, die mit den übrigen Verfahren nicht oder nur aufwendig digitalisiert werden könnten, oder bei Objekten mit einer detaillierten Textur, die es akkurat und hochaufgelöst zu erfassen gilt, zum Mittel der Wahl machen. Im Gegensatz zum handgeführten Streifenlichtscanner bietet sie während des Aufnahmeprozesses keine Vorschau des entstehenden Modells, erfordert im Gegenzug dazu aber weder Rechner noch Stromversorgung am Ort der Aufnahme, wodurch sie sich auch für Aufnahmen im Freien besonders gut eignet. Dort genügt oft eine einfache Kamera bestenfalls mit Stativ, um anschließend am Rechner ein qualitativ hochwertiges Computermodell zu erstellen. Hierfür ist jedoch eine gewisse Erfahrung notwendig, da eine Wiederholung oder Erweiterung der Aufnahmen meist einen großen Mehraufwand bedeutet. Bei photogrammetrischen Digitalisierungsverfahren unter Studiobedingungen empfiehlt es sich, das Objekt möglichst auf einem in einem Lichtzelt platzierten Drehteller zu positionieren, da dies die gleichmäßige Ausleuchtung vereinfacht und die Erfassung der Aufnahmen beschleunigt. Objekte mit sehr wenigen Oberflächendetails lassen diese Methode aber unter Umständen nicht zu.

Besitzt das Objekt anstatt interessanter Texturdetails eine reliefartige Oberfläche mit geometrischen Merkmalen, können insbesondere mit einem Laserscanner in einem kurzen Messprozess sehr gute Resultate erzielt werden.

Manche kritische Objekteigenschaften lassen sich zur Erleichterung der Digitalisierung adaptieren oder durch Hilfsmittel kompensieren. So kann einer geringen Anzahl von Geometrie- oder Texturdetails damit begegnet werden, dass das zu erfassende Objekt auf einem texturierten Untergrund platziert wird oder mit Markern versehen wird, die anschließend aus dem Computermodell entfernt werden. Auf diese Weise wird das Tracking und Registrieren der Einzelaufnahmen in vielen Fällen enorm erleichtert. Auch spiegelnde oder transparente Oberflächen können geeignet behandelt werden, um eine Digitalisierung mit Methoden zu ermöglichen, die für derartige Oberflächen eigentlich nicht geeignet sind. Aus dem industriellen Umfeld sind sogenannte Matt-Sprays bekannt,

die vor dem Scannen auf die Objektoberfläche aufgetragen werden. Allerdings gilt es hier konservatorische Belange zu berücksichtigen, wie beispielsweise in [54, S. 1] deutlich wird. Dies war einer der Gründe, warum diese Vorgehensweise im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht wurde. Darüber hinaus war es das Ziel, die Digitalisierung bewusst kritischer oder ungeeigneter Objekttypen zu untersuchen.

## 9.3 Ausblick: 3D-Druck als Beispielanwendung

Die in diesem Dokument behandelten Techniken dienen dazu, aus einem in der Realität existierenden Objekt ein virtuelles 3D-Modell zu erstellen. Durch 3D-Drucker, deren Verbreitung in den letzten Jahren massiv zugenommen hat, ist jedoch auch die Umkehrung dieses Prozesses möglich, nämlich die Erzeugung eines realen Objekts anhand eines virtuellen Modells. Dieses virtuelle Modell kann entweder durch einen vorgeschalteten Digitalisierungsprozess gewonnen oder direkt am Rechner erstellt werden, wobei der Kreativität keine Grenzen gesetzt sind. Auch Mischformen, bei welchen ein digitalisiertes Objekt vor dem Druck am Rechner virtuell nachbearbeitet oder modifiziert wird, sind hier möglich.

Durch die große Verbreitung von 3D-Druckern, auch für Privatanwender, können diese Geräte inzwischen für bereits wenige hundert Euro erworben werden, was sie auch für kleinere Museen erschwinglich macht.

### 9.3.1 Funktionsweise

Die auf dem Markt erhältlichen Varianten von 3D-Druckern weisen teilweise deutliche Unterschiede in der Funktionsweise auf. Zwei Klassen von Geräten, mit welchen aus während des Projekts entstandenen 3D-Modellen Ausdrücke erstellt wurden, sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

**Fused filament fabrication (FFF)** Bei dieser Kategorie von Druckern wird ein Kunststofffaden (*Filament*) von einer Spule abgerollt und in einen Druckkopf (*Extruder*) eingezogen, dort geschmolzen und auf ein Druckbett aufgetragen. Dort kühlt das Material ab und härtet aus. Druckkopf und Druckbett lassen sich in alle drei Richtungen relativ zueinander bewegen, wodurch im ersten Schritt eine Materialschicht direkt auf dem Druckbett entsteht, während anschließend weitere Schichten auf die bereits bestehenden Schichten aufgebracht werden. In vielen Fällen ist der Druckkopf in einer horizontalen Ebene beweglich, während die vertikalen Bewegungen zwischen den unterschiedlichen Schichten durch ein Verfahren des Druckbetts vollzogen wird. Nach Abschluss jeder Schicht fährt das Druckbett also um eine Schichtdicke abwärts, so dass nach und nach weitere Schichten auf das nach oben hin wachsende Modell aufgetragen werden können [23].

