

3D-Digitalisierung im Museum

Erläuterungen zu Scanverfahren und deren Anwendung im musealen Bereich -

Erfahrungsberichte

Work In Progress



ChangeLog

Datum	Version	Autor	Anmerkung
30.09.2020	1.0	Claus Henkensiefken, Deutsches Museum	
21.02.2022	2.0	Claus Henkensiefken, Deutsches Museum	Überarbeitung bisheriger Inhalte, Ergänzung um weitere Beispiele

Inhaltsübersicht

ChangeLog.....	2
Inhaltsübersicht	3
Einleitung	6
1. 3D-Scanverfahren - Übersicht.....	7
1.1. LIDAR.....	7
1.1.1. Laufzeitmessung (Time of Flight)	9
1.1.2. Phasenverschiebung	10
1.1.3. Flash-LIDAR-Kameras	10
1.2. Triangulation	11
1.2.1. Laser-Triangulation	12
1.2.2. Structured Light	13
1.2.3. Photogrammetrie.....	13
1.3. Computertomographie (CT).....	15
1.3.1. Aufnahmesysteme	16
1.3.2. Messergebnis	17
1.3.3. Rekonstruktion.....	17
1.3.4. Visualisierung	17
1.4. Weitere Information	18
2. 3D-Scanner – Auswahlkriterien und Limitationen	20
2.1. Auflösung	20
2.2. Genauigkeit	20
2.3. Geschwindigkeit.....	20
2.4. Arbeitsbereich.....	20
2.5. Farbwiedergabe	21
2.6. Mobilität – Anwendungsart	21
2.7. Grenzen der Anwendung	25
2.7.1. Reflexionen an Oberflächen.....	25
2.7.2. Abgeschattete Bereiche	28
2.7.3. Dunkle Oberflächen	29
2.7.4. Transparente Oberflächen	29
2.7.5. Einsatz von Mattierungssprays	29
2.8. Weitere Informationen	30
3. Durchführung von 3D-Scans	31
3.1. Beispiel: Automatenfigur Predigender Mönch – Verdeckte Flächen	31
3.1.1. Artec Space Spider (Streifenlicht handgeführt)	32

3.1.2.	Zeiss RealScan (Streifenlicht stationär).....	35
3.1.3.	Photogrammetrie.....	37
3.1.4.	Abschließender Vergleich der Methoden.....	39
3.2.	Beispiel: Spiegelsextant von Brander & Höschel – glänzende Oberflächen.....	40
3.2.1.	Artec Space Spider.....	40
3.2.2.	Zeiss RealScan.....	41
3.2.3.	Vergleich der Ergebnisse.....	42
3.3.	Beispiel: Dampfturbine – Photogrammetrie oder Streifenlicht?.....	43
3.3.1.	Streifenlicht-Scan mit dem Artec Leo.....	43
3.3.2.	Ergebnis in Artec Studio.....	44
3.3.3.	Photogrammetrischer Ansatz.....	44
3.3.4.	Ergebnisvergleich und Fazit.....	45
3.4.	Beispiel: Luftfahrthalle – LIDAR-Scan einer Ausstellungshalle.....	48
3.4.1.	Durchführung der Aufnahme.....	48
3.4.2.	Nachbearbeitung.....	49
3.4.3.	Ergebnis.....	49
3.5.	Beispiel: Beleuchtungswagen – Kombination LIDAR-Scan mit Photogrammetrie.....	51
3.5.1.	Durchführung.....	52
3.5.2.	Datenaufbereitung.....	53
3.5.3.	Ergebnis.....	53
4.	Nachbearbeitung der Scanergebnisse in externen Programmen.....	56
4.1.	Mögliche Anwendungsfälle.....	56
4.1.1.	Retopologisierung.....	56
4.1.2.	Remodellierung / Rekonstruktion.....	56
4.1.3.	Texturierung.....	58
4.1.4.	Animation.....	58
4.1.5.	Exportoptionen.....	58
4.2.	Softwareauswahl.....	58
4.3.	Beispiel: Holzschleifapparat von F. G. Keller – Scan und Nachbearbeitung.....	61
4.3.1.	Durchführung des Scans.....	62
4.3.2.	Ergebnis nach Scan.....	63
4.3.3.	Retopologisierung und Texturierung.....	63
4.3.4.	Zusammenbau, Animation und Export.....	65
5.	Anwendungsmöglichkeiten für 3D-Digitalisierung.....	67
5.1.	Beispiel: Dioramenhintergründe – Digitale Dokumentation für einen Nachbau.....	67
5.1.1.	Hintergrund.....	67

5.1.2.	Testablauf (Herbst 2020)	67
5.1.3.	Fazit	69
5.1.4.	Update 2021.....	70
5.2.	Beispiel: Harfenkopf – Scan für 3D-Druck.....	71
5.2.1.	Hintergrund.....	71
5.2.2.	Durchführung Teil 1: Scan des gesamten Harfenkopfes (Sommer 2020).....	71
5.2.3.	Zwischenfazit.....	72
5.2.4.	Durchführung Teil 2: Scan einer originalen Ornament-Gussform (Sommer 2021)	73
5.2.5.	Fazit	74
5.3.	Beispiel: Schiffsbrücke – Echtzeitvisualisierung (als Punktwolke oder Polygonoberflächen?) 76	
5.3.1.	Durchführung der 3D-Scans	76
5.3.2.	Datenaufbereitung.....	77
5.3.3.	Ergebnis.....	77
5.3.4.	Photogrammetrie als Alternative.....	78
5.3.5.	Ausblick	79
5.4.	Beispiel: Büsten im Ehrensaal – Nutzung für diverse Projekte.....	80
5.4.1.	Anwendung in einer Web-3D-Szene	80
5.4.2.	Verwendung in einer Kunstinstallation.....	81
5.5.	Beispiel: Diorama Töpferwerkstatt – Augmentierung mit animierten Scanobjekten	83
5.5.1.	Durchführung	83
5.5.2.	Ergebnis.....	84
6.	Abbildungsverzeichnis	85

Einleitung

Die 3D-Digitalisierung nimmt einen immer höheren Stellenwert ein, auch im musealen Bereich, sei es aus Gründen der Bereitstellung von 3D-Daten für die Forschung, an Medienstationen in der Ausstellung, oder für die Präsentation im Internet. Die Masse an potentiellen Objekten für die Digitalisierung macht es für viele Museen sinnvoll, intern Kapazitäten für eine Umsetzung dieser Maßnahmen aufzubauen.

Der vorliegende Text soll einen kurzen Überblick geben, welche Möglichkeiten sich ergeben, aber auch, welcher Aufwand betrieben werden muss. Er gibt zunächst einen Überblick über allgemeine 3D-Scanverfahren, die im musealen Kontext zum Einsatz kommen und gibt Entscheidungshilfen für die Auswahl passender Systeme, abhängig vom Anwendungsszenario. Es werden die Herausforderungen beschrieben, die abhängig vom zu erfassenden Objekt auftreten können und sich im Wesentlichen mit dessen Größe, Form und Materialität befassen.

Die Beschreibungen gehen über den eigentlichen Scanvorgang hinaus und behandeln die Möglichkeiten der Aufbereitung von Scandaten für bestimmte Anwendungsszenarien und schließen ab mit Beispielen, wie sich die 3D-Digitalisierung einsetzen lässt, für Präsentationen in der Ausstellung oder im Internet, aber auch um intern die Arbeit der Museums-Werkstätten zu unterstützen.

Es ist geplant, diesen Text stetig um weitere Aspekte der 3D-Digitalisierung zu erweitern, sobald sie in der täglichen Arbeit in diesem Bereich auftreten. Somit ist dieser Bericht als ständiger Work In Progress anzusehen.

1. 3D-Scanverfahren - Übersicht

3D-Scanner unterscheiden sich in der verwendeten Technologie und ihrer Bauart, woraus sich Unterschiede bei Auflösung, Geschwindigkeit, Anwendung und Preis ergeben. Jede Technologie hat dabei Ihre Vor- und Nachteile, wodurch sich unterschiedliche Einsatzszenarien ergeben, meist bezogen auf die Größe und Form der Objekte, ihre Oberflächenbeschaffenheit und die Umgebungsbedingungen, bei denen der Scan durchgeführt wird. Den einen optimalen Scanner für Alles gibt es nicht.

Unterteilt man nach dem zugrundeliegenden technischen Verfahren, dann lassen sich 3D-Scanner folgendermaßen kategorisieren:

Kontaktbasierte 3D-Scanner

Ein Messkopf, befestigt an einem mechanischen Arm mit mehreren Gelenken, oder fahrbar auf Schienen entlang der X-, Y- und Z-Achse, wird über das Objekt geführt, welches gegenüber dem Messsystem fixiert ist.

Sensoren in der mechanischen Führung erlauben eine sehr exakte Aufnahme der Messpunkte. Deshalb wird diese Art Scanner häufig in der industriellen Fertigung zur Qualitätssicherung eingesetzt.

Nachteil dieses Verfahrens ist, dass das zu scannende Objekt durch den physischen Kontakt beschädigt werden kann. Zudem ist der Scanvorgang sehr langsam. Die schnellsten dieser kontaktbasierten CMMs (Coordinate Measuring Machine) erreichen nur ein paar hundert Messpunkte pro Sekunde. Für unsere weiteren Betrachtungen wird diese Scanner-Kategorie nicht weiter berücksichtigt.

Kontaktlose 3D-Scanner

Kontaktlose Scanner nutzen vom Objekt reflektiertes Licht oder andere Wellenformen um den Abstand einzelner Punkte auf dem Objekt zum Scanner zu berechnen. Es gibt hier sehr unterschiedliche Systeme, die im Wesentlichen auf drei Ansätzen basieren:

- LIDAR
- Triangulation
- Computertomographie

1.1. LIDAR

Der Begriff LIDAR steht als Abkürzung für „**L**ight **d**etection and **r**anging“. Hierbei wird direkt der Abstand vom Messgerät zum Messpunkt ermittelt. Dies geschieht entweder durch die Laufzeitmessung eines Lichtimpulses oder über die Messung der Phasenverschiebung von Lichtwellen. Als Lichtquelle werden Laser eingesetzt. Daher werden diese Geräte häufig auch Laserscanner genannt, obwohl Laserlicht unter anderem auch bei der Triangulation eingesetzt wird.

LIDAR-Scanner werden überwiegend in der Landvermessung, bei Bauvorhaben und beim autonomen Fahren eingesetzt, kommen jedoch auch in der Forensik und bei der Erfassung von Kulturgütern, insbesondere in der Archäologie zum Einsatz, wo es um das 3D-Scannen von Räumlichkeiten und großen Objekten geht.

Die in diesen Fällen zumeist eingesetzten Scanner erstellen während eines Messvorgang eine 3D-Punktwolke aus mehreren Millionen Messpunkten. Es wird immer nur ein Punkt pro Zeitintervall erfasst. Um eine Fläche zu erfassen, wird der Strahl rasterförmig darüber geführt. Hierfür wird ein Laserstrahl über einen um seine horizontale Achse rotierenden Spiegel abgelenkt. Gleichzeitig dreht sich der gesamte Scanner um seine vertikale Achse. Laserscanner können auf diese Weise mehrere hunderttausend Punkte pro Sekunde erfassen.

Das Ergebnis einer Aufnahme ist eine Punktwolke, die aus der Sicht des Aufnahmepunktes ein geschlossenes 360° Panorama ergibt. Baubedingt bleibt unter dem Gerät ein blinder Fleck, der nicht erfasst werden kann. Dieser Bereich wird meist vom Stativ eingenommen.

Darstellbar sind die Punkte als Graustufenbild, gemäß der Intensität der zurückkommenden Lichtstrahlen oder entsprechend ihrer Entfernung zum Scanner. Einige Geräte bieten die Möglichkeit zusätzlicher Farbaufnahmen, mit deren Hilfe die Punktwolke in der Daten-Nachbereitung eingefärbt werden kann.

Erst in der 3D-Ansicht wird die räumliche Anordnung der Punkte sichtbar, wenn der Blickpunkt vom Zentrum der Aufnahme verschoben wird. Hier werden die Lücken in der gesamten Szene sichtbar, die sich durch die Verschattungen der Objekte ergeben und durch weitere Scanpositionen teilweise gefüllt werden können.

Je nach Leistungsfähigkeit, Auflösung und Messgenauigkeit gibt es solche Geräte für ca. 20.000 bis über 100.000 Euro.

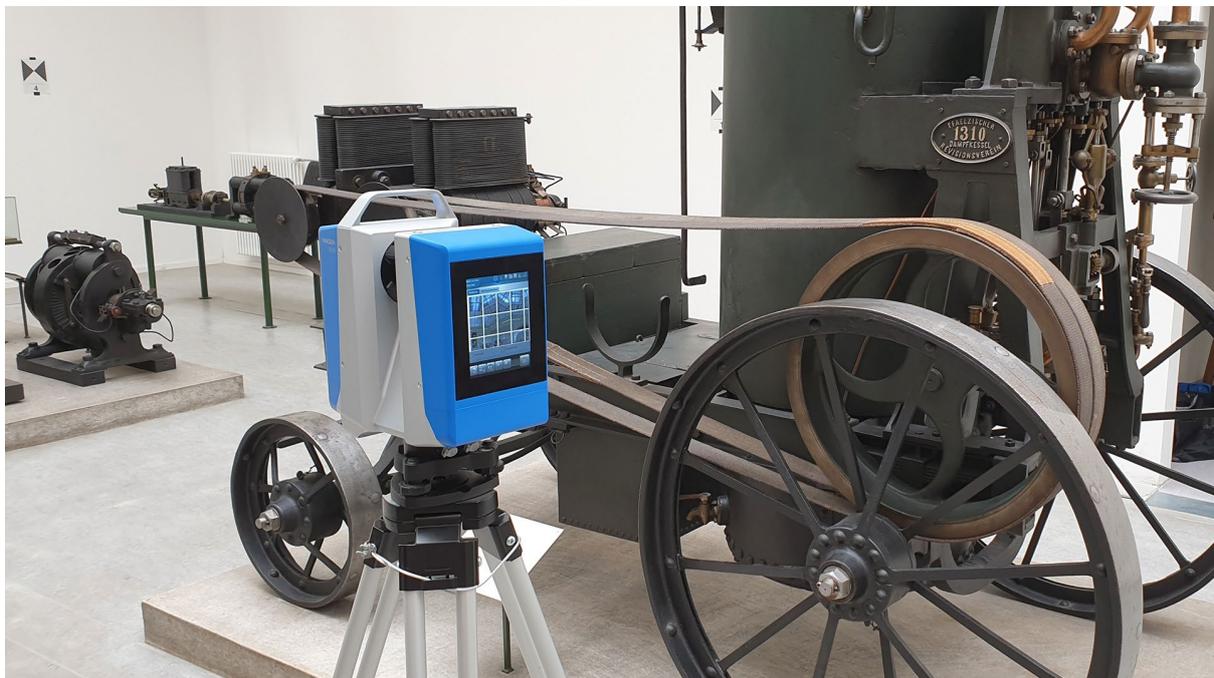


Abbildung 1: LIDAR-Scanner im Einsatz, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0



Abbildung 2: Ergebnis LIDAR-Scan, 360°-Ansicht der Intensität, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

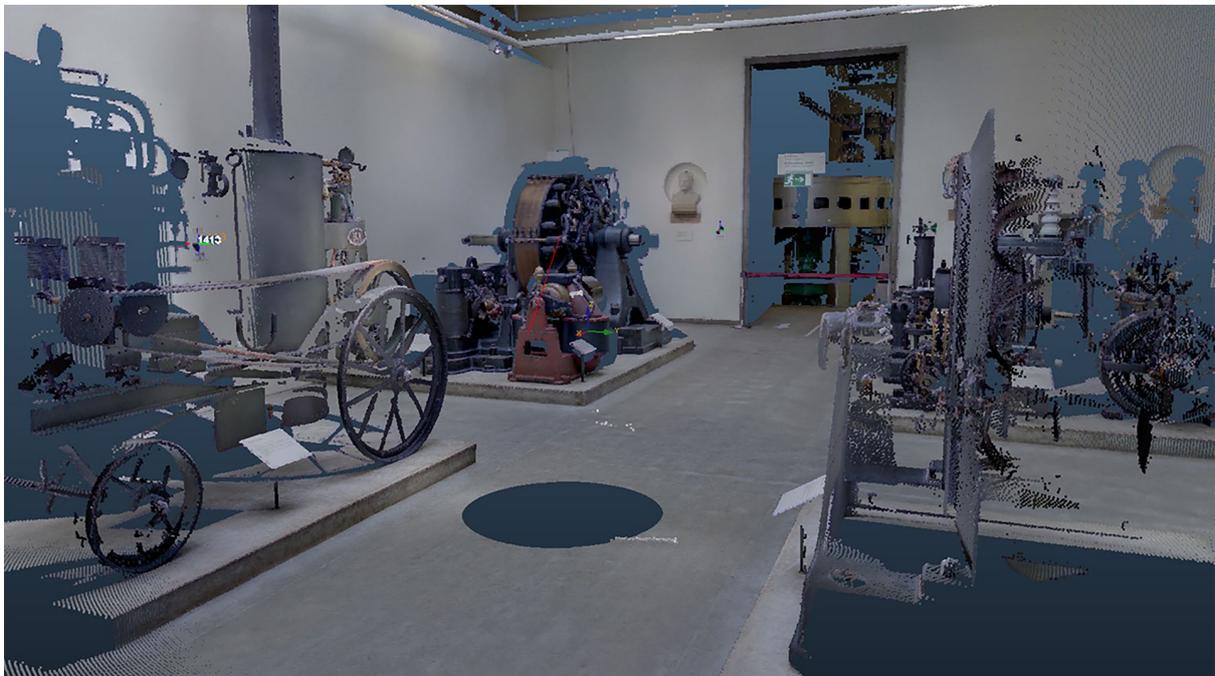


Abbildung 3: Ergebnis LIDAR-Scan, eingefärbte 3D-Punktwolke, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

1.1.1. Laufzeitmessung (Time of Flight)

Hier wird die Zeit gemessen, die ein Lichtimpuls benötigt, um vom Emitter des Scanners auf das Objekt zu treffen und wieder zurück zum Sensor des Scanners zu gelangen. Aus der gemessenen Zeitspanne ergibt sich die Entfernung zum gemessenen Punkt auf dem Objekt.