**Stereolithografie-3D-Drucken** Während beim zuvor erläuterten Ansatz das Material mechanisch an der gewünschten Stelle aufgetragen wird, basiert das Stereolithografie-

Verfahren darauf, dass flüssiges Resinharz durch eine Lichtquelle an den gewünschten Stellen zu festem Kunststoff ausgehärtet wird.

Um eine bessere Vorstellung von der Funktionsweise dieses Verfahrens zu erhalten, wird im Folgenden der Aufbau des verwendeten Geräts kurz beschrieben. Von oben wird eine Build-Plattform in eine Wanne mit flüssigem Resinharz getaucht. Anschließend beleuchtet ein Laserstrahl von unten durch das flüssige Resin die Build-Plattform an den Stellen, an welchen das entstehende Objekt aus Material bestehen soll. Durch das Beleuchten polymerisiert das Harz und haftet an der Build-Plattform, welche anschließend nach oben aus der Resinwanne gehoben wird. Dieser Vorgang wird nun wiederholt, wobei die Beleuchtung an Stellen stattfindet, an welchen bereits in den vorherigen Schritten Harz ausgehärtet wurde, sodass das neu hinzugefügte Harz an diesen Elementen aus vorherigen Schritten haftet. Auf diese Weise entsteht auch hier schichtweise ein vollständiges Modell, hier jedoch auf dem Kopf stehend, da die Build-Plattform von oben in das flüssige Harz getaucht wird [34].

### 9.3.2 Voraussetzungen

Nicht jedes am Computer erstellte 3D-Modell ist direkt für den Druck geeignet. Die wichtigste Voraussetzung für die Druckbarkeit eines Modells ist, dass dieses „mannigfaltig“ ist. Im Wesentlichen bedingt diese Eigenschaft, dass für jeden Punkt im Raum eindeutig entscheidbar ist, ob dieser Punkt innerhalb oder außerhalb des Objekts liegt. Für Details zu dieser Eigenschaft wird auf Abschnitt 3.1 und [12, S. 3] verwiesen. Bei sehr filigranen Strukturen muss außerdem darauf geachtet werden, dass der resultierende Druck eine ausreichende Stabilität aufweist, was nicht zuletzt vom verwendeten Material abhängt.

Da beide oben beschriebenen Verfahren darauf basieren, dass schichtweise Material auf die vorherigen Schichten aufgetragen wird, müssen diese vorherigen Schichten an den entsprechenden Stellen auch Material aufweisen. Andernfalls könnte das neu hinzugefügte Material nirgendwo haften bleiben und würde am Extruder hängen bleiben oder auf die Druckplatte hinabfallen. Um dies in überhängenden Bereichen zu vermeiden, sind sogenannte *Support-Strukturen* erforderlich, die mit Säulen oder dünnen Wänden vergleichbar sind, und überhängenden Bereichen ausreichend Stabilität bieten, um einen Druck zu ermöglichen. Nach dem Drucken werden diese Strukturen entfernt, woraufhin nur das ursprünglich zu druckende Objekt verbleibt [23].

Außerdem ist es in den meisten Fällen nicht notwendig oder sinnvoll, das gesamte Innere von Volumen mit Material zu füllen, da dies ein höheres Gewicht, einen höheren Materialverbrauch und eine deutlich längere Druckdauer zur Folge hätte. Stattdessen wird das Innere meist mit dem Support ähnlichen, aber stabileren und oft wabenartigen Strukturen (*Infill*) gefüllt, die für die nötige Stabilität sorgen [23].

### 9.3.3 Möglichkeiten für Museen

Während 3D-Drucke im industriellen Umfeld für Prototypen und Kleinserien bereits relativ verbreitet sind, bieten sie auch für Museen interessante Möglichkeiten, die von

einigen Häusern teilweise bereits umgesetzt wurden. Die folgende Auflistung soll einen Überblick über einige dieser Möglichkeiten geben, die größtenteils aus [44, S. 3], [15] und [52] entnommen wurden und teilweise mit den eingangs erwähnten Vorteilen der Digitalisierung von kulturellem Erbe übereinstimmen:

1. Erstellung von Repliken, die von Personen betrachtet werden können, die beispielsweise aufgrund körperlicher Einschränkungen nicht in der Lage sind, selbst das Museum zu besuchen
2. Erstellung von Repliken, um dem Besucher ein taktiles Erleben eines Objekts zu ermöglichen, was insbesondere für blinde oder sehbehinderte Menschen den Museumsbesuch enorm aufwertet
3. Erstellung von modifizierten (z. B. vergrößerten) Repliken, um ein ganzes Objekt oder einen Teil davon besser erlebbar zu machen
4. Ermöglichen der digitalen Modifikation eines Objekts durch den Besucher, woraufhin dieses veränderte Objekt gedruckt werden kann
5. Erstellung einer vollständigen Imitation eines Objekts, von dem nur noch Fragmente erhalten sind
6. Erstellung von Repliken, um das Objekt (bzw. Repliken davon) an mehreren Orten parallel ausstellen oder mehreren Personen gleichzeitig das Erforschen des Objekts ermöglichen zu können
7. Ausstellen einer Replik eines sehr empfindlichen Objekts, um dieses vor Beschädigungen zu schützen
8. Nutzen eines 3D-Drucks eines Objekts bei dessen Erforschung, insbesondere in Besprechungen mit mehreren Personen

Als Beispiel für Punkt 7 in obiger Ausführung soll der aztekische „Stein der Sonne“ mit ca. 3,6 m Durchmesser genannt werden, der am Nationalmuseum für Anthropologie in Mexiko-Stadt ausgestellt ist. Einerseits kann dieser aufgrund seiner Größe nur sehr schwer transportiert werden, andererseits darf er aus politischen Gründen das Land ohnehin nicht verlassen. Durch eine dreidimensionale Erfassung des Objekts vor Ort in Mexiko konnte in einer Ausstellung in Deutschland zumindest eine Replik des Steines präsentiert werden.

Allerdings darf nicht außer Acht gelassen werden, dass 3D-gedruckte Repliken von Objekten aus mancher Sicht nicht ganz unproblematisch sind. Es stellen sich Fragen des Urheberrechts und der Authentizität. Die durch 3D-Druck mögliche massenhafte Erzeugung von Repliken kann den Wert des originalen Objekts mindern. Außerdem bestehen 3D-Drucke in der Regel aus einem anderen Material als die Originale, wodurch beim Berühren kein authentisches Gefühl vermittelt werden kann.

### 9.3.4 Beispiele

Auch einige der im Rahmen dieses Projektes erstellten digitalen Modelle wurden zu Testzwecken in einem 3D-Drucker ausgedruckt. So zeigen Abbildungen 9.2a und 9.2b zwei Varianten des Bronzekopfes, die durch einen Drucker, der nach dem FFF-Prinzip arbeitet, erstellt wurden: Das jeweils rechte Objekt entstand aus dem mittels Artec Spider erstellten digitalen Modell, während das jeweils linke Objekt aus einer stark komprimierten Version dieses Modells gewonnen wurde. Hier sind sogar die einzelnen Dreiecke des Oberflächenmodells erkennbar. Insbesondere am Hinterkopf sind die einzelnen Druckschichten deutlich zu erkennen. In Abbildung 9.2c ist eine größere Version desselben Modells zu sehen, die eine höhere Qualität aufweist.

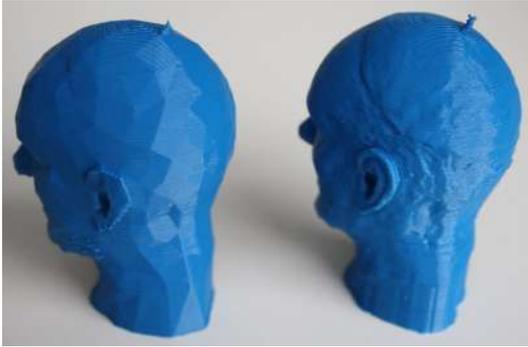
Abbildung 9.3 hingegen zeigt einen Druck der Votivkrone, der nach dem Stereolithografie-Prinzip erzeugt wurde. Hier sind die einzelnen Schichten mit bloßem Auge kaum noch zu erkennen.

Von einem digitalen Modell der Veste Oberhaus in Passau wurden mit beiden vorgestellten Funktionsweisen Ausdrücke erstellt. Abbildung 9.4 zeigt eine Miniatur mit einer Länge von ca. 5 cm, die mit einem Stereolithografie-3D-Drucker erzeugt wurde. Die Säulen am Rand des Modells sind Support-Strukturen, die nach dem Drucken entfernt werden können. Hingegen zeigen die Abbildungen 9.5 und 9.6 einen mit ca. 40 cm Länge deutlich größeren Ausdruck, der mittels FFF-Drucker gewonnen wurde.