Ein Vorteil dieser Technik ist die hohe Reichweite, die mehrere hundert Meter betragen kann. Es erfordert allerdings eine sehr präzise Zeiterfassung. Um eine Messgenauigkeit von 1cm zu erreichen, ist eine Zeitmessung im Pikosekunden-Bereich erforderlich.

1.1.2. Phasenverschiebung

Die Time-of-Flight-Methode kann mit einer Messung der Phasenverschiebung zwischen dem ausgesandten und zurückreflektierten Strahl ergänzt werden, um ein genaueres Ergebnis zu erhalten. Hierbei wird die sich ergebende Interferenz der sich überlagernden Wellen ermittelt.

Da sich diese Interferenzen periodisch wiederholen, sind nur Längendifferenzen innerhalb einer Wellenperiode eindeutig bestimmbar. Die Wellenlänge von Laserlicht liegt im Nanometerbereich und ist damit eigentlich zu kurz für sinnvolle Messungen. Durch die Überlagerung von mehreren Wellen verschiedener Länge kann der Wellenzug jedoch derart moduliert werden, dass er sich erst nach einer längeren Strecke wiederholt. So kann innerhalb dieser modulierten Welle der Abstand eindeutig bestimmt werden.

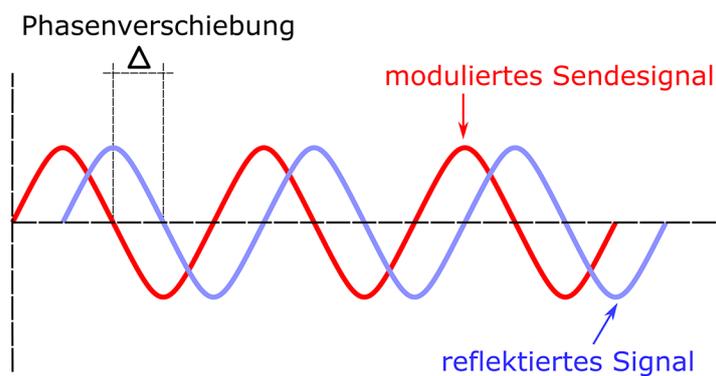


Abbildung 4: Phasenverschiebung, Grafik: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Es gibt Laserscanner, die ausschließlich nach diesem Prinzip arbeiten und Abstände von über hundert Metern eindeutig erfassen können.

1.1.3. Flash-LIDAR-Kameras

Neue technische Entwicklungen haben es möglich und erschwinglich gemacht, das Time-of-Flight-Prinzip auch für eine simultane flächige Erfassung auf Bildsensoren von Kameras anzuwenden. Dies geht allerdings auf Kosten der Auflösung und Genauigkeit.

So funktioniert zum Beispiel die zweite Generation der Microsoft Kinect (für die Xbox One) nach diesem Prinzip und misst parallel die Entfernungen von einzelnen Punkten in einem 2D-Array in niedriger Auflösung und bis zu einer Entfernung von unter 8 Metern. Solch ein System kann zur Erfassung von 3D-Bewegung in Echtzeit eingesetzt werden, wo es nicht um Präzision im Millimeterbereich geht.

Auch bei Smartphones und Tablets wurde begonnen, einige Geräte im höheren Preissegment zusätzlich mit solchen Kameras auszustatten. So hat Apple 2020 erstmals das iPad Pro mit einem solchen LIDAR-Scanner ausgeliefert. Es folgte das iPhone12 Pro.

Nicht zu verwechseln sind diese LIDAR-Kameras mit der bei vielen AR-fähigen Smartphones eingesetzten SLAM-Technologie. Hierbei wird während der Aufnahmen mit der normalen Kamera nach dem aus der Photogrammetrie bekannten Prinzip in Echtzeit ein 3D-Modell der Umgebung erzeugt. Die Berechnung der relativen Kamerapositionen zwischen den Einzelaufnahmen wird dabei unterstützt durch die internen Bewegungssensoren der Geräte.



Abbildung 5: Microsoft Kinect für Xbox One, Foto: Wikimedia, Public Domain



Abbildung 6: Kamera-Array des iPhone12 Pro mit LIDAR-Kamera (unten rechts), Quelle: Wikimedia, CC SA 4.0, Autor: KKPCW

1.2. Triangulation

Bei dieser Methode wird das Objekt von zwei Kameras erfasst, die einen dem System bekannten Winkel und Abstand zueinander haben. Markante Punkte auf der Objektoberfläche werden auf den Abbildungsebenen beider Kameras identifiziert. Daraus ergibt sich ein Dreieck aus Kameras und Objektpunkt (siehe Grafik), wobei alle drei Winkel (α , β , γ) und die Basislänge (c) zwischen den Kameras dem kalibrierten System bekannt sind. Daraus wiederum lassen sich nach den Sinussätzen aus der Trigonometrie die anderen Seitenlängen (a und b) berechnen:

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma}$$

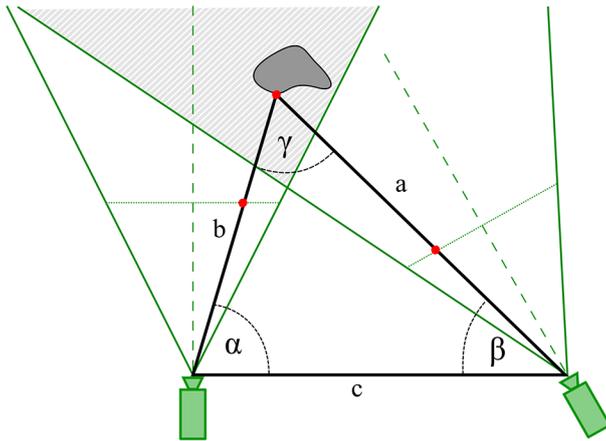


Abbildung 7: Triangulation, Grafik: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Überträgt man dies hier in 2D dargestellte Prinzip ins Dreidimensionale, lassen sich die Raumkoordinaten der einzelnen vermessenen Punkte auf der Objektoberfläche bestimmen. Eine 3D-Punktewolke entsteht.

Bei 3D-Scannern, die grundsätzlich nach dem Prinzip der Triangulation arbeiten, gibt es weitere Unterscheidungen in ihrer Arbeitsweise:

- stereo - non-stereo
- aktiv - passiv

Bei einem **Stereo-Setup** werden wie oben beschrieben zwei Kameras verwendet, die zueinander kalibriert sind. Aus einer Doppelaufnahme lassen sich bereits 3D-Daten ermitteln.

Wird nur **eine Kamera** verwendet, benötigt man mehrere Aufnahmen hintereinander aus verschiedenen Perspektiven.

Als „zweite Kamera“ kann auch eine Lichtprojektion auf die Objektoberfläche dienen. Dann spricht man von einem **aktiven** System. Das projizierte Muster ersetzt hierbei das zweite Kamerabild bei der Triangulation. Eine zum Scanner gehörende Software berechnet für jedes Bild-Paar 3D-Punkte auf der sichtbaren Oberfläche. Sie orientiert sich dabei an dem Verlauf der projizierten Muster. Dieser Vorgang wird laufend wiederholt während der Scanner über die Oberfläche geführt wird und so ergibt sich am Ende eine Punktewolke für das gesamte Objekt.

Bei einem **passiven** System gibt es keine Projektion eines bekannten Musters auf der Objektoberfläche. Die identischen Punkte auf der Objektoberfläche werden anhand von markanten Farbkontrasten erkannt. Diese müssen zahlreich und deutlich erkennbar sein. Eine Photogrammetrie-Software übernimmt hier die Berechnung der Punktewolke. In der Regel werden diese Punkte automatisch identifiziert. Häufig benötigt es jedoch eine händische Unterstützung bei der Erkennung.

Die aktiven Systeme unterscheiden sich noch nach der verwendeten Lichtquelle, ob Laser, sichtbares Licht oder Infrarotlicht.

1.2.1. Laser-Triangulation

Hier projiziert ein Laseremitter einen Punkt auf das Objekt, der von einer Kamera aufgenommen wird. Durch schnelle automatisierte Ablenkung des Laserstrahls über Drehspiegel wird eine flächige

Abtastung erzielt. Dabei wird der Laserpunkt scheinbar zu einem Streifen ausgeweitet, der dann händisch mit dem Gerät über die Objektoberfläche geführt wird.

Im Gegensatz zu den Time-of-Flight-Laserscannern ist die Reichweite bei dieser Methode auf wenige Meter begrenzt. Dafür kann die Auflösung der erfassten Oberflächenstruktur feiner sein und die Geschwindigkeit (erfasste Punkte pro Sekunde) höher. Es wird auch eine höhere Messgenauigkeit erzielt. Die Auflösung wird durch die Qualität der im System verwendeten Kamera bestimmt. Farbaufnahmen für eine Oberflächentextur werden hierbei in der Regel nicht gemacht, da hierfür eine andere Beleuchtung notwendig wäre. Es werden daher nur Schwarz-Weiß-Kameras für die Geometrieerfassung verwendet

Geräte mit einer Auflösung von unter 0,1 mm für Industrieanwendungen kosten in der Regel über 20.000 Euro.

1.2.2. Structured Light

Auch hier wird aktiv Triangulation zur Bestimmung der Entfernung zwischen Scanner und den Objektpunkten verwendet. Statt eines Laserstrahls wird hier jedoch eine flächige Lichtprojektion verschiedener Muster verwendet. Aus dem Kamerabild der aufgrund der Objektoberfläche perspektivisch verzerrten Projektion ermittelt die Software dann die einzelnen Punktkoordinaten.

Viele Streifenlicht-Scanner nutzen eine zweite oder auch dritte Kamera, obwohl die Kombination aus Projektionsbild und nur einer Kamera bereits für eine Triangulation ausreicht. Durch die redundanten, zusätzlichen Bildinformationen können jedoch Messfehler besser ausgeglichen werden. Die Optik und die Auflösung der Kameras haben ebenfalls großen Einfluss auf die Qualität des Scans.

Vorteil dieses Verfahrens sind eine hohe Geschwindigkeit und Genauigkeit. Zudem lassen sich die Kameras auch verwenden um die Oberflächenfarbe des Objektes zu erfassen für eine spätere Texturierung des 3D-Modells. Hierbei dienen die Projektoren als Lichtquelle. Dies geschieht nach Farbkanälen getrennt (RGB), wenn die Kameras nur für monochrome Aufnahmen vorgesehen sind. Ein besseres Farbergebnis wird allerdings erzielt, wenn in dem System ist eine separate Farbkamera integriert ist, die nur für die Aufnahme der Farbtextur verwendet wird.

3D-Scanner, die nach diesem Prinzip arbeiten, sind die am weitesten verbreiteten auf dem Markt. Die Preise für solche Geräte variieren stark. Es gibt Aufsätze für Tablets und Smartphone für wenige Hundert Euro, mit niedriger Auflösung und schlechter Performance. Etwas bessere Geräte liegen schon bei ca. 4000 Euro. Industriescanner gibt es in der Preisspanne von 10.000 bis über 50.000 Euro

1.2.3. Photogrammetrie

Beim photogrammetrischen Verfahren wird das Objekt zunächst mit einer Fotokamera aus mehreren Blickwinkeln aufgenommen. Dies können ein paar Dutzend Fotos sein, oder auch tausende, je nach Form und Größe des Objekts und den Aufwand, den man betreiben möchte, um eine möglichst gute Qualität zu erreichen.



Abbildung 8: Photogrammetrie im Einsatz, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Die Bilder werden in eine Software geladen und analysiert. Sie identifiziert dabei markante Punkte auf den einzelnen Fotos und setzt darüber mehrere Aufnahmen zueinander in Beziehung. Aus diesen Beziehungen werden die Positionen der einzelnen Kameraaufnahmen ermittelt. Hierbei entsteht eine erste grobe Punktwolke der gesamten erfassten Szene, bestehend aus den Punkten, die über mehrere Fotos hinweg identifiziert wurden. Gegebenenfalls muss die Software bei der Berechnung der Aufnahmepositionen unterstützt werden, indem identische Punkte über mehrere Bilder hinweg händisch markiert werden.

Nachdem die grobe 3D-Szene bereinigt und das gewünschte Objekt freigestellt wurde, erfolgt in einem weiteren Schritt die Berechnung einer detaillierten Punktwolke des Objektes, welche die Basis für die anschließende Erzeugung einer Polygonoberflächenstruktur bildet.

Die aufgenommenen Bilder werden auch genutzt, um abschließend eine Textur für das 3D-Objekt zu generieren.

Mit der Photogrammetrie lässt sich prinzipiell eine hohe Genauigkeit erzielen und die Qualität der generierten Textur kann die höchste sein, verglichen mit den anderen Verfahren. Voraussetzung dafür ist eine gute Qualität der Fotoaufnahmen. Diese unterscheidet sich von der üblichen Objektfotografie, bei der durch die Verwendung von Licht und Schatten die Form des Objektes hervorgehoben wird. Dies sollte man bei Aufnahmen für die Photogrammetrie vermeiden, da Glanzlichter und Schatten die Identifizierung der markanten Oberflächenpunkte erschweren.

Generell wird die Qualität gesteigert durch:

- Hohe Bildauflösung
- Vermeidung von Tiefenunschärfe
- Gleichmäßige Ausleuchtung
- Kontraste in der Oberflächentextur
- Vermeidung von spiegelnden Reflexionen

- Vermeidung von Glanzlichtern
- Vermeidung von Komprimierungsartefakten

Anders als bei Structured-Light-Scannern, wo die Objektoberfläche mithilfe von projizierten Mustern erkannt wird, muss die Photogrammetrie ohne diese Hilfe auskommen. Daher ist dieses Verfahren mehr als andere auf eine abwechslungsreiche Oberflächentextur angewiesen. Eintönige Flächen werden nicht erfasst.

Man kann Photogrammetrie betreiben mit dem eigenen Smartphone und kostenlose Apps, auch cloudbasiert. Die damit zu erzielende Qualität ist dann eher gering.

Das obere Ende bildet ein professionelles Fotostudio in Verbindung mit einer Software wie Agisoft Metashape oder RealityCapture. Hinzu kommt ein entsprechend leistungsstarker Rechner.

Die Bandbreite der möglichen Größe von scanbaren Objekten ist die weitesten von allen möglichen Scanmethoden. Mit diesem Verfahren können 3D-Modelle ganzer Landschaften anhand von Luftaufnahmen erzeugt werden.