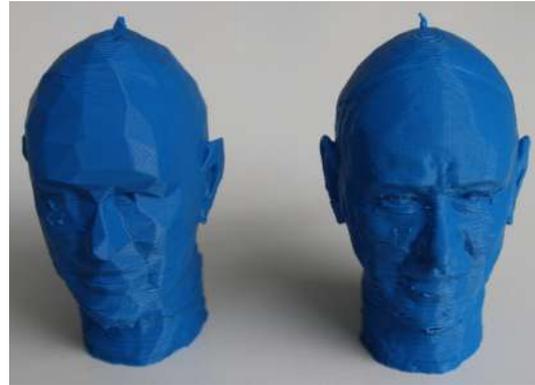
Abbildung 9.7a zeigt diese Version während des Drucks: Die lamellenartigen Wände im unteren Bereich sind die Support-Strukturen, während in der rechten Hälfte bereits das eigentliche Modell erkennbar ist. Darüber sieht man den Extruder, der weiteres Material auf das Modell aufträgt. Eine Draufsicht ist in Abbildung 9.7b zu sehen: Während sich links Support-Strukturen befinden, wurde auf der rechten, tiefer liegenden Seite bereits das Modell gedruckt. In der Mitte wurde das Modell mit einem Standfuß versehen, in dessen Innerem gut das Infill zu erkennen ist, das stabil und trotzdem Material sparend und leicht ist.

## 9.4 Fazit

Die obigen Abschnitte machen deutlich, dass die Wahl des Digitalisierungsverfahrens stark vom gegebenen Anwendungsfall und dem zur Verfügung stehenden Budget abhängt. Die in dieser Arbeit gezogenen Schlüsse beziehen sich auf die Erkenntnisse, die mit den angegebenen Geräten und dem beschriebenen Aufbau ermittelt wurden. Sie sollten nicht unmittelbar und unreflektiert auf andere Geräte, die auf der gleichen Funktionsweise basieren, übertragen werden. Nicht nur bei Computertomographen gibt es enorme Unterschiede bezüglich der verwendeten Hardware und Algorithmik. Dennoch geben sie Auskunft darüber, mit welchen Problemen und Schwierigkeiten man während eines Digitalisierungsvorhabens konfrontiert werden kann. Für einige der entstandenen Herausforderungen wurden Lösungsideen präsentiert, auf die bei Problemen in ähnlichen Situationen aufgebaut werden kann. Eine Zusammenfassung der Abstraktionen der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse ist in Tabelle 9.2 dargestellt. Nicht



(a) Ansicht seitlich von hinten



(b) Ansicht von vorne



(c) Größere Version des Modells

Abbildung 9.2: Mittels FFF-Drucker erzeugte Bronzeköpfe in unterschiedlichen Auflösungen

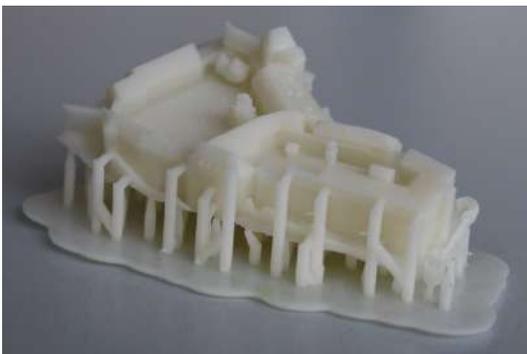


(a) Ansicht von oben

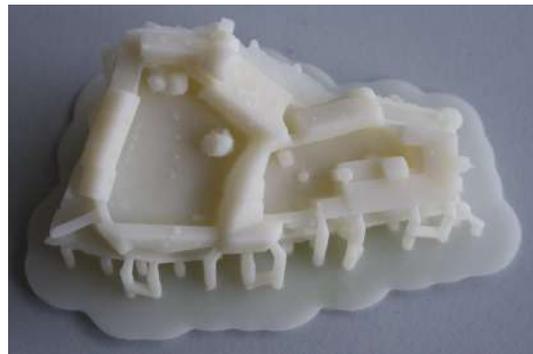


(b) Ansicht von der Seite

Abbildung 9.3: Mittels Stereolithografie-Drucker erzeugter Ausdruck der Votivkrone



(a) Ansicht von der Seite

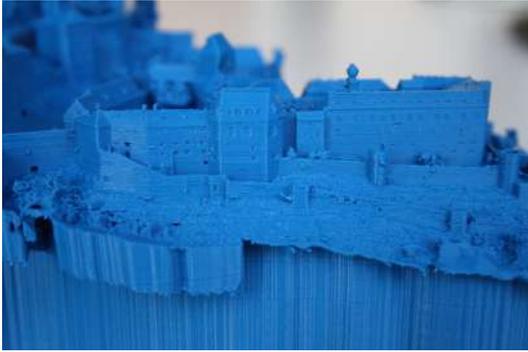


(b) Ansicht von oben

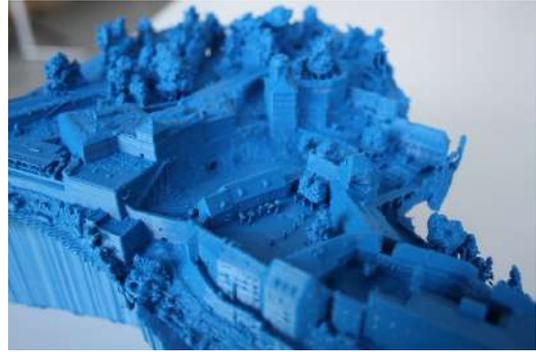
Abbildung 9.4: Mittels Stereolithografie-Drucker erzeugte Miniatur der Veste Oberhaus