Bei der Erfassung von großen Objekten, Räumen oder Landschaften ist eine Kombination mit LIDAR-Aufnahmen sinnvoll. Hierbei werden die zuvor eingefärbten und schon verorteten Punktwolken der einzelnen Laserscans in die Photogrammetriesoftware importiert und dabei in schon positionierte Bilder umgewandelt, die ein festes Grundgerüst und Orientierung für die Ermittlung der übrigen Aufnahmepositionen bilden. Aber nicht jede Software bietet diese Funktion.

Photogrammetrie bietet eine hohe Flexibilität und es lassen sich Aufnahmesysteme mit mehreren Kameras realisieren, um den Prozess zu beschleunigen. Dies geht vom Setup eines stereoskopischen Systems mit zwei Kameras bis hin zum Aufbau eines Full-Body-Scanners mit mehreren Dutzend Kameras und Lichtquellen, die an einem Gerüst um das Objekt herum installiert sind. Damit lassen sich Momentaufnahmen von Personen erreichen, ohne dass es zu Bewegungsunschärfe kommt.

1.3. Computertomographie (CT)

Mit Hilfe der Computertomographie (CT) kann man – im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Oberflächenscans – ein dreidimensionales Bild eines Objektvolumens erfassen und in einer Visualisierung Schnittansichten durch diesen Körper zeigen. Hierzu werden die Objekte z.B. mit Röntgen- oder Neutronenstrahlen durchleuchtet. Die folgenden Erläuterungen beziehen sich auf die Röntgen-CT.

Beim herkömmlichen Röntgenverfahren wird das abzubildende Objekt von einer Röntgenquelle durchleuchtet und auf einem Röntgenfilm abgebildet. Es entsteht eine Projektion des Volumens auf eine Fläche. In Strahlrichtung hintereinanderliegende Bildteile des durchleuchteten Körpers überlagern sich zwangsläufig. Rückschlüsse auf den inneren Aufbau sind mit einer Aufnahme so nicht möglich.

In der CT werden Projektionen des Objekts aus vielen Richtungen erstellt und daraus wird die innere Struktur des Körpers berechnet. Die computergestützte Bildrekonstruktion kann für jedes Volumenelement des Objektes (sog. Voxel, entspricht einem dreidimensionalen Pixel) den Absorptionsgrad ermitteln. Die mathematischen Grundlagen dafür wurden schon seit dem frühen 20. Jahrhundert entwickelt, technisch umsetzbar wurde das Verfahren erst seit den 1970er Jahren mit den fortschreitenden Entwicklungen in der Computertechnologie.

Industrielle CT

Zum Scannen von Objekten werden industrielle Computertomographen verwendet. Im Gegensatz zu den medizinischen Geräten, bei denen der Scanner um den ruhenden Patienten kreist, dreht sich hier das Objekt auf einer Plattform zwischen Strahlungsquelle und Detektor. Dies ist mechanisch einfacher zu realisieren.

Geräte für die industrielle CT haben unterschiedliche Baugrößen, da auch die Größe der Untersuchungsobjekte von einigen Millimetern bis hin zu wenigen Metern reichen kann. Sie unterscheiden sich zudem in der Höhe der eingesetzten Strahlungsenergie, die an die Objektgröße und Materialart angepasst werden muss, und in der erreichbaren Bildauflösung.

In der Industrie wird die CT eingesetzt in der Fertigung zur Bauteilkontrolle (Wandstärke, Porosität, Defekte) und zur Überprüfung von Eigenschaften, die mit herkömmlichen Messverfahren nicht möglich sind. Im musealen Bereich ist CT insbesondere für die Restaurationsforschung interessant.

1.3.1. Aufnahmesysteme

- Zeilendetektor

Eine einzelne Schicht des Objekts wird untersucht und rekonstruiert. Die Röntgenquelle sendet dabei einen Fächerstrahl aus. Nach einer Umdrehung wird das Objekt entlang einer Achse zeilenweise verschoben zur Erfassung der nächsten Schicht (alternativ werden auf Emitter und Detektor parallel verschoben).

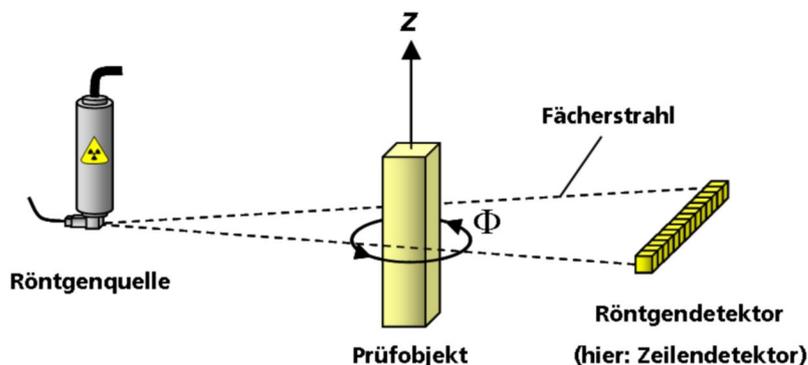


Abbildung 9: Prinzip CT-Zeilendetektor, Grafik: T.Brandmüller, Quelle: Wikimedia, CC BY-SA 3.0

Vorteil: hohe Detailauflösung, wenig Störung durch Streustrahlung

Nachteil: lange Messzeiten

- Flächendetektor

Hier wird das gesamte Volumen eines Objekts durch allseitiges Durchstrahlen untersucht. Die Röntgenquelle sendet einen Kegelstrahl aus, detektiert wird mit einem Flachbild-Detektor

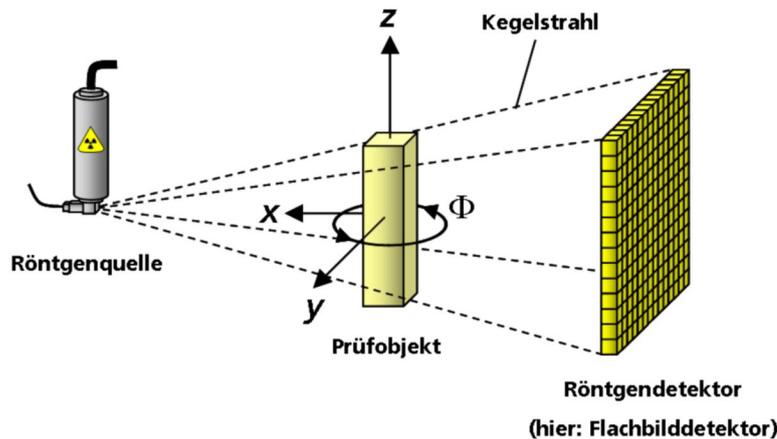


Abbildung 10: Prinzip CT-Flächendetektor, Grafik: T.Brandmüller, Quelle: Wikimedia, CC BY-SA 3.0

Vorteil: kurze Messzeiten

Nachteil: reduzierte Datenqualität, technisch aufwendiger und teurer

1.3.2. Messergebnis

Die Qualität der Messergebnisse hängt von einer Vielzahl von Einflussgrößen ab: der Röntgenquelle, des Detektors, der Objektmaterialien, der Messparameter und Rekonstruktionsmethode.

Die geometrische Auflösung hängt vom Brennfleckdurchmesser der Strahlung und der Auflösung der Detektoren ab. Sie kann bei speziellen Geräten bis in den Sub-Mikrometer-Bereich gehen, allerdings nur für sehr kleine Objekte. Makro-CT für Objektgrößen im Meterbereich haben gewöhnlich eine Auflösung im Millimeterbereich oder sogar etwas darunter.

Der Kontrast zwischen Materialien ist die Voraussetzung für deren Unterscheidung. Er wird beeinflusst durch Rauschen in der Abbildung, ausgelöst durch Streustrahlung. Das Durchdringen von dichten Materialien, wie z.B. Metallen ist problematisch, da eine hohe Strahlungsenergie notwendig ist, die den Kontrast verschlechtert.

Es kommt zur Darstellung von fließenden Materialübergängen, wenn ein Volumenbereich mit zwei Materialdichten als ein einzelner Voxel dargestellt wird, der dann einen gemittelten Grauwert erhält. Bei stark absorbierenden Materialien strahlen die Grauwerte in benachbarte Voxel über und führen so zu Messartefakten.

1.3.3. Rekonstruktion

Bei der Rekonstruktion des Objektvolumens aus den aufgenommenen Projektionsbildern werden einzelne Schnittbilder berechnet, die übereinandergelegt wieder das ganze Volumen ergeben. Der Absorptionsgrad der Strahlung in jedem Volumenelement wird in den Grauwert eines Bildpixels übersetzt.

Gespeichert werden diese Daten schichtweise in einzelnen Bilddateien, die man sich auch separat anzeigen lassen kann. Dem anzeigenden Programm muss über Metadaten die Formatierung dieser Bilder (Auflösung, Bittiefe) bekannt sein.

1.3.4. Visualisierung

Das Ergebnis zur Visualisierung ist eine dreidimensionale Matrix aus Grauwerten, welche die Unterschiede in der Materialdichte darstellen und die in einem Editor für verschiedene Darstellungszwecke eingefärbt werden kann. Durch Anwendung von Transparenz auf bestimmte

Graustufen ober- oder unterhalb eines Schwellenwerts lassen sich beliebige Bereiche nach Materialdichte isoliert darstellen (Segmentierung). Aus solchen Darstellungen können 3D-Polygonmodelle der sichtbaren Oberflächen generiert werden. Zudem lassen sich beliebige Schnitte durch das Volumenmodell anzeigen.

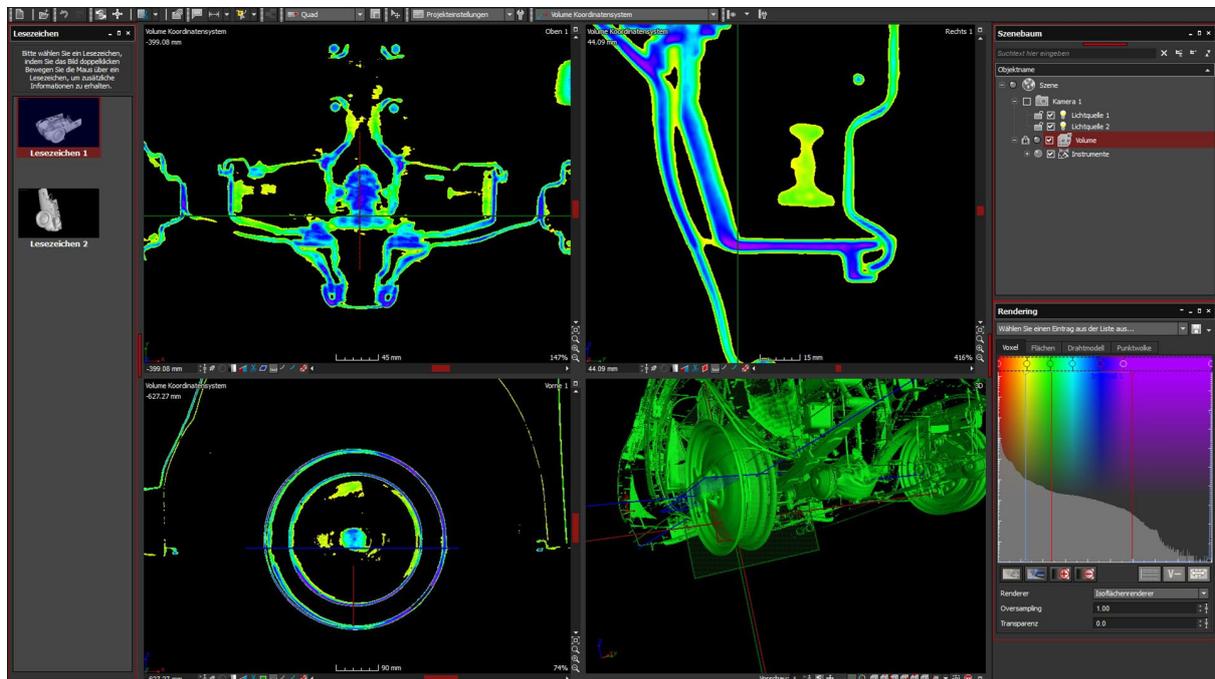


Abbildung 11: CT-Daten im Viewer, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

1.4. Weitere Information

3D-Scan allgemein:

https://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanning

<https://www.aniwaa.com/guide/3d-scanners/3d-scanning-technologies-and-the-3d-scanning-process/>

LIDAR:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Laserscanning>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar>

Structured Light:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Streifenprojektion>

Photogrammetrie:

<https://www.gamedeveloper.com/disciplines/everything-you-need-to-know-about-photogrammetry-i-hope>

https://unity3d.com/files/solutions/photogrammetry/Unity-Photogrammetry-Workflow_2017-07_v2.pdf

Video von Capturing Reality mit einer Einführung in das Fotografieren für Photogrammetrie:

https://www.youtube.com/watch?v=9e_NLp_FaUk

Video eines CG-Artists mit Tipps zum Aufbau eines Studio-Setups für Photogrammetrie:

<https://www.youtube.com/watch?v=REA3XNgUMJg&t=8s>

Computertomographie:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Computertomographie>

https://de.wikipedia.org/wiki/Industrielle_Computertomographie

<http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/artdok/volltexte/2016/4429>

2. 3D-Scanner – Auswahlkriterien und Limitationen

Bei der Anschaffung eines 3D-Scanners wird schnell deutlich, dass es nicht den einen Scanner für alle möglichen Objekte gibt. Für jede Objektart oder -größe gibt es bestimmte Kriterien, die ein Scanner dafür erfüllen muss. Identifiziert man dabei weniger Relevantes für den geplanten Einsatzbereich, lässt sich viel Geld sparen, wenn man auf einige Features verzichten kann.

So sind zum Beispiel mobile, handgeführte Streifenlicht-Scanner wesentlich teurer als ein stationär betriebenes Gerät, bei vergleichbarer Scanqualität.

Im folgenden Abschnitt werden Kriterien aufgeführt, die bei einer solchen Entscheidung eine Rolle spielen können. Es werden auch die technischen Grenzen erwähnt, mit denen nahezu jedes Scansystem konfrontiert ist, und über die man sich als Benutzer bewusst sein sollte.

2.1. Auflösung

Bei der Auflösung eines 3D-Scanners wird der Abstand zwischen zwei gemessenen Punkten angegeben. Eine höhere Auflösung meint somit, dass die Punkte enger zusammenliegen und mehr Details abbilden können. Die genaue Auflösung ist auch abhängig vom Abstand des Objektes zum Scanner. Je weiter das Objekt entfernt ist, desto geringer wird die Auflösung. Daher wird für die Geräte eine maximale Auflösung angegeben. Bei den meisten Scannern liegt dieser Wert zwischen 0,05 und 1 Millimeter.

2.2. Genauigkeit

Die Genauigkeit gibt den möglichen Messfehler in Millimeter an. Dies ist einer der Hauptfaktoren für die großen preislichen Unterschiede bei den Geräten.

2.3. Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit wird in gemessenen Punkten pro Sekunde angegeben. Bei Streifenlichtscannern wird sie auch in Scans pro Sekunde angegeben, was verdeutlicht, aus wie vielen einzelnen Aufnahmen der gesamte Scan besteht.

2.4. Arbeitsbereich

Es gibt keinen Scanner, der für jede beliebige Objektgröße optimal geeignet ist. Time-of-Flight-Laserscanner werden eingesetzt für Objektabstände von einigen Metern bis mehrere hundert Meter. Je weiter das Objekt entfernt ist, desto geringer wird die zu erreichende Auflösung.

Scanner, die nach dem Triangulationsverfahren arbeiten, haben einen deutlich eingeschränkten Arbeitsabstand, da das System nur im Schärfebereich der Kameras optimale Ergebnisse liefert. Zusammen mit dem eingestellten Kamerawinkel ergibt sich ein Arbeitsbereich, in dem die Objektoberfläche erfasst werden kann. Die meisten Geräte sind vorkalibriert und haben daher einen fixen Arbeitsbereich. Außerhalb dieses Volumens findet keine Aufnahme statt.

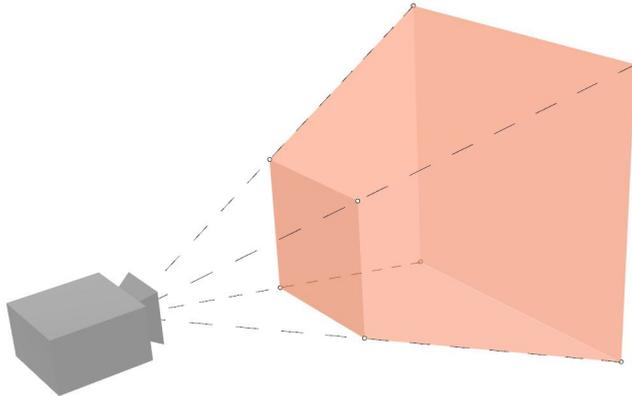


Abbildung 12: 3D-Scan Arbeitsraum, Grafik: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Es gibt Scansysteme, bei denen man diese Kameraeinstellungen vor dem Scanvorgang verändern kann, um sie für die jeweilige Objektgröße zu optimieren, was innerhalb eines gewissen Rahmens möglich ist. Der Nachteil ist hier jedoch der größere Zeitaufwand für die Kalibrierung des Systems.