Abbildung 9.5: Gesamtansicht eines mittels FFF-Drucker erzeugten Drucks der Veste Oberhaus

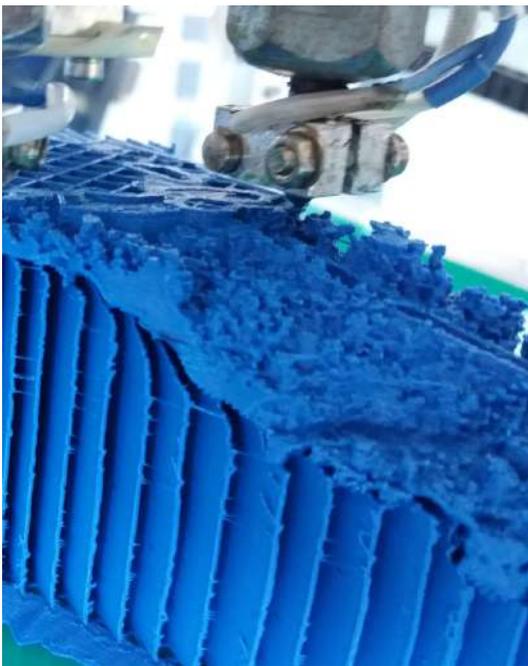


(a) Detailansicht A



(b) Detailansicht B

Abbildung 9.6: Mittels FFF-Drucker erzeugter Druck der Veste Oberhaus



(a) Der Extruder trägt Filament auf



(b) Halbfertiges Modell mit Support- und Infill-Strukturen

Abbildung 9.7: FFF-Drucker während des Druckens der Veste Oberhaus

behandelt wurden konservatorische Aspekte, die insbesondere beim Einsatz von kurzwelligem Licht oder energiereicher Röntgenstrahlung in Kombination mit empfindlichen Materialien, wie beispielsweise Farben auf Bildern, unbedingt beachtet werden müssen, um eine Beschädigung des zu digitalisierenden Objekts zu vermeiden.

Betont werden soll die Notwendigkeit der Betrachtung von Hard- und Software als Ganzes: Die erzeugten Rohdaten unterscheiden sich je nach verwendetem Verfahren und zum Einsatz kommender Hardware. Diese unterschiedlichen Daten erfordern wiederum unterschiedliche Algorithmen, um aus den Rohdaten ein brauchbares 3D-Modell zu erzeugen. Für Endanwender ohne tiefgehendes Fachwissen am besten geeignet sind deshalb Systeme, die als Gesamtpaket bestehend aus Hard- und dazugehöriger Software angeboten werden, wie es bei den beiden eingesetzten Streifenlichtscannern der Fall war. Nichtsdestotrotz ist die Digitalisierung in vielen Fällen anspruchsvoll und erfordert entsprechend geschultes und erfahrenes Personal. Für hochwertige 3D-Modelle ist außerdem in vielen Fällen eine manuelle Nachbearbeitung unumgänglich, insbesondere wenn ungünstige Objekteigenschaften zu Artefakten in Geometrie oder Textur des 3D-Modells geführt haben. Auch diese Nachbearbeitung erfordert entsprechende Fähigkeiten und Ausstattung. Aus diesen Gründen kann es insbesondere für kleinere Museen oder kleine Digitalisierungsprojekte, bei welchen sich die erforderlichen Anschaffungen und Schulungen nicht amortisieren würden, oftmals sinnvoll sein, die Digitalisierung durch einen Dienstleister durchführen zu lassen.