Das zu erfassende Objekt muss nicht unbedingt vollständig innerhalb dieses Arbeitsbereiches passen. Insbesondere handgeführte Scanner sind dafür vorgesehen, größere Gesamtvolumen zu erfassen. Aber da Scanner mit einem geringeren Arbeitsabstand auch eine entsprechend höhere Auflösung erzielen, steigt das Datenvolumen stark an, welches verarbeitet werden muss. Um das Ganze in einem handhabbaren Rahmen zu halten, gibt es für die Scanner neben der Angabe zum Arbeitsbereich auf Empfehlungen für die maximale Objektgröße.

2.5. Farbwiedergabe

Die Wiedergabe der Oberflächenfarbe eines gescannten Objektes ist in vielen Fällen nicht relevant. Daher besitzen die meisten Industriescanner diese Funktionalität auch nicht. Die Geometrie wird bei den Scannern nach Triangulationsverfahren über Schwarz-Weiß-Kameras erfasst, da diese eine genauere Darstellung ermöglichen als Farbkameras. Prinzipiell lässt sich damit auch eine farbige Oberfläche aufnehmen, indem man das Objekt nacheinander mit rotem, grünem und blauem Licht aus dem Projektor anstrahlt und diese drei Aufnahmen der einzelnen Farbkanäle zu einem Gesamtbild zusammenfügt. Die Wiedergabe reicht aber nicht an die Qualität einer Farbkamera heran. Daher verwendet man stattdessen besser direkt eine zusätzliche Farbkamera, die zusammen mit dem Scansystem kalibriert ist und nur für die Aufnahme der Oberflächentextur genutzt wird. Solche Setups findet man vorwiegend in 3D-Scannern, die im Design- und im Hobbybereich eingesetzt werden, aber auch im musealen Umfeld.

2.6. Mobilität – Anwendungsart

Einen großen Einfluss auf die Einsatzmöglichkeiten eines 3D-Scanners ist die Unterscheidung, ob dieser

- stationär betrieben
- oder handgeführt wird

Auf Stativen befestigte **stationäre Scanner** werden häufig zusammen mit einem Drehteller verwendet, auf dem sich das zu scannende Objekt befindet. Der Drehteller macht eine volle Umdrehung mit einer vorher festgelegten Anzahl an Zwischenstopps. Die Kameras nehmen an diesen Stopps ihre Bilderpaare auf und die zugehörige Software erstellt daraus eine Punktwolke für den gesamten Umlauf. Dabei werden die Punkte der einzelnen Aufnahmen passend

übereinandergelegt. Dafür muss es ausreichend überlappende Bildbereich von einer Aufnahme zur nächsten geben. Je nach Komplexität des Objektes reichen ca. 12 bis 36 Aufnahmen pro Durchgang aus. Je nach Objektform sind mehrere Durchgänge aus verschiedenen Blickwinkeln notwendig, um die gesamte Geometrie zu erfassen. Das Objekt kann für einen weiteren Scandurchlauf auch gekippt werden. Die Ergebnisse der einzelnen Durchläufe werden am Ende zu einem Gesamtobjekt zusammengeführt.

Der ruhige und kontrollierte Betrieb ermöglicht eine hohe Genauigkeit beim Scanprozess. Stationäre Streifenlichtscanner bieten oft einen flexiblen Zusammenbau ihrer Komponenten auf einer Schiene, wodurch das System optimal für das zu scannende Objekt eingerichtet werden kann. Nach einem Kalibrierungsvorgang läuft der eigentliche Scanvorgang mit einem verbundenen Drehteller automatisiert ab. Solch ein System wird auch Desktop-Scanner genannt, da der gesamte Aufbau auf einem Tisch Platz finden kann.

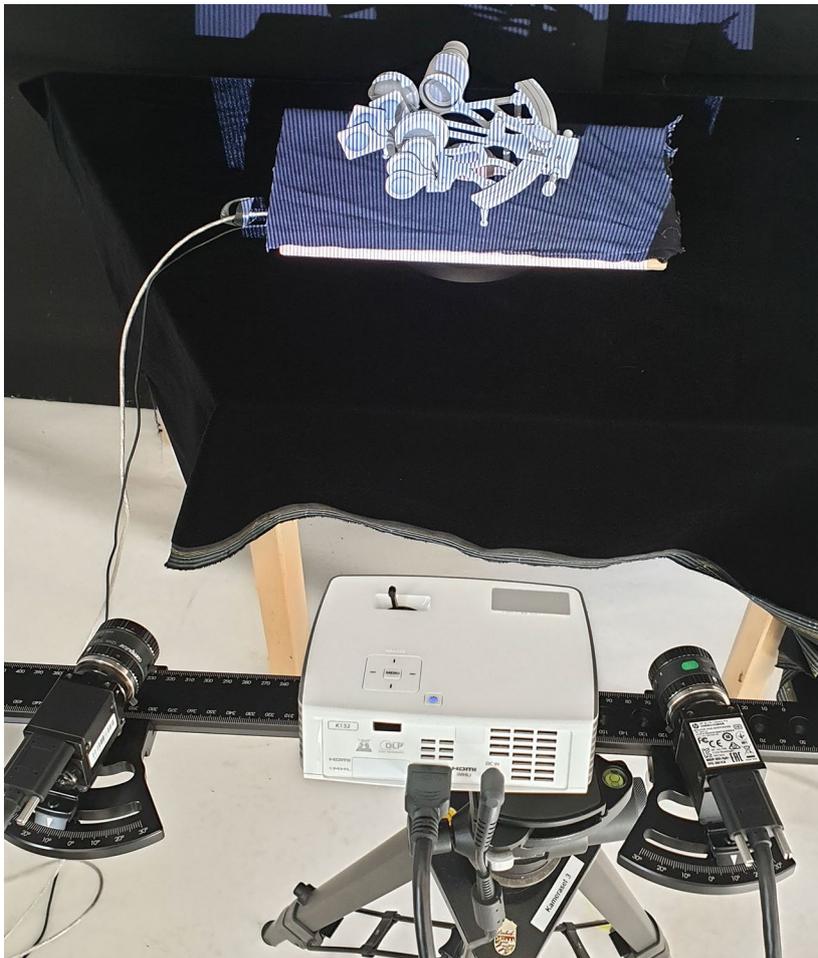


Abbildung 13: Stationärer Streifenlichtscanner, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

LIDAR-Scanner zum Erfassen von großen Objekten und ganzen Landschaften operieren ebenfalls stationär. Da sich hier allerdings das Objekt nicht bewegen kann, wird der Scanner auf seinem Stativ nach jedem Durchlauf neu positioniert bis die gesamte Szene ausreichend erfasst ist.

Handgeführte Scanner sind flexibler in ihren Einsatzmöglichkeiten. Mit Ihnen kann man einfacher und schneller die gesamte Objektoberfläche erfassen als mit dem stationären Aufbau.

Dies geht jedoch auf Kosten der Genauigkeit. Während eines Scandurchlaufs werden deutlich mehr Einzelaufnahmen benötigt, um trotz der Kamerabewegung die notwendigen Überlappungen für das

Zusammenführen der Punkte sicher zu erhalten. Dies können, je nach Gerät, ca. 5 bis 50 Aufnahmen pro Sekunde sein, die in Echtzeit ausgewertet werden müssen, damit es nicht zum Abbruch des Scans kommt. In die Berechnung der Kamerabewegung fließen auch interne Sensordaten des Scanners ein.

Die Aufnahmezeit ist manuell einstellbar, um diese an die jeweilige Aufnahmesituation anpassen zu können. Sie kann niedriger eingestellt sein, wenn man den Scanner nur langsam über die Objektoberfläche führen kann. Dies ist der einzige Weg, um die anfallende Datenmenge niedrig zu halten, da die Auflösung des Systems vorgegeben ist und daher nicht verringert werden kann.

Da sich die einzelnen Komponenten (Projektor, Kameras) fest verbaut und vorkalibriert in einem handlichen Gehäuse befinden, hat das Gerät einen vorgegebenen idealen Arbeitsabstand zur Objektoberfläche. Dieser sollte beim Scannen eingehalten werden.



Abbildung 14: Handgeführter Streifenlichtscanner, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Um die Datenqualität eines handgeführten Scanners zu erhöhen, gibt es zusätzliche Möglichkeiten zur genaueren Verortung des Scanners. Dafür bieten zum Beispiel einige Handscanner-Systeme ein externes Tracking des Gerätes über fest positionierte Kameras.

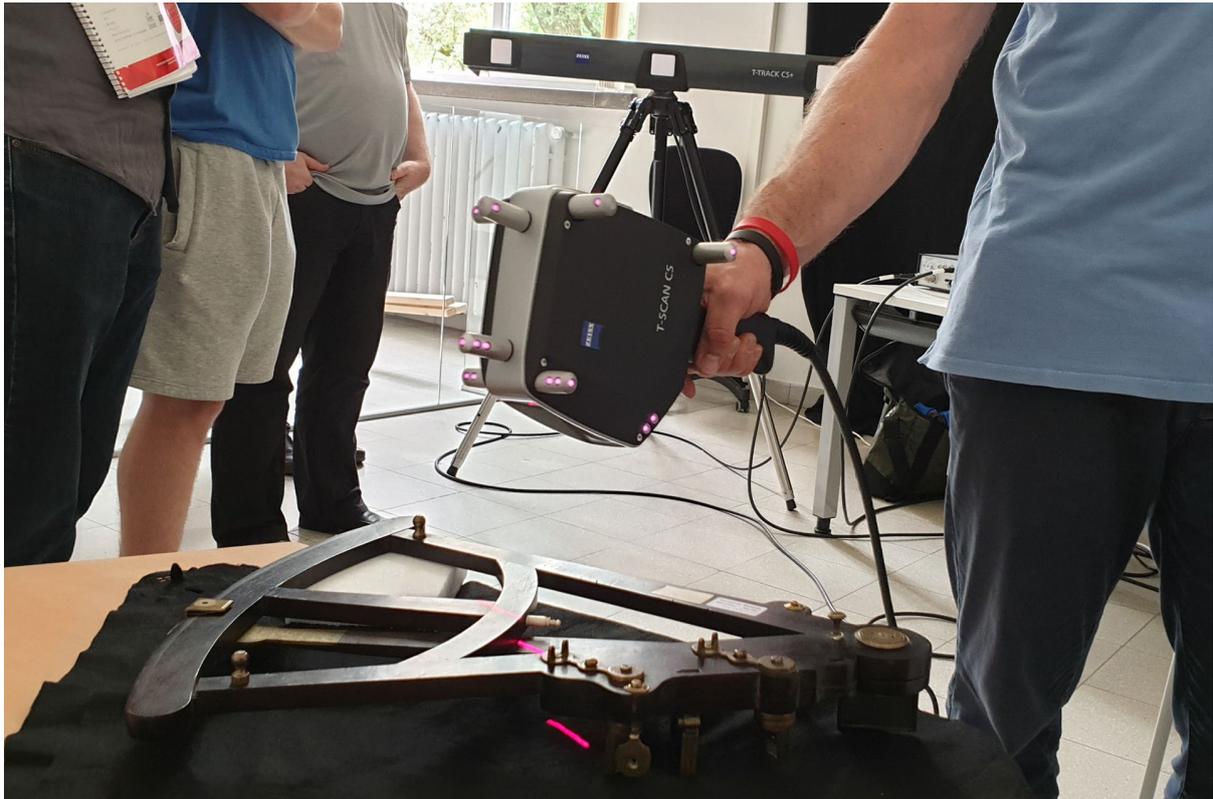


Abbildung 15: Handgeführter Laserscanner mit externem Positions-Tracking, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Oder der Scanner wird automatisch an einem Roboterarm geführt, dessen genaue Ausrichtung über Sensoren an seinen Gelenken gemessen werden kann. Dadurch wird allerdings das mögliche Scanvolumen wieder eingeschränkt.

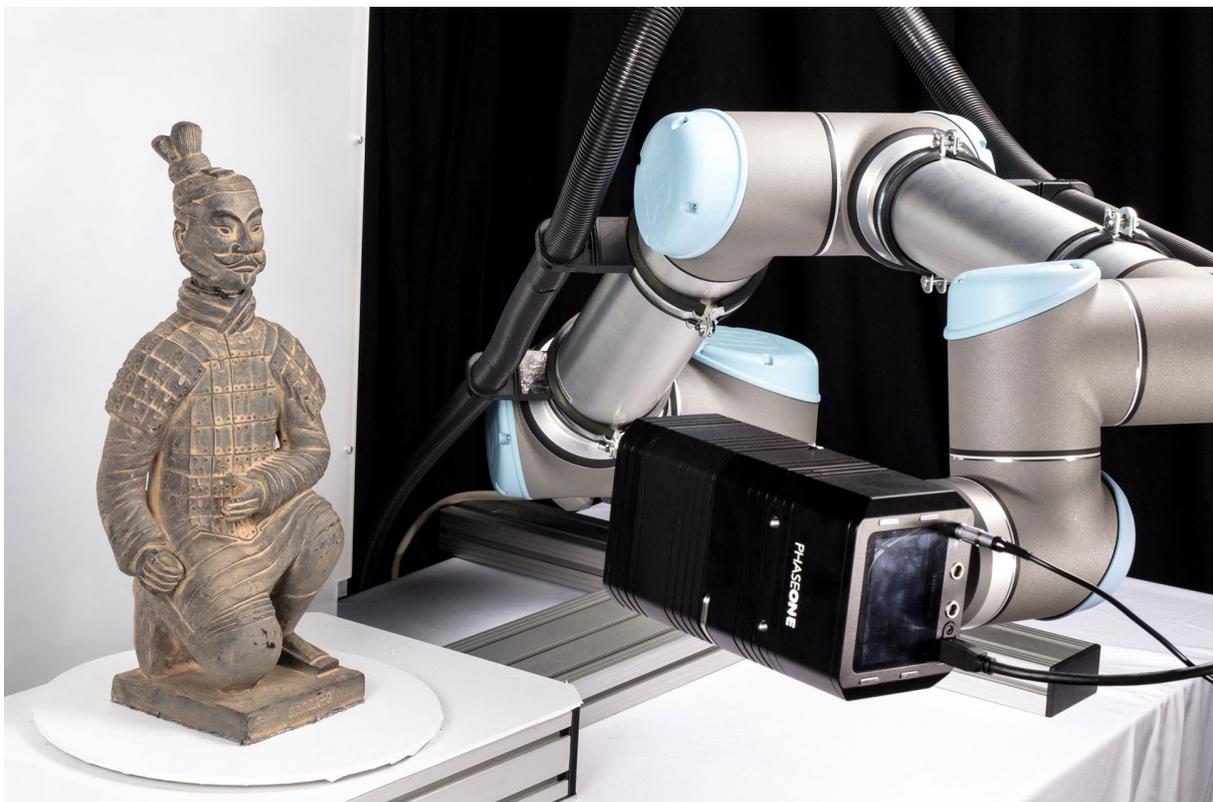


Abbildung 16: Photogrammetrie, unterstützt durch Roboterarm (CultArm3D), Foto: Fraunhofer IGD

Die Verwendung eines Roboterarms ermöglicht die Automatisierung des Scanvorgangs, wobei der Scanner immer im optimalen Abstand zum Objekt geführt werden kann. Dafür wird das Objekt vorher grob erfasst, um einen kollisionsfreien Pfad zu programmieren.

2.7. Grenzen der Anwendung

Im Idealfall bestehen die zu scannenden Objekte aus matten, gut erkennbaren Oberflächen mit einer kontrastreichen Textur. Dann lässt sich mit der 3D-Erfassung eine Qualität erreichen, die den Fähigkeiten des jeweils eingesetzten Scanners gerecht wird. Bei unlackierten Holzoberflächen lassen sich erstaunliche Ergebnisse erzielen. Es werden dann Strukturen erfasst, die mit dem bloßen Auge nicht erkennbar sind.

Leider bestehen viele Objekte aus Materialien, die nicht diesem Ideal entsprechen. Man spricht in diesem Zusammenhang scherzhaft von „unkooperativen“ Oberflächen.

Insbesondere bei technischen Objekten, die häufig aus Metall, glatten Kunststoffen und Glas bestehen, kommt es dadurch zu einer verminderten Abbildungsqualität. Dies wird besonders deutlich bei eigentlich glatten Oberflächen die im Scanergebnis angeraut erscheinen. Hier ist dann häufig nicht mehr erkennbar, ob es sich um die tatsächliche Oberflächenbeschaffenheit handelt oder um ein aufnahmebedingtes Bildrauschen.

Bei technischen Objekten fällt auch besonders auf, dass scharfe Kanten nicht genau nachgebildet werden können. Die aufgenommenen Oberflächenpunkte liegen nicht exakt auf der Kante, sondern zufällig verstreut. Abhängig von der Scanauflösung kommt es dadurch bei der Berechnung der Polygonoberfläche des 3D-Modells zu unterschiedlich starken Verrundungen.

2.7.1. Reflexionen an Oberflächen

Die Genauigkeit eines Scans hängt bei der Triangulation davon ab, ob es dem System gelingt, identische Punkte in einem Bild-Paar zu identifizieren. Diese Zuordnung wird erschwert durch bestimmte Oberflächeneigenschaften. Trifft das Licht des Projektors auf spiegelnde Fläche, hat das zurückgeworfene Licht unter jedem neuen Betrachtungswinkel eine andere Intensität. Durch den veränderten Helligkeitseindruck werden Punkte falsch zugeordnet, wodurch es zu einer fehlerhaften Abstandsberechnung kommt. Dies führt im Resultat zu einer falsch wiedergegebenen Oberflächenstruktur, falls überhaupt eine Oberfläche ermittelt werden kann. Häufig bleiben die gescannten Flächen lückenhaft, wenn die Software die Zuordnung der Oberflächenpunkte ergebnislos abbricht. Diese Lücken können von der Software geschlossen werden, was aber nicht mehr unbedingt dem Original entsprechen muss.

Um angemessen auf diese Problematik reagieren zu können ist ein Überblick zu den verschiedenen Arten von Reflexionen auf unterschiedlichen Materialien erforderlich. Dann kann man mit einer auf das Objekt angepassten Beleuchtung und dem Einsatz von passenden Filtern den störenden Einfluss der Reflexionen reduzieren.

Reflexion von Licht an einer Oberfläche teilt sich auf in einen diffusen und einen gerichteten (spiegelnden) Anteil, wie im folgenden Bild vereinfacht dargestellt. Die Aufteilung ist abhängig von Einfallswinkel, von der Rauheit der Oberfläche und wie tief das Licht in das Material eindringt oder es durchdringt. In unserem Kontext des 3D-Scans ist in Verbindung mit der Reflexion auch die Polarisation des Lichts von Bedeutung.

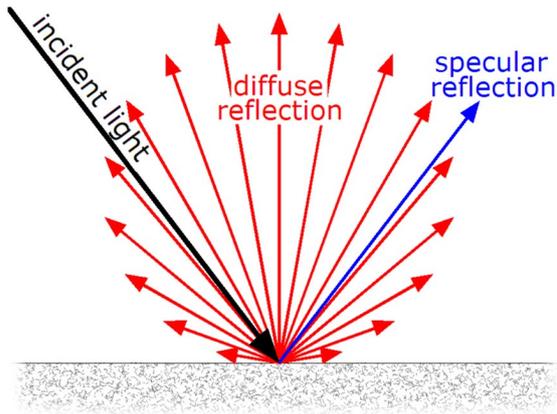


Abbildung 17: diffuse und spiegelnde Reflexion, Grafik: GianniG46, Wikimedia CC BY-SA 3.0

Polarisation

Die Eigenschaften des Lichts können mit wellencharakteristischen Eigenschaften beschrieben werden, als Wellen, die jeweils entlang einer Ebene schwingen. Die meisten Lichtquellen strahlen ein Bündel von Lichtwellen in unterschiedlichen Schwingungsebenen ab. Es ist unpolarisiert. Mit Hilfe von linearen Polfiltern lassen sich die Schwingungsanteile entlang einer Ebene herausfiltern. Der Rest wird absorbiert. Dann bezeichnet man das Licht als polarisiert.

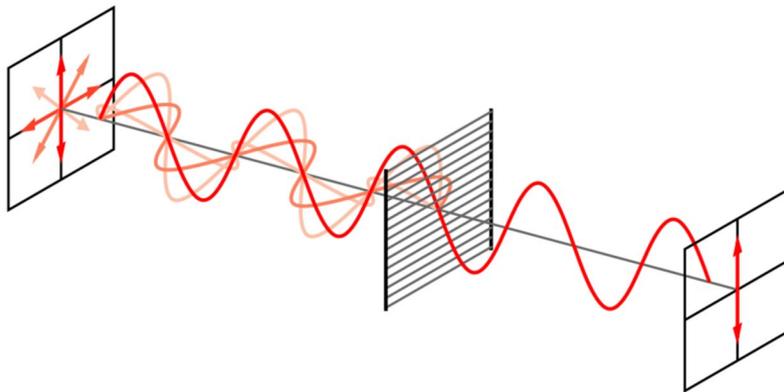


Abbildung 18: Polarisation, Grafik: Bob Mellish, Wikimedia CC BY-SA 3.0

Hält man in den Strahlengang des polarisierten Lichts einen weiteren linearen Polfilter senkrecht zur Ausrichtung des ersten Filters, kommt es zur kompletten Auslöschung des Lichtstrahls. Diesen Vorgang nennt man Kreuzpolarisation.



Abbildung 19: Polarisationsfilter in verschiedenen Stellungen, Fotos: Wikimedia, Public Domain

Diffuse Reflexion

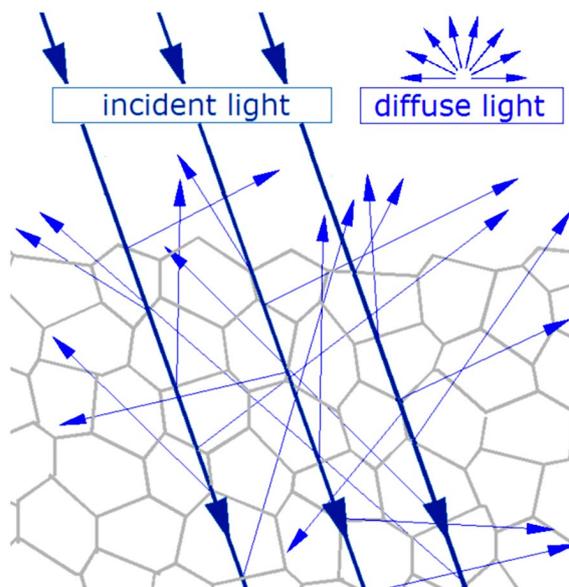


Abbildung 20: diffuse Reflexion, Grafik: GianniG46, Wikimedia CC BY-SA 3.0

Oberflächen mit einer großen Rauheit relativ zur Wellenlänge reflektieren diffus. Das Licht wird in unterschiedliche Richtungen gestreut, dringt in den Körper ein und auch wieder aus. Diffuse Reflexionen sind unpolarisiert.

Farbe eines Materials

Wird die Zusammensetzung des Lichts während der diffusen Reflexion nicht verändert, nehmen wir den Körper in der Farbe der Beleuchtung wahr. Farbige Materialien jedoch absorbieren Wellenlängenbereiche des eindringenden Lichts und emittieren dafür Licht in einer veränderten Wellenlänge (abzüglich der Energie für Wärmeabstrahlung). Die Mischung aus dem Komplementär zur absorbierten Farbe und der emittierten Strahlung bestimmt den Farbeindruck des Körpers. Diese diffuse Farbe ist das Ziel für die photogrammetrische Aufnahme von Texturen.

Gerichtete Reflexion

Die Erfassung des diffusen Farbwertes wird jedoch erschwert durch die Spiegelung der Lichtquelle an der Oberfläche, die besonders bei glatten Körpern auftritt. Dieser Anteil der Reflexion gehorcht dem allgemeinen Reflexionsgesetz (Einfallswinkel = Ausfallswinkel). Ziel bei Fotoaufnahmen für einen 3D-Scan ist es, eine direkte Spiegelung der Lichtquelle zur Kamera zu vermeiden oder herauszufiltern, da sie die eigentliche Farbe des Materials überstrahlt.

Reflexion auf Metalloberflächen

Metallische Oberflächen reflektieren das Licht fast ausschließlich spiegelnd. Es kann die Oberfläche kaum durchdringen.

Da es kaum diffuse Anteile gibt, erhält das Material darüber auch keine Farbe. Die meisten Metalle sind farblos. Kupfer, Gold und einige Legierungen erhalten ihren Farbeindruck dadurch, dass bei der Reflexion ein geringer Teil des Lichts einer bestimmten Wellenlänge absorbiert wird und die Farbe sich aus der Mischung der übrigen Lichtanteile ergibt (Komplementärfarbe). Gold absorbiert einen Blauanteil des Lichts und erscheint daher gelb.

An der Polarisation des Lichts ändert sich bei der Reflexion auf Metall nichts. Unpolarisiertes Licht bleibt unpolarisiert und polarisiertes Licht behält seine Ausrichtung bei. Filtert man bereits polarisiertes Licht durch einen weiteren Polfilter an der Kamera, werden nicht nur die störenden Glanzlichter entfernt, sondern die Oberfläche verdunkelt sich bis hin zu schwarz, da das Metall keine diffuse, unpolarisierte Farbreflexion aufweist (siehe Bildvergleich).

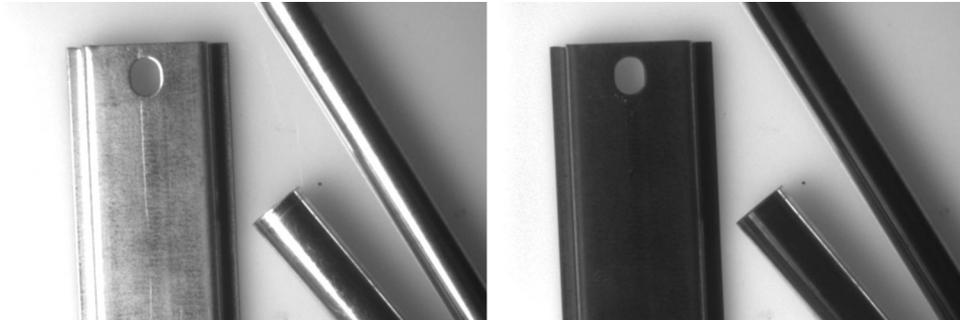


Abbildung 21: Einsatz von Polarisationsfiltern bei Metalloberflächen, Foto: www.vision-doctor.com

Reflexion auf Nicht-Metalloberflächen

Bei glatten, nicht-metallischen Oberflächen (Kunststoff, Glas, Wasser) kommt es bei der gerichteten Reflexion zu einer teilweisen Polarisation. Sie ist abhängig vom Reflexionswinkel und erreicht ihr Maximum im sogenannten Brewster-Winkel, der materialspezifisch ist.

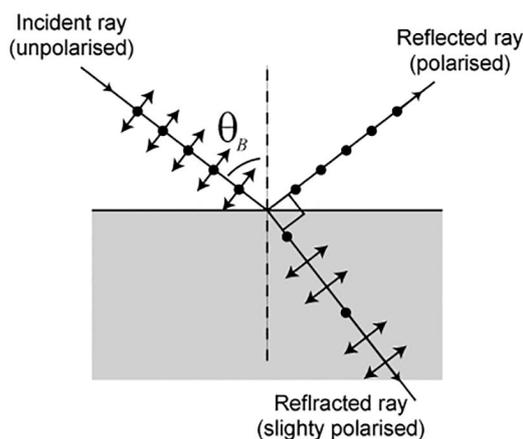


Abbildung 22: teilweise Polarisierung an nichtmetallischer Oberfläche, Grafik: Wikimedia, Public Domain

Dieser polarisierte Anteil kann durch einen Polfilter an der Kamera herausgefiltert werden, so dass die Glanzlichter auf der Oberfläche reduziert werden können. Übrig bleibt im Idealfall nur die Materialfarbe im diffusen Licht.

2.7.2. Abgeschattete Bereiche

Ein weiteres Problem sind die Oberflächen, die vom Scanner nicht erfasst werden können, da durch die Verdeckung durch andere Objektteile keine direkte Sicht auf sie möglich ist.

Bei der Triangulation wird dieses Problem noch deutlicher, da immer mindestens zwei Kameras freie Sicht auf den zu erfassenden Oberflächenpunkt haben müssen. Alle Flächen werden ignoriert, die zwar von einer Kamera eingesehen werden können, aber nicht von der anderen. Dieses Problem betrifft besonders Streifenlichtscanner, wo die Berechnung nach jeder Aufnahme eines fixen

Kamerapaars durchgeführt wird. Bei der Photogrammetrie ist es etwas entspannter, da die Software flexibler nach identischen Punkten über mehrere Aufnahmen hinweg suchen kann.

Lücken in der gescannten Oberfläche können von der Software geschlossen werden. Allerdings kann der Algorithmus nur Vermutungen über den Flächenverlauf anstellen, basierend auf den Verlauf der anliegenden bekannten Flächen. Dies kann das Ergebnis gegenüber dem Originalzustand verfälschen.

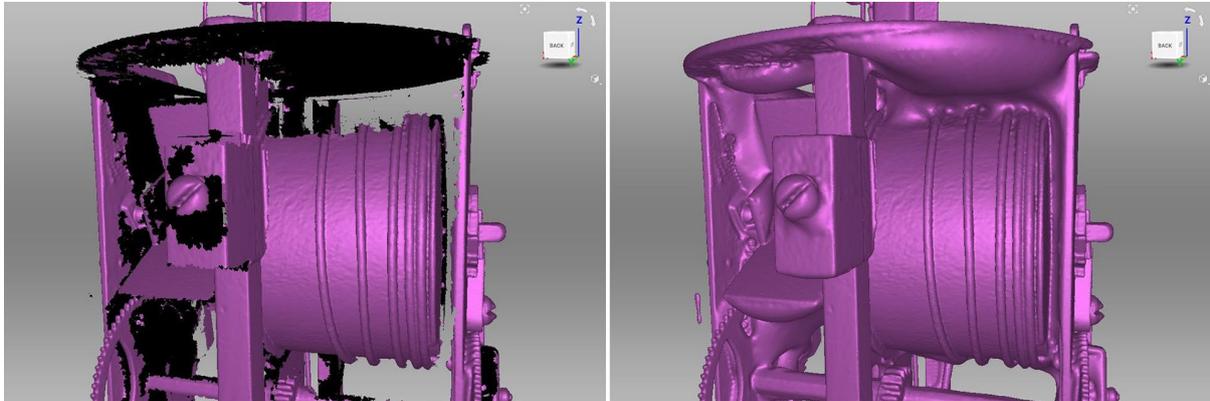


Abbildung 23: automatische Schließung von Scanlücken, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

2.7.3. Dunkle Oberflächen

Probleme tauchen bei dunklen Oberflächen auf, wo zu wenig Licht reflektiert wird und dadurch der Helligkeitskontrast zu gering ausfällt. Dies kann bei für sich dunklen Materialien der Fall sein oder in schwach ausgeleuchteten Bereichen, die sich im Schatten der Beleuchtung befinden. Daher wäre es günstig, die Hauptbeleuchtung aus der Richtung der Kamera scheinen zu lassen, um alle für die Kamera relevanten Bereiche zu erfassen. Dafür können zum Beispiel Ringblitze eingesetzt werden. Problematisch sind dabei jedoch auftretende spiegelnde Reflexionen, die man mit Polfiltern abschwächen muss. Da der Einsatz von Polfiltern die Intensität des an der Kamera ankommenden Lichts stark reduziert, kann es sein, dass ein einzelner Ringblitz nicht genug Licht erzeugt. Zusätzliche Lichtquellen erzeugen dann jedoch wieder die Probleme mit Schatten und weiteren ungewünschten Reflexionen.

2.7.4. Transparente Oberflächen

Transparente Oberflächen werden im günstigsten Fall ignoriert, führen jedoch häufig zu fehlerhaften Messungen und Artefakten. Problematisch sind hinter den transparenten Teilen befindliche opake Bereiche, die ebenfalls fehlerhaft erfasst werden.