Eigenschaft	Wert	Laserscanner	Stationärer SLS	Handgeführter SLS	Photogrammetrie	CT
Objektgröße	Klein	Verringerte Qualität	Verringerte Qualität	Problemlos	Problemlos	Problemlos
	Mittel	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos
	Groß	Aufwendig	Aufwendig	Aufwendig	Problemlos	Problematisch
Oberflächenhelligkeit	Dunkel	Problemlos	Problematisch	Problemlos	Problemlos	Problemlos
	Hell	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos
Oberflächenmerkmale	Geometrie: nein, Textur: nein	Problematisch	Problematisch	Problematisch	Problematisch	Problemlos
	Geometrie: nein, Textur: ja	Problematisch	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos
	Geometrie: ja, Textur: nein	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Evtl. probl.	Problemlos
Transparenz	Geometrie: ja, Textur: ja	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos
	Transparent	Problematisch	Problematisch	Problematisch	Problematisch	Problemlos
Reflexionen	Intransparent	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos
	Matt	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos
Flachheit	Spiegelnd	Problematisch	Problematisch	Verringerte Qualität	Problemlos	Problemlos
	Flach	Problematisch	Problematisch	Verringerte Qualität	Aufwendig	Problemlos
Selbstverdeckungen	Gleichförmig	Evtl. aufwendig	Evtl. aufwendig	Problemlos	Problemlos	Problemlos
	Keine	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos
	Flach	Aufwendig	Aufwendig	Problemlos	Problemlos	Problemlos
Materialabsorption	Tief	Problematisch	Problematisch	Problematisch	Aufwendig	Problemlos
	Niedrig	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Evtl. probl.
	Normal	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos
Hoch	Hoch	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problemlos	Problematisch
	Im Freien	-	Moderat	Hoch	Niedrig	-
Kosten	Im Studio / Labor	Moderat	Moderat	Hoch	Moderat	Sehr hoch
	Portabel	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein
Notwendige Fertigkeiten	Unabh. v. Stromversorgung	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein
	Vorbereitung	Hoch	Moderat	Niedrig	Moderat	Hoch
	Erfassung	Moderat	Niedrig	Moderat	Moderat	Niedrig
Informationsgewinnung	Nachbearbeitung	Hoch	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat
	Oberflächenform	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	Oberflächentextur	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein
	Formung im Inneren	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja
Materialunterscheidung	Materialunterscheidung	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja

Tabelle 9.2: Zusammenfassung der Abstraktionen der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse

# Literatur

- [1] Artec 3D. *Artec Spider - Professional handheld 3D scanner*. URL: [https://artecgroup.zendesk.com/hc/en-us/article\\_attachments/203469859/Artec\\_Spider.pdf](https://artecgroup.zendesk.com/hc/en-us/article_attachments/203469859/Artec_Spider.pdf) (besucht am 12.11.2018).
- [2] Artec 3D. *Die beste 3D-Scanningsoftware*. URL: <https://www.artec3d.com/de/3d-software/artec-studio> (besucht am 12.11.2018).
- [3] Artec 3D. *Professional 3D Scanners*. URL: <https://www.artec3d.com/> (besucht am 12.11.2018).
- [4] Artec 3D. *Professional 3D scanning solutions*. URL: <https://www.artec3d.com/files/pdf/ArtecScanners-Booklet-EURO.pdf> (besucht am 12.11.2018).
- [5] Artec 3D. *Tragbare 3D-Scanner*. URL: <https://www.artec3d.com/de/portable-3d-scanners> (besucht am 13.11.2018).
- [6] *3D-View: Interaktive 3D-Visualisierungssoftware*. Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG. URL: [https://www.micro-epsilon.de/2D\\_3D/laser-scanner/Software/scanCONTROL-3D-View/](https://www.micro-epsilon.de/2D_3D/laser-scanner/Software/scanCONTROL-3D-View/) (besucht am 06.11.2018).
- [7] Agisoft. *Agisoft PhotoScan*. URL: <http://www.agisoft.com/> (besucht am 13.11.2018).
- [8] Hatem Alkadhi u. a. *Wie funktioniert CT?* Bd. 133. Springer, 2011.
- [9] National Electrical Manufacturers Association. *DICOM Standard*. URL: <https://www.dicomstandard.org/> (besucht am 23.10.2019).
- [10] David Barber und Jon Mills. *3D laser scanning for heritage: Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture*. English Heritage, 2007.
- [11] Wolfgang Boehler und Andreas Marbs. „3D scanning instruments“. In: *Proceedings of the CIPA WG 6* (2002), S. 9–18.
- [12] Mario Botsch u. a. *Polygon mesh processing*. AK Peters/CRC Press, 2010.
- [13] Paul Bourke. *PLY - Polygon File Format*. URL: <http://paulbourke.net/dataformats/ply/> (besucht am 23.10.2019).
- [14] Max Brunner, Hrsg. *Kat. Ausst. Faszination Mittelalter – Irdisches Leben*. Regensburg, 2008.
- [15] Charlotte Coates. *How are some of the world's best known Museums doing amazing things with 3D Printing?* 2019. URL: <https://www.museumnext.com/article/how-museums-are-using-3d-printing/> (besucht am 24.09.2019).