2.7.5. Einsatz von Mattierungssprays

Der Einsatz von Mattierungsspray kann eine Lösung für viele dieser Probleme darstellen. Es kann Spiegelungen an Oberflächen reduzieren, dunkles Material aufhellen, transparente Stellen abdecken. Viele dieser Sprays sind allerdings für die Anwendung im musealen Bereich problematisch. Kreidespray zum Beispiel lässt sich, ohne dass man den Belag wieder abwäscht, nicht rückstandslos entfernen. Es bleiben Reste an Ecken und in Ritzen übrig, die Feuchtigkeit ziehen. Das wiederum befördert Korrosion am Objekt.

Es gibt Sprays, die selbst verflüchtigend sind. Eine solche Substanz ist Cyclododecan, welche in der Restauration eingesetzt wurde, um Objekte vor möglichen Transportschäden zu sichern, oder empfindliche Teile von Objekten zu schützen, während andere Bereiche bearbeitet werden. Dieses Mittel war ursprünglich nicht für die Verwendung in Scansprays vorgesehen und ließ sich auch nur

etwas grobkörniger auf Oberflächen auftragen als dezidierte Scansprays, aber man konnte es bedenkenlos im musealen Bereich verwenden, um Objekte für einen 3D-Scan vorzubereiten. Je nach Schichtdicke verflüchtigte sich der Stoff nach wenigen Stunden oder Tagen.

Leider wird Cyclododecan nicht mehr hergestellt. Es war lediglich ein Nebenprodukt in der Nylonproduktion. Mit Umstellungen im Produktionsverfahren fällt dieser Stoff nun nicht mehr an. Seitdem werden nur noch Restbestände für Restaurationswerkstätten verkauft.

Es gibt sich verflüchtigende Scansprays im industriellen Bereich, zum Beispiel Aesub Blue (www.aesub.com). Ob und welche dieser Substanzen im musealen Umfeld eingesetzt werden können, wird sich im Laufe der Zeit noch herausstellen müssen.

Diese Sprays sind allerdings weiß deckend. Man erkaufte sich somit die verbesserte Qualität der 3D-Geometrie durch das Fehlen einer fotografierten Farbtextur. Diese Materialtexturen können separat neu erzeugt werden, geben dann jedoch nicht das Original wieder.

2.8. Weitere Informationen

<https://www.aniwaa.com/guide/3d-scanners/3d-scanner-buying-guide/>

https://en.wikipedia.org/wiki/Diffuse_reflection

[https://en.wikipedia.org/wiki/Polarization_\(waves\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Polarization_(waves))

<http://fotovideotec.de/polfilter/index.html>

<https://www.vision-doctor.com/beleuchtung.html>

<https://www.vision-doctor.com/polarisationsfilter.html>

3. Durchführung von 3D-Scans

Im folgenden Abschnitt werden Anwendungsszenarien beschrieben anhand von Beispielen am Deutschen Museum mit den dort zur Verfügung stehenden Methoden. Bei einigen Objekten wurden mehrere Scans mit unterschiedlichen Methoden durchgeführt, um die Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Da wir uns bezüglich des 3D-Scans noch in einer Aufbauphase befinden und die beschriebenen Methoden zum Teil erstmalig durchführten, wurde noch oft Verbesserungspotential bei der Durchführung identifiziert. Daher sind die hier aufgeführten Vergleiche nur bedingt aussagefähig in Bezug auf die erreichbare Qualität der jeweiligen Scanmethode.

3.1. Beispiel: Automatenfigur Predigender Mönch – Verdeckte Flächen



Abbildung 24: Automatenfigur Predigender Mönch, Foto: Konrad Rainer, Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Abbildung 25: Predigender Mönch, Kleid getrennt von Mechanik, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Diese sehr frühe Automatenfigur aus dem 16. Jahrhundert, zu der nur wenige vergleichbare Stücke bekannt sind, zeigt eine Vielzahl von periodisch ablaufenden Einzelbewegungen: Arme, Füße und der Kopf bewegen sich, zudem rollen die Augen und der Mund öffnet sich. Dazu ist eine Feinmechanik notwendig, die unter dem Holzgehäuse dieser ca. 40 cm hohen Figur untergebracht ist. Das führt zu sehr vielen Verschattungen bei einem 3D-Scanvorgang.

In unserem Fall war es möglich, das Gehäuse und die Mechanik getrennt voneinander zu scannen. Jeder Scan für sich hatte zwar ebenfalls noch viele Verschattungen, jedoch sind die meisten davon im finalen zusammengesetzten Modell selbst nicht mehr einsehbar.

3.1.1. Artec Space Spider (Streifenlicht handgeführt)

Der Space Spider der Firma Artec (www.artec3d.com) ist ein handgeführter Streifenlichtscanner, der eine Auflösung von bis zu 0,1 mm erreicht, je nach Abstand zum Objekt, der zwischen 20 und 30 cm liegen muss. Zusammen mit dem erfassten Blickwinkel (Höhe 30°, Breite 21°) ergibt sich ein relativ kleines Messfeld (bis zu 18 cm x 14 cm), für das aufgrund der hohen Auflösung allerdings sehr große Datenmengen aufgenommen werden.

Die empfohlene Objektgröße ist daher auf einen Durchmesser von bis zu 50 cm begrenzt. Größere Objekte sind möglich, stellen jedoch hohe Anforderungen an die Rechnerleistung.



Abbildung 26: Predigender Mönch gescannt mit Artec Space Spider, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Der Scanner ist während der Aufnahme über Kabel direkt mit dem Rechner verbunden, wo die zugehörige Software „Artec Studio“ das Gerät steuert und die Daten verarbeitet. Die während eines Scandurchlaufs aufgenommenen Einzelscans werden in Echtzeit positioniert, indem die Punktwolken passend übereinandergelegt werden. Je nach Dauer des Durchgangs besteht der Roh-Scan aus hunderten oder tausenden Einzelaufnahmen (Frames).

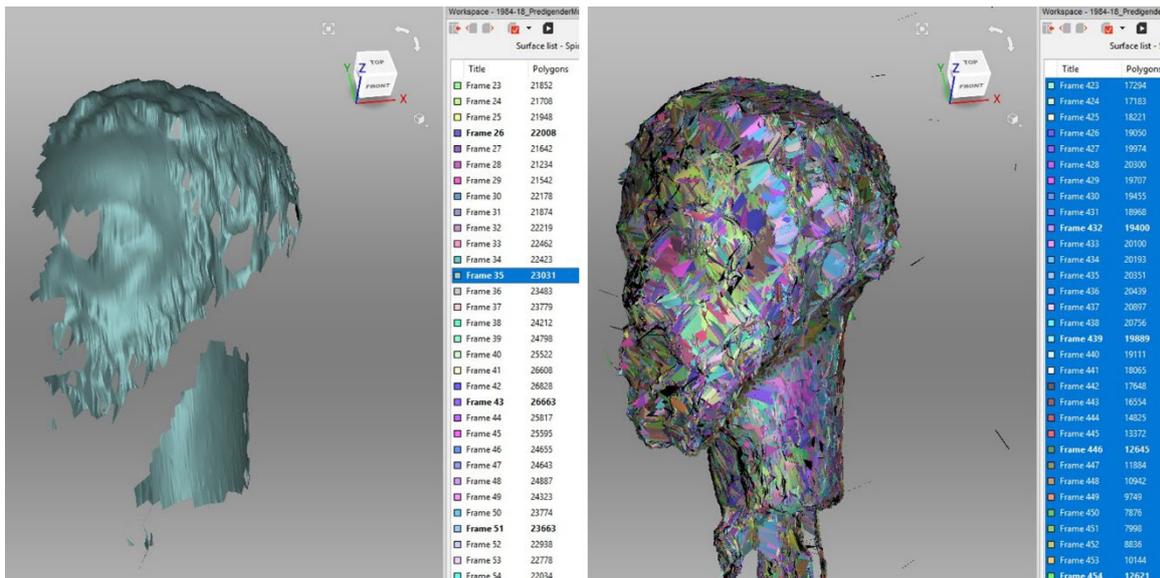


Abbildung 27: Rohscan-Ansicht in ArtecStudio, Einzelframe (links) und alle Frames (rechts), Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Die Nachbearbeitung in der Scansoftware beinhaltet im Wesentlichen folgende Schritte:

- im Fall, dass mehrere Scandurchläufe nötig waren, um das gesamte Objekt zu erfassen, werden die Scans passend zusammengefügt (Alignment). Dies geschieht automatisiert oder mit manueller Unterstützung.
- Eine nachträgliche Feinpositionierung der einzelnen Aufnahmen über den gesamten Scan (Registrierung). Hierbei kann es vorkommen, dass sich die Position einiger Frames gegenüber der ersten Ausrichtung während des Scans sogar sichtbar verschlechtert. Bekommt man dies nicht in den Griff, kann man auch einzelne Frames aus der Aufnahme löschen. Es gibt meistens genügend Redundanz. Die Identifikation dieser Frame ist jedoch mühsam.
- Stark abweichende Punkte werden als Ausreißer entfernt (Outlier removal).
- Alle Frames werden zu einem einzigen Mesh verschweißt (Fusion). Hier hat man erstmals die Möglichkeit, die Auflösung, also den Abstand der Punkte auf der resultierenden Oberfläche neu einzustellen. Hier erhält man das erste Ergebnis aus dem Scanvorgang, das als 3D-Modell exportiert werden könnte.

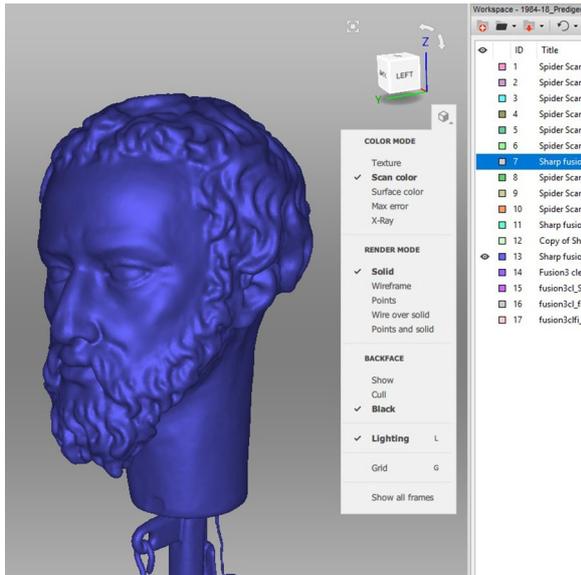


Abbildung 28: 3D-Modell nach Fusion der Scanframes, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Die weiteren Schritte sind optional:

- Schon vor dem Fusions-Schritt können Bereiche des Scans, die nicht in das Ergebnis eingehen sollen, selektiert und gelöscht werden.
- Beim Scan durch Abschattungen oder reflektierende Oberflächen entstandene Lücken können geschlossen werden, automatisiert oder mit händischer Unterstützung.
- Fehlerhafte Geometrie kann mit einer begrenzten Zahl von Werkzeugen nachbearbeitet werden.
- Die Anzahl der Polygone, aus denen das 3D-Modell besteht, kann weiter reduziert werden.
- Die Farbaufnahmen werden zu einer Textur zusammengefügt und auf das 3D-Modell gelegt.

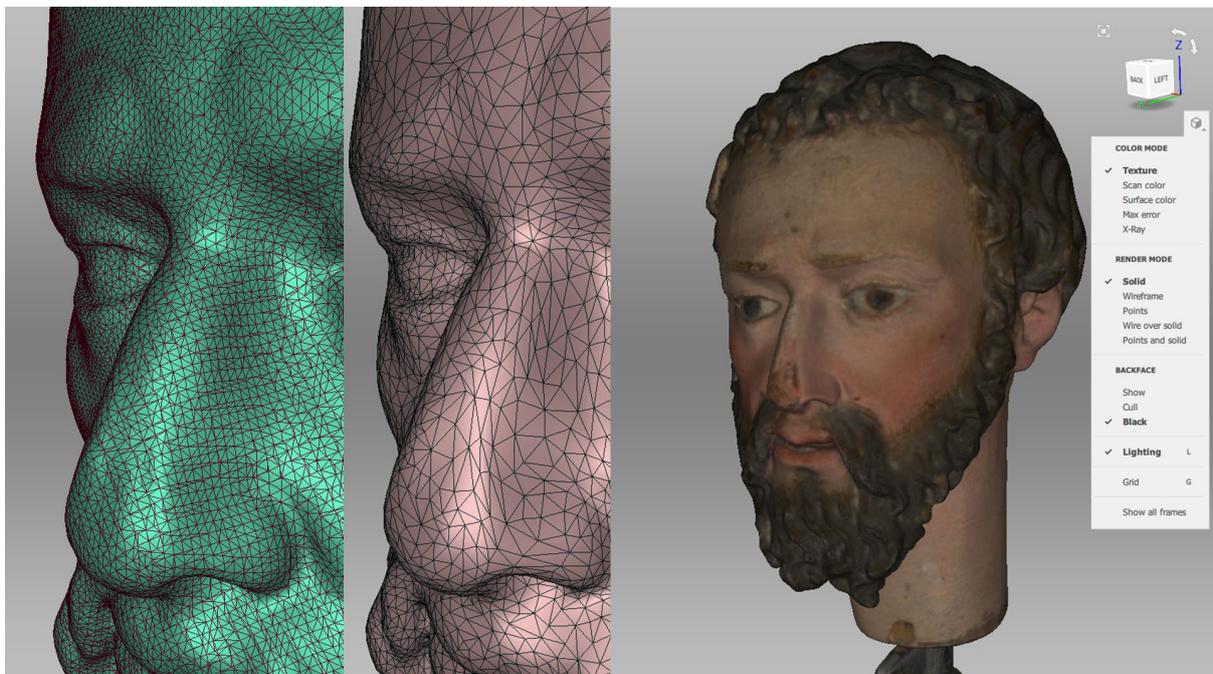


Abbildung 29: Polygonreduzierung und Texturierung, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

3.1.2. Zeiss RealScan (Streifenlicht stationär)

Das RealScan-System der Firma ZEISS ist ein stationärer Streifenlichtscanner aus drei parallelen Scaneinheiten, die jeweils aus Projektor, zwei Schwarz-Weiß-Geometriekameras und einer hochauflösenden Farbkamera bestehen. Das zu scannende Objekt befindet sich dabei auf einem automatischen Drehteller aus Glas. Somit kann auch die Unterseite des Objektes erfasst werden. Das Objekt wird in einem Durchlauf komplett gescannt und muss nicht mehr gewendet werden. Daher lassen sich auch flexible Objekt damit erfassen, die bei einer Umpositionierung ihre Form ändern würden. Die Objektgröße ist systemseitig auf ca. 50 cm begrenzt.

Da nicht mehr die Notwendigkeit besteht, das Objekt zu wenden und einen weiteren Umlauf zu starten, ist die weiterbearbeitende Software auch gar nicht dafür ausgelegt. Man ist auf die einmalige Erfassung mit den drei verfügbaren Scaneinheiten beschränkt, auch wenn man sich in vielen Fällen zusätzliche Scanpositionen gewünscht hätte, um die Oberfläche aus weiteren Blickwinkeln zu erfassen.