- [16] *Configuration Tools: Einfaches Einstellen der scanCONTROL Laserscanner*. Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG. URL: [https://www.micro-epsilon.de/2D\\_3D/laser-scanner/Software/scanCONTROL-Configuration-Tools/](https://www.micro-epsilon.de/2D_3D/laser-scanner/Software/scanCONTROL-Configuration-Tools/) (besucht am 06.11.2018).
- [17] Library of Congress. *Polygon File Format (PLY) family*. URL: <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000501.shtml> (besucht am 23.10.2019).
- [18] Ennex Corporation. *The StL Format*. URL: [http://www.fabbers.com/tech/STL\\_Format](http://www.fabbers.com/tech/STL_Format) (besucht am 22.10.2019).
- [19] Leonardo De Chiffre u. a. „Industrial applications of computed tomography“. In: *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 63.2 (2014), S. 655–677.
- [20] Quanhong Feng. *Practical application of 3D laser scanning techniques to underground projects*. 2012. URL: [http://www.befoonline.org/UserFiles/Archive/250/Rapport\\_\\_114\\_NY\\_G5.pdf](http://www.befoonline.org/UserFiles/Archive/250/Rapport__114_NY_G5.pdf) (besucht am 19.02.2018).
- [21] Juergen Fornaro u. a. „Dual-and multi-energy CT: approach to functional imaging“. In: *Insights into imaging* 2.2 (2011), S. 149–159.
- [22] Jason Geng. „Structured-light 3D surface imaging: a tutorial“. In: *Advances in Optics and Photonics* 3.2 (2011), S. 128–160.
- [23] 3Faktur GmbH. *Filament 3D-Druck (FDM/FFF): Das Verfahren*. URL: <https://3faktur.com/3d-druck-materialien-und-verfahren/filament-3d-druck-fdm-fff-verfahren/> (besucht am 23.09.2019).
- [24] Volume Graphics GmbH. *VGSTUDIO MAX*. URL: <http://www.volumegraphics.com/en/products/vgstudio-max.html> (besucht am 22.10.2019).
- [25] Rafael C Gonzalez und Richard E Woods. *Digital Image Processing*. 2. Aufl. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2002.
- [26] Petra Gruber. „Höfische Dame in Scherenstuhl“. In: *Kat. Ausst. Ritterburg und Fürstenschloss* (1998). Hrsg. von Herbert W. Wurster, Werner Endres und Jörg-Peter Niemeier. Bd. I.
- [27] Petra Gruber. „Zwei Scheibenleuchter“. In: *Kat. Ausst. Faszination Mittelalter – Irdisches Leben* (2008). Hrsg. von Max Brunner.
- [28] Ekbert Hering und Gert Schönfelder. *Sensoren in Wissenschaft und Technik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [29] Joachim Hertzberg, Kai Lingemann und Andreas Nüchter. *Mobile Roboter: Eine Einführung aus Sicht der Informatik*. Springer-Verlag, 2012.
- [30] *HP 3D Structured Light Scanner Pro S3 Datasheet*. HP Development Company, L.P. Juni 2017. URL: <http://www8.hp.com/h20195/v2/GetDocument.aspx?docname=4AA6-9360ENW> (besucht am 07.11.2018).

- [31] L.P. HP Development Company. *HP 3D Scan*. URL: [https://www8.hp.com/us/en/campaign/3Dscanner/overview.html?jumpid=va\\_t1345uf8k6#products](https://www8.hp.com/us/en/campaign/3Dscanner/overview.html?jumpid=va_t1345uf8k6#products) (besucht am 07.11.2018).
- [32] Fraunhofer IIS. *Big Picture: 3D-Röntgencomputertomographie einer peruanischen Mumie*. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=00fe9V\\_mFAk](https://www.youtube.com/watch?v=00fe9V_mFAk) (besucht am 22.10.2019).
- [33] Fraunhofer IIS. *Big Picture: 3D-Röntgencomputertomographie einer peruanischen Mumie*. 2019. URL: [https://www.iis.fraunhofer.de/de/pr/2019/20190603\\_EZRT\\_Big\\_Picture.html](https://www.iis.fraunhofer.de/de/pr/2019/20190603_EZRT_Big_Picture.html) (besucht am 22.10.2019).
- [34] Formlabs Inc. *The Ultimative Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing*. URL: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/> (besucht am 18.09.2019).
- [35] Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS. *Entwicklungszentrum Röntgentechnik*. URL: <https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/zfp.html> (besucht am 21.10.2019).
- [36] Richard A Ketcham und William D Carlson. „Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences“. In: *Computers & Geosciences* 27.4 (2001), S. 381–400.
- [37] Aless Lasaruk. „Approximate regularization for structural optical flow estimation“. In: *International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*. Springer. 2012, S. 336–348.
- [38] Wilfried Linder. *Digital photogrammetry. A Practical Course*. 4. Aufl. Springer, 2016.
- [39] Werth Messtechnik. *Industrielle Computertomographie (CT) von Werth Messtechnik*. URL: <https://www.werth.de/de/unsere-angebote/produkte-nach-kategorie/koordinatenmessgeraete-fuer/ct-anwendungen.html> (besucht am 13.11.2018).
- [40] Birgit Möller. „Multi-Mosaikbilder. Ein Ansatz zur ikonischen Repräsentation von Bilddaten aktiver Kameras“. Diss. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2005.
- [41] Darryl Motley. *How Structured-Light 3D Scanners Work (With Video Demonstrations)*. 2017. URL: <https://gomeasure3d.com/blog/how-structured-light-3d-scanners-work-video/> (besucht am 09.04.2018).
- [42] Frank Natterer. *The mathematics of computerized tomography*. Bd. 32. Siam, 1986.
- [43] Frank Natterer und Frank Wübbeling. *Mathematical methods in image reconstruction*. Bd. 5. Siam, 2001.
- [44] Moritz Neumüller u. a. „3D printing for cultural heritage: Preservation, accessibility, research and education“. In: *3D Research Challenges in Cultural Heritage*. Springer, 2014, S. 119–134.