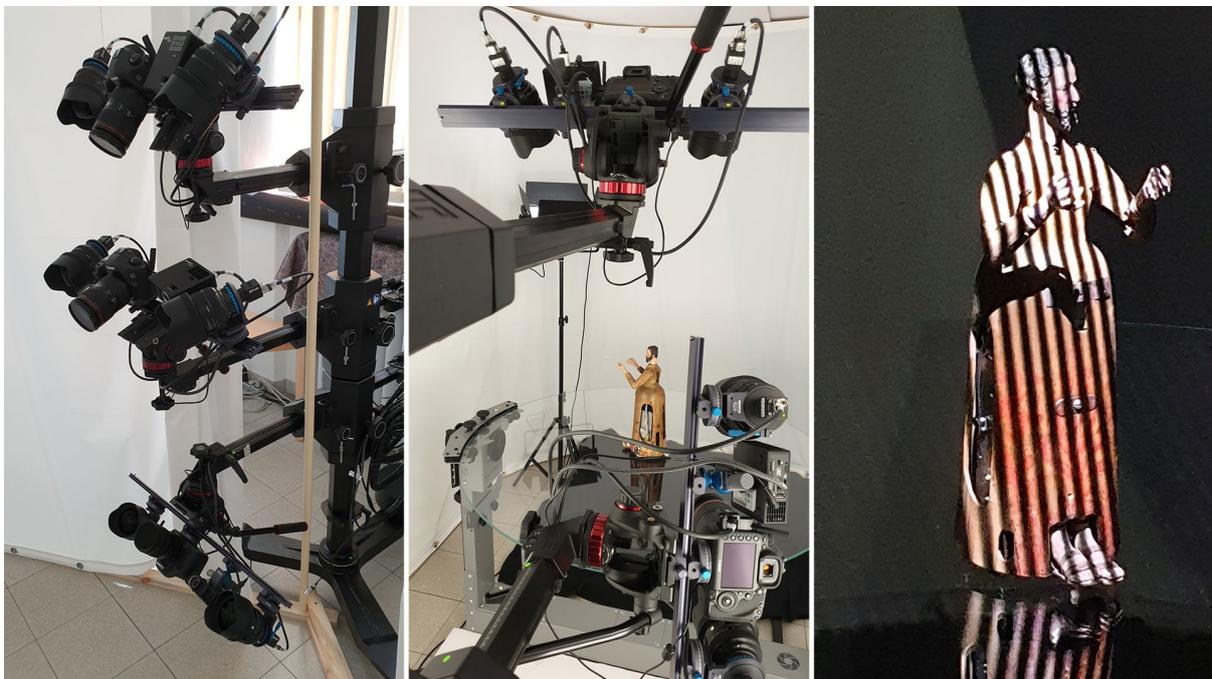


Abbildung 30: ZEISS RealScan scannt Predigenden Mönch , Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Eine Besonderheit dieses Systems gegenüber den meisten anderen Scannern ist die Möglichkeit, neben der einfachen Farbtextur noch weitere Texturkanäle nach dem Standard der PBR-Pipeline (Physical Based Rendering) zu erstellen. So werden aus den hochaufgelösten Scandaten Normalmaps berechnet, die dem später stark reduzierten 3D-Modell scheinbar Details zurückgeben. Während des Scans werden zahlreiche Aufnahmen unter verschiedenen Lichtsituationen gemacht, womit die Reflektionseigenschaft der Oberfläche ermittelt wird, was in eine Metalness- und eine Roughness-Textur einfließt. Die Ergebnisse sind beim Vergleich mit der Originalfläche nicht 100-prozentig nachvollziehbar, aber es wird trotzdem ein realistisch anmutender Gesamteindruck erzielt. Ein Resultat wie aus einem speziellen Materialscanner kann man bei diesem Aufbau nicht erwarten.

Durchführung

Nach dem aufwendigen Kalibrierungsvorgang läuft der weitere Scanprozess automatisch ab. Möchte man weitere Objekte mit ähnlichen Maaßen und Materialien scannen, benötigt man keine erneute

Kalibrierung. Daher bedeutet es eine große Zeitersparnis, ähnliche Objekte hintereinander zu scannen.

Während das nächste Objekt aufgenommen wird, kann parallel dazu die Berechnung eines 3D-Modells aus den Scandaten des Vorgängers durchgeführt werden. Hier gibt es nur wenige Einstellmöglichkeiten, der Prozess läuft vollautomatisch und als Ergebnis erhält man ein in der Polygonanzahl stark reduziertes, texturiertes Modell, bereit für den Upload in einen Webviewer.

Der Versuch, aus den sehr hoch aufgelösten Aufnahmedaten ein ebenfalls hochaufgelöstes 3D-Modell zu erhalten, vergleichbar mit den Zwischenergebnissen anderer Scanner, scheitert regelmäßig am Absturz der Software, die für einen solchen Vorgang scheinbar nicht optimiert ist und den Rechner überlastet.

Ergebnis und Beurteilung



Abbildung 31: Predigender Mönch, Ergebnis mit ZEISS RealScan, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Wie zu erwarten gibt es bei diesem Objekt viele Bereiche, die der Scanner nicht einsehen kann, so dass viele Lücken beim Scan entstehen. Während der Berechnung des 3D-Modells werden diese Lücken vollständig geschlossen. Da der Vorgang automatisch bis zum Endergebnis abläuft, hat man keine Gelegenheit, manuell Korrekturen an den 3D-Oberflächen vorzunehmen. Die einzige Alternative wäre, die Rekonstruktion komplett ohne das Schließen von Löchern durchführen zu lassen. Damit würden jedoch auch die Texturen an diesen Stellen nicht erzeugt, so dass eine nachträgliche Bearbeitung in einem anderen Programm ebenfalls problematisch ist.

Das ZEISS RealScan System wurde primär im Hinblick auf das vollautomatische und effiziente Scannen von Konsumgütern entwickelt. Die 3D-Modelle sollen schnell verfügbar sein für eine webfähige Präsentation in Internet-Shops. Daher kommt es zu einer starken Reduzierung der Polygonzahl, auf die man nur begrenzt Einfluss hat, da das System die Rechnerkapazität stark beansprucht. Die Qualität der Geometrie ist für die Darstellung kurzlebiger Konsumgüter absolut ausreichend und wird durch eine gute Farbtextur stark aufgewertet. Je nach Objektart lassen sich auch für Museen ansprechende Ergebnisse erzielen. Organische Formen wie Büsten, Keramiken und Skeletteile verzeihen automatische Geometriereduzierung eher als technische, scharfkantige Objekte. Glänzende und transparente Oberflächen verursachen wie bei allen anderen Scannern auch hier Probleme, diese werden aber auf den ersten Blick relativ gut gelöst. Eine Nachbearbeitung der fehlerhaften Stellen vor einer Berechnung der Texturen ist allerdings nicht möglich, da die Rekonstruktion des 3D-Modells ausschließlich automatisiert abläuft.

Die Darstellung der PBR-Texturen blieb bisher hinter unseren Erwartungen zurück. Da sollten jedoch mit Änderungen beim Aufbau der Beleuchtung noch Verbesserungen möglich sein. Hier werden noch Erfahrungen zu sammeln sein.

Der Scanner befand sich noch in der Entwicklungsphase, aber schon lauffähig, als das Deutsche Museum ein Exemplar erhielt. Ziel war es, durch Feedback aus einem musealen Anwendungsbereich Einfluss auf die weitere Entwicklung dieses vielversprechenden Systems in Bezug auf die Darstellungsqualität und Performance zu nehmen.

Leider wurde die Weiterentwicklung des RealScan-Systems kurz nach unserer Anschaffung eingestellt. Die Option einer Rückgabe des Leihgeräts haben wir abgelehnt, da der Scanner weiterhin voll funktionsfähig bleibt. Zudem lassen sich die hochwertigen Komponenten auch für andere Zwecke einsetzen.

3.1.3. Photogrammetrie

Für die Aufnahmen wurde ein Phase One IQ150 Mittelformat-Rückteil verwendet, die zu dem Zeitpunkt im Museum für die Objektfotografie eingesetzt wurde. Sie erzeugt 50-Megapixel-Bilder. Eine Herausforderung für die Photogrammetrie ist die mit dieser Kamera verwendete Optik, welche nur eine geringe Tiefenschärfe ermöglicht, die durch eine zeitaufwendige Kombination mehrerer Aufnahmen erweitert wird. Bei der in der Photogrammetrie zu erwartenden hohen Anzahl an benötigten Bildern ist ein solches Setup keine langfristige Lösung und wird daher nur in diesem Beispiel verwendet.

Durchführung

Das Objekt wurde im Fotostudio auf einen Drehteller positioniert und mit dem vorhandenen Equipment gleichmäßig ausgeleuchtet. Das Ziel ist ein möglichst flach erscheinendes Bild ohne Schatten. Dies ist eine neue Situation für den Fotografen, der es im Gegensatz dazu gewohnt ist, mit Licht und Schatten die Form eines Objektes herauszubilden. Aus drei Kamerapositionen wurden jeweils 24 Aufnahmen während eines Drehtellerumlaufs erstellt. Aus zeitlichen Gründen musste auf die separate Aufnahme der Mechanik und des Gewandes verzichtet werden, so dass die Mönchsfigur nur als Ganzes gescannt werden konnte.

In der Software Metashape von Agisoft wurden die weiteren Prozessschritte, von der Berechnung der Kameraperspektiven bis zur Texturierung des fertigen 3D-Modells, durchgeführt.

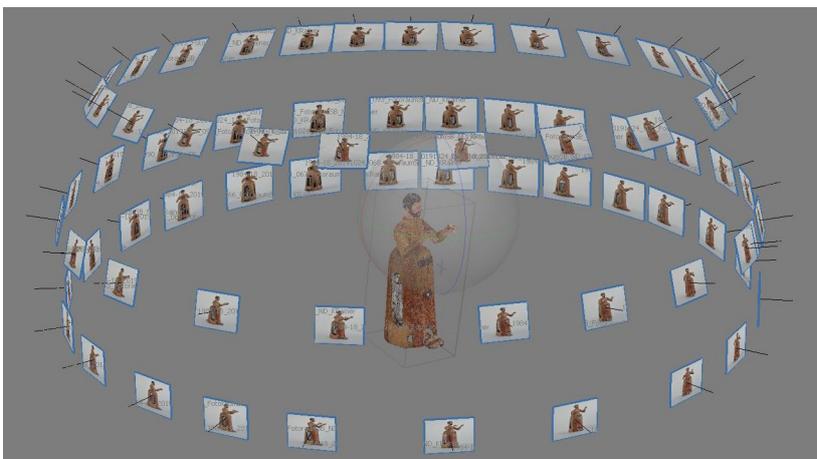


Abbildung 32: Predigender Mönch, Photogrammetrie Kamera-Alignment, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Ergebnis und Beurteilung

Die Oberflächengeometrie des 3D-Modell zeigt sich im Ergebnis an einigen Stellen stark verrauscht. Dies deutet darauf hin, dass die Software Probleme damit hatte, identische Punkte über mehrere Bilder eindeutig zu identifizieren. Vermutlich war die Tiefenschärfe nicht ausreichend. Texturiert fällt dieser Effekt nicht sofort ins Auge. Zusätzliche Bildreihen hätten hier das Ergebnis verbessern können. 72 Bilder, wie in diesem Beispiel, sind für die Photogrammetrie nicht viel.

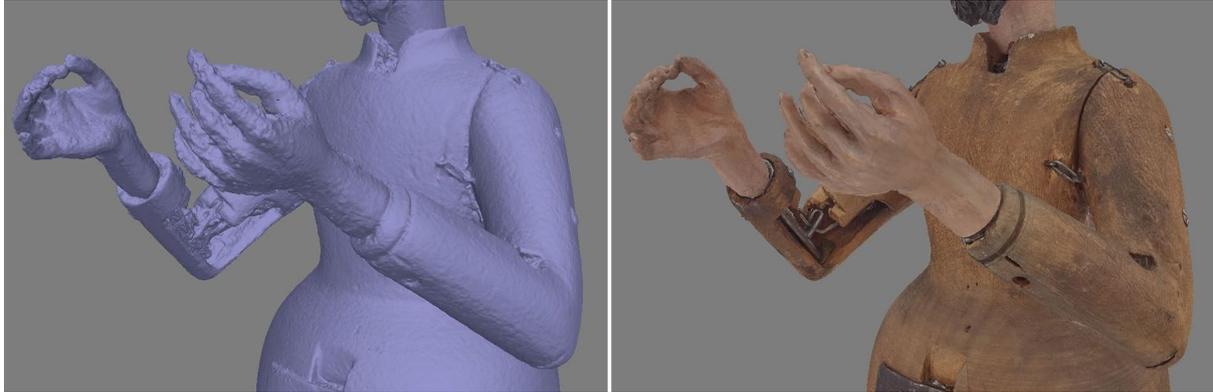


Abbildung 33: Ergebnis Photogrammetrie, verrauschte Oberfläche, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Lücken in den 3D-Oberflächen durch Verschattungen treten auch hier auf, allerdings im geringeren Umfang als bei den zuvor betrachteten Verfahren mit Streifenlichtprojektion. Ein automatisches Verschließen der Lücken führt daher zu einem etwas besseren Ergebnis. Die in diesem Beispiel angezeigte Textur deutet darauf hin, dass bei den Fotoaufnahmen das Objekt nicht ausreichend ausgeleuchtet war. In den dunklen Bereichen hatte die Software kaum die Möglichkeit, markante Punkte zu identifizieren.



Abbildung 34: Scanlücken, automatischen Schließung in Agisoft Metashape, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Das Ergebnis zeigt, wie wichtig eine gute, an die Bedürfnisse der Photogrammetrie ausgerichtete Aufnahme des Objektes ist. Dabei kommt es in erster Linie nicht auf eine maximale Bildauflösung, sondern auf ein durchgängig scharfes, kontrastreiches und gleichmäßig ausgeleuchtetes Bild an.

3.1.4. Abschließender Vergleich der Methoden

Auch wenn bei der Durchführung dieser Scans nicht jede Methode unter optimalen Bedingungen durchgeführt wurde, lassen sich einige Vergleiche ziehen.

So ist abzusehen, dass die Photogrammetrie den größten Arbeitsaufwand erfordert, während das stationäre System mit mehreren parallel arbeitenden Scaneinheiten und dem vollautomatischen Prozessablauf die schnellste Option darstellt.

Bezüglich der Texturqualität kann die Photogrammetrie ihren Vorteil ausspielen, Aufnahmen von hochwertigen Kameras unter Studiobedingungen verwenden zu können. Missglückte Aufnahmen können aussortiert werden.

Der Handscanner kommt nicht an eine vergleichbare Auflösung heran und die gesamte Textur wirkt insgesamt unschärfer. Die Kamera ist für einen idealen Arbeitsabstand eingestellt, der nicht immer eingehalten werden kann. So gelangen Aufnahmen unterschiedlicher Qualität in den Prozess zur Generierung der Textur.

Die hochauflösenden Farbkameras des ZEISS RealScan (Canon 5DS R) haben ebenfalls hohes Potential, besser als es in diesem Beispiel gelungen ist. Allerdings ist auch die Einstellung des Systems auf das jeweilige Objekt schwieriger.



Abbildung 35: Ergebnis-Vergleich Photogrammetrie (links), RealScan (mitte), Space Spider (rechts), Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

3.2. Beispiel: Spiegelsextant von Brander & Höschel – glänzende Oberflächen



Abbildung 36: Spiegelsextant von Brander & Höschel, Foto: Konrad Rainer, Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Dieses Instrument aus dem Jahr 1783 dient zum Messen der Winkel zwischen Landmarken und Himmelskörpern. Es besteht aus Messing, ist mit einem Holzgriff versehen und eingefassten Spiegeln und Linsen. Es wurde zum Vergleich mit den beiden Streifenlichtscannern Artec Space Spider und ZEISS RealScan aufgenommen. Der Fokus lag hier auf die Qualität bei der Erfassung der glänzenden Metalloberfläche.

3.2.1. Artec Space Spider

Durchführung

Beim Scannen von stark reflektierenden Objekten ist es laut Ratschlägen des Herstellers wichtig, dass der Scanner möglichst senkrecht über die Oberflächen geführt wird. Dies lässt sich mit dem geringen diffusen Anteil an der Reflektion erklären. Der Scanner ist auf die spiegelnde Reflexion angewiesen, um etwas von dem ausgesandten Lichtmuster zurück zu bekommen, mit allen störenden Nebeneffekten. Je flacher der Winkel wird, desto mehr Zeit benötigt der Scanner, um eine geschlossene Fläche zur erfassen, bis es schließlich gar nicht mehr funktioniert.

Aus diesem Grund muss der Sextant häufig gewendet werden, um einen ausreichenden Zugang zu allen Bereichen zu ermöglichen. Hat man es dann mit einem Objekt aus mehreren Komponenten zu tun, dessen Verbindungen etwas locker sind, führt dies zu Problemen beim späteren Zusammenführen der einzelnen Scandurchläufe. Schon Abweichungen von wenigen Millimetern führen zu doppelten Flächen, die nicht mehr zusammengeführt werden können. So kann es wie in diesem Beispiel mehrere Anläufe benötigen, bis eine Serie von zueinander passenden Scans erstellt wird.

In Bereichen von transparenten Materialien kommt es unweigerlich zu Lücken im Scan, die beim Fusionieren der Einzelscans zum finalen Mesh geschlossen werden. Diese dadurch deformierten Stellen lassen sich manuell bis zu einem gewissen Grad in der Scansoftware korrigieren. Dies geschieht allerdings nach Augenmaß und im Rahmen der vorhandenen Möglichkeiten durch die zur Verfügung stehenden Werkzeuge.