- [45] Julien Noel u. a. „Advantages of CT in 3D scanning of industrial parts“. In: *3D Scanning Technologies Magazine* 1.3 (2008), S. 18–23.
- [46] *Online-Datenblatt Drehgeber WDGI 58B*. Wachendorff Automation GmbH & Co. KG. Nov. 2018. URL: [https://www.wachendorff-automation.de/drehgeber-vollwelle-inkremental-optisch-klemmflansch-wdgi58b/?tx\\_pimproducts\\_pi1%5Btech\\_paper%5D=1](https://www.wachendorff-automation.de/drehgeber-vollwelle-inkremental-optisch-klemmflansch-wdgi58b/?tx_pimproducts_pi1%5Btech_paper%5D=1) (besucht am 06.11.2018).
- [47] George Pavlidis u. a. „Methods for 3D digitization of cultural heritage“. In: *Journal of cultural heritage* 8.1 (2007), S. 93–98.
- [48] Massimiliano Pieraccini, Gabriele Guidi und Carlo Atzeni. „3D digitizing of cultural heritage“. In: *Journal of Cultural Heritage* 2.1 (2001), S. 63–70.
- [49] Edith Rabenstein. „Die früheren Passauer waren ‚rechte Grobiane‘“. In: *Passauer Neue Presse* (Feb. 2013). URL: <http://www.ostbairische-heimatforschung.de/2013/02/08/die-frueheren-passauer-waren-rechte-grobiane/>.
- [50] Martin Reddy. *Object Files*. URL: <http://www.martinreddy.net/> (besucht am 23.10.2019).
- [51] Joaquim Salvi, Jordi Pages und Joan Batlle. „Pattern codification strategies in structured light systems“. In: *Pattern recognition* 37.4 (2004), S. 827–849.
- [52] Myrsini Samaroudi und Karina Rodriguez Echavarria. *3D printing is quietly transforming an unexpected industry: museums*. 2019. URL: <https://www.fastcompany.com/90328532/3d-printing-is-quietly-transforming-an-unexpected-industry-museums> (besucht am 24.09.2019).
- [53] *scanCONTROL 2D/3D Laser-Scanner*. Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG. URL: <https://www.micro-epsilon.de/download/products/cat-scancontrol/dax--scanCONTROL-26x0--de.html> (besucht am 06.11.2018).
- [54] Christian Siebenhaar und Ines Thon. „Das Ende der Kreidezeit“. In: *JOT Journal für Oberflächentechnik* 57.3 (2017), S. 72–74.
- [55] Steven W. Smith u. a. „The scientist and engineer’s guide to digital signal processing“. In: (1997).
- [56] Universität Stuttgart. *Tiefenscannende Streifenprojektion (DSFP) mit 3D-Kalibrierung*. 2014. URL: <http://www.ito.uni-stuttgart.de/forschung/3do/projekte/abgeschlossen/dsfp.en.html> (besucht am 09.04.2018).
- [57] Istituto di Scienza e Tecnologie dell’Informazione. *MeshLab*. URL: <http://www.meshlab.net/> (besucht am 06.11.2018).
- [58] *VRML 2.0 Specification*. URL: [http://www.graphics.stanford.edu/courses/cs248-98-fall/Assignments/Assignment3/VRML2\\_Specification/spec/index.html](http://www.graphics.stanford.edu/courses/cs248-98-fall/Assignments/Assignment3/VRML2_Specification/spec/index.html) (besucht am 23.10.2019).
- [59] Thomas Weber. „Schnelle Rekonstruktionskernberechnung in der 3D-Computertomographie“. Diss. 2009.

- [60] Herbert W. Wurster, Hrsg. *Kat. Ausst. Weißes Gold. Passau, vom Reichtum einer europäischen Stadt*. Passau, 1995.
- [61] Herbert W. Wurster, Werner Endres und Jörg-Peter Niemeier, Hrsg. *Kat. Ausst. Ritterburg und Fürstenschloss*. Bd. II. Regensburg, 1998.
- [62] Herbert W. Wurster, Werner Endres und Jörg-Peter Niemeier, Hrsg. *Kat. Ausst. Ritterburg und Fürstenschloss*. Bd. I. Regensburg, 1998.
- [63] Gengsheng Lawrence Zeng. „Image reconstruction—a tutorial“. In: *Computerized medical imaging and graphics* 25.2 (2001), S. 97–103.