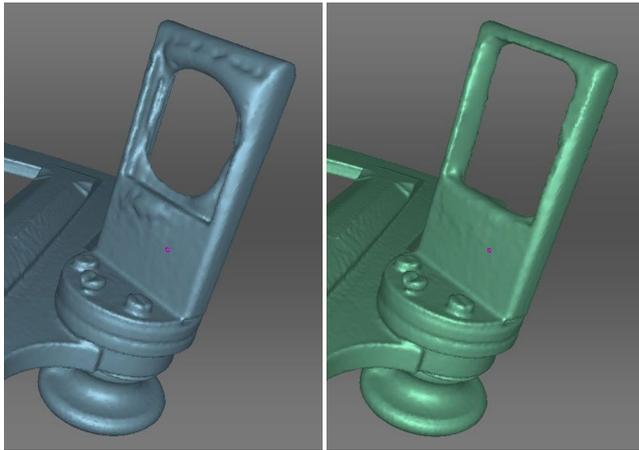


Abbildung 37: manuelle Korrektur von Fehlstellen in ArtecStudio, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Ergebnis und Beurteilung

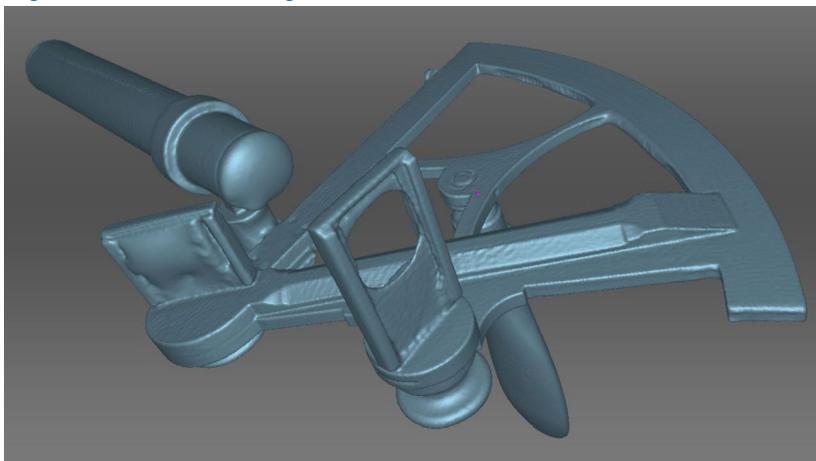


Abbildung 38: Ergebnis mit Artec Space Spider: leicht verrauschte Oberfläche, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Neben den offensichtlichen Fehlstellen dort, wo im Original Glas- und Spiegelflächen verbaut sind, fällt die angeraute Oberfläche der Metallteile auf. Der gescannte Holzgriff erscheint glatter als das Messing. Im texturierten Zustand fällt das jedoch nicht unbedingt auf. Erst eine entsprechende Beleuchtung in der 3D-Szene könnte diese Unebenheiten wieder deutlich machen. Man kann dies jedoch bei einer Visualisierung umgehen.

3.2.2. Zeiss RealScan

Durchführung

Anders als bei einem handgeführten Scanner, wo man während des Scanvorgangs über die Software direktes Feedback zu noch fehlenden Flächen erhält, hat man beim RealScan-System nur die Möglichkeit, vor dem Scanvorgang die Kameras einzustellen. Hier kann man darauf achten, die Kameras so zu positionieren, so dass sie möglichst optimal auf die Oberflächen ausgerichtet sind. Dabei muss man allerdings vermeiden, unnötige Verschattungen zu erzeugen. Zudem kann man die Zahl der Aufnahmestopps während des Drehtellerrundlaufs erhöhen, um die Wahrscheinlichkeit passender Aufnahmewinkel zu erhöhen.

Ergebnis und Beurteilung

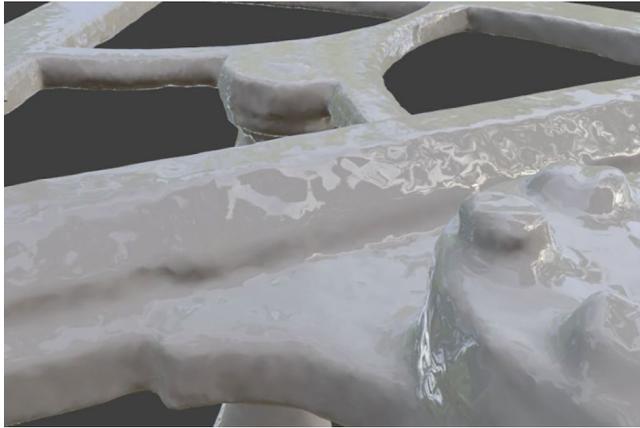


Abbildung 39: Ergebnis mit RealScan; stark abgerundete Kanten, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Hier tritt das Problem der unebenen Oberflächen und abgerundeten Kanten im Scanergebnis deutlicher auf als beim Scan mit dem Artec Space Spider. Allerdings hat der Vorgang mit dem handgeführten Gerät deutlich länger gedauert.

3.2.3. Vergleich der Ergebnisse

Während in Bezug auf die Qualität der Geometriedarstellung der Space Spider ein besseres Ergebnis liefert (aufgrund der generell höheren Auflösung des Fusionsergebnisses), macht dagegen die vom RealScan erzeugte Textur einen besseren Eindruck. Hier ist zum Beispiel eindeutig die Beschriftung der Winkelanzeige erkennbar, im anderen Beispiel nicht mehr.

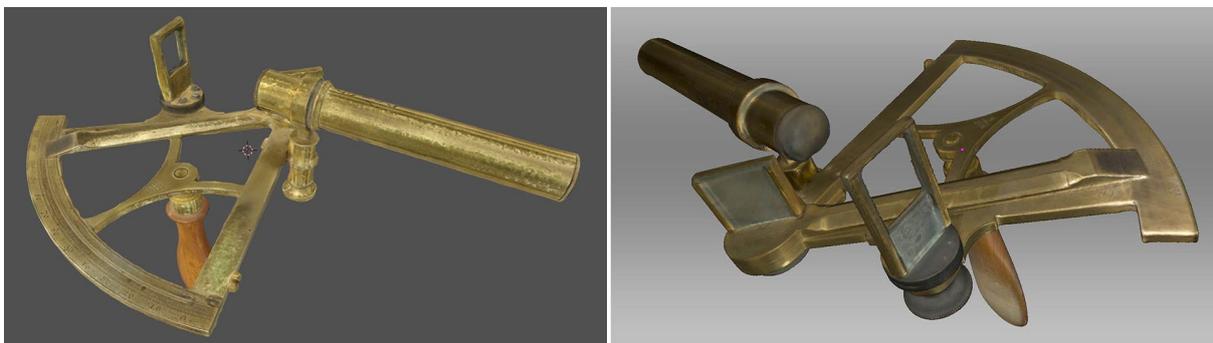


Abbildung 40: Vergleich der Ergebnisse: RealScan (links), Space Spider (rechts), Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Problematisch bei der Texturerzeugung von glänzenden Oberflächen ist die Übernahme von Glanzlichtern in die Textur. Dabei werden Glanzpunkte aus mehreren Perspektiven auf der Oberfläche verewigt, unabhängig davon, wie das Objekt im 3D-Viewer betrachtet wird.

Die Software für den Space Spider von Artec bietet eine Option zur automatischen Glanzreduzierung während der Berechnung der Farbtextur. Dadurch erscheint allerdings die Textur insgesamt etwas weichgezeichnet und es kann Bereiche geben, wo die Farbe ausgewaschen wirkt (siehe Holzgriff im Beispiel), was ein Hinweis auf zu wenige Farbaufnahmen ist.

Der ZEISS RealScan verwendet Polarisationsfilter an den Objektiven der Farbkameras, um Glanzeffekte zu verringern. Besonders wirkungsvoll ist dieser einfache Filter bei Metalloberflächen allerdings nicht. Zusätzliche Filter an den Lichtquellen für eine effektivere Kreuzpolarisation sind nicht vorhanden. Sie wären auch nicht wirksam, da das meiste Licht indirekt auf das Objekt fällt, womit eine Polarisation an den diffusen Reflektorenflächen wieder aufgehoben werden würde.

3.3. Beispiel: Dampfturbine – Photogrammetrie oder Streifenlicht?



Abbildung 41: Gleichdruck-Dampfturbine, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Die Gleichdruck-Dampfturbine des schwedischen Ingenieurs Carl de Laval aus dem Jahr 1888 ist die erste praktisch verwendbare Maschine dieser Art. Dieses Ausstellungsstück ist in einigen Bereichen angeschnitten, um dessen inneren Aufbau darstellen zu können.

Es ist vom Kuratoren-Team zur 3D-Digitalisierung ausgewählt worden, da es im Zuge der Neugestaltung der Ausstellung Teil einer Online-Präsentation werden soll. Denkbar wäre eine animierte Darstellung der Funktionsweise dieser Dampfturbine.

Die Beräumung der alten Ausstellung soll genutzt werden, das schwere Objekt von allen Seiten zugänglich zu machen, um mittels 3D-Scans eine möglichst gute Datenbasis zu schaffen. Bis es soweit ist, wird zur Vorbereitung ein Vergleich von zwei Scanmethoden durchgeführt, noch unter räumlichen Einschränkungen, da das Objekt nah an einer Wand steht. Daher kann die Rückseite nicht ganz erfasst werden. Aber es reicht für einen Vergleich der Ergebnisse.

3.3.1. Streifenlicht-Scan mit dem Artec Leo

Im ersten Test wird ein Streifenlicht-Scan mit dem handgeführten Artec Leo durchgeführt. Dieser Scanner hat einen größeren Arbeitsraum als der im vorigen Beispiel genutzte Space Spider und eignet sich daher gut für größere Objekte bis ca. 2 Meter Länge. Die Auflösung ist entsprechend etwas geringer, aber der Objektgröße angemessen. Auch die zu erwartende Farbtextur wird gegenüber dem Spider etwas geringer aufgelöst sein. Der Leo führt die Aufnahme durch, ohne dabei an einem Rechner angeschlossen zu sein, auf dem die Scansoftware läuft. Eine im Scanner integrierte Recheneinheit fügt die Aufnahmen in Echtzeit zusammen und bietet eine Vorschau auf das Ergebnis. So lassen sich noch vor Ort Fehlstellen identifizieren und Scans wiederholen. Dies macht das Gerät für einen Einsatz sehr mobil, allerdings auch spürbar schwerer als den Spider.

Die Aufnahme an diesem Beispielobjekt (Größe ca. 1.5 Meter) dauert ungefähr 20 Minuten, die Rückseite wird aufgrund der Nähe zur Wand nur unvollständig erfasst. Die anschließende Aufbereitung der Daten beansprucht den Rest des Tages.

3.3.2. Ergebnis in Artec Studio

Für den Scanner schlecht einsehbare Bereiche, in Kombination mit zum Teil glänzenden Metalloberflächen, führen zu deutlich sichtbaren Lücken im Scanergebnis. Diese lassen sich schließen, was jedoch zu sichtbaren Ungenauigkeiten führen würde. Für die zu schließenden Flächen müsste man auch Texturfarbe hinzufügen, die man von benachbarten Flächen kopieren kann, ähnlich der Stempel-Funktion in Photoshop.

3.3.3. Photogrammetrischer Ansatz

In einem zweiten Testlauf wird die photogrammetrische Methode angewandt. Für die Aufnahmen wird eine Canon Eos 5DS R Spiegelreflexkamera mit 50 Megapixel, die unserem Zeiss RealScan System entliehen wurde, und ein Objektiv mit 35 mm Festbrennweite verwendet. Neben dem Tageslicht, das über große Deckenfenster in die Ausstellungshalle gelangt, wird die Szene indirekt mit einigen LED-Flächenleuchten aufgehellt, welche auf den mit weißer Pappe ausgelegten Boden und auf die nahen Wände gerichtet sind. Ein ausreichend starker Ringblitz, mit dem man versuchen könnte, einen großen Teil der sichtbaren Schatten zu tilgen, steht zu diesem Zeitpunkt noch nicht zur Verfügung.

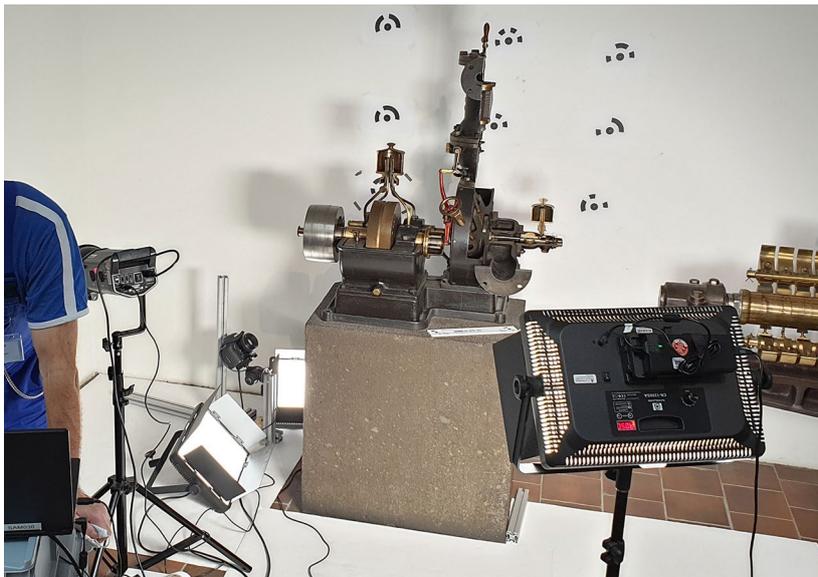


Abbildung 42: Gleichdruck-Dampfturbine, Aufnahmen für Photogrammetrie, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Mit einem ausreichend starken Blitzlicht könnte man die notwendige Belichtungszeit verkürzen. Dadurch würde eine unerwünschte Überbelichtung auf einigen Objektoberflächen, die ungünstig zum Einfallswinkel des Umgebungslichts stehen, reduziert. Bei einer Belichtung von zum Beispiel 1/125 Sekunde hat das Umgebungslicht kaum noch Einfluss auf die Aufnahme, da es nicht stark genug ist für diese kurze Belichtungszeit. Diese Einstellung ist auch noch abhängig von der eingestellten Blendenöffnung. Je höher die Blendenzahl, desto größer wird der Tiefenschärfebereich, aber umso weniger Licht kommt durch das Objektiv.

In diesem Zusammenhang redet man vom „Belichtungsdreieck“, an dessen Schaubild verdeutlicht wird, wie die Belichtungszeit, die Blendenzahl und der ISO-Wert in Bezug auf die Bildhelligkeit zusammenhängen. Eine anschauliche Erklärung findet sich zum Beispiel hier:

<https://www.pixolum.com/blog/fotografie/belichtungsdreieck>

Mit dem Polfilter am Objektiv kann man sich auf die Reduzierung der Glanzflächen konzentrieren, die durch den Blitz verursacht werden. Ohne Blitz ist vielleicht eine Belichtung von 2 Sekunden notwendig, wodurch die Oberflächen durch Lichtreflektionen aus verschiedenen Richtungen überstrahlt werden. Damit ließe sich kaum eine Filterstellung finden, die alle Reflektionen auslöscht.

Hier wird deutlich, dass die Aufnahme für die Photogrammetrie häufig ein individueller Vorgang ist, der immer wieder auf das jeweilige Objekt, die Umgebungsbedingungen und die zur Verfügung stehende Beleuchtung abgestimmt werden muss. Mit jeder Aufnahme gewinnt man neue Erfahrungen, die für die Vorbereitung des nächsten Projektes nützlich sind.

In unserem Beispiel werden ca. 500 Aufnahmen mit Stativ gemacht, was ca. 1 1/2 Tage in Anspruch nimmt. Vor der Übernahme der Bilder in die Photogrammetriesoftware werden die RAW-Aufnahmen der Kamera in Adobe Lightroom in einem Batchvorgang farbkorrigiert, wobei dunkle Bereiche aufgehellt und helle Bereiche abgedunkelt werden, um eine bessere Ausnutzung des Farbumfangs nach der Umwandlung in JPGs oder TIFFs zu erhalten. Für eine schnellere Verarbeitung in der Photogrammetriesoftware wird auf eine direkte Nutzung der umfangreicheren RAW-Daten verzichtet.

Die photogrammetrische Berechnung wird in der Software RealityCapture durchgeführt, die gut mit einer großen Anzahl Bilder klarkommt. Die automatische Berechnung der einzelnen Aufnahmepositionen ist in der Lage, bereits 420 von 501 Bildern miteinander zu verbinden. Durch das manuelle Setzen von 19 Kontrollpunkten werden schließlich fast alle Bilder in die Berechnung einbezogen.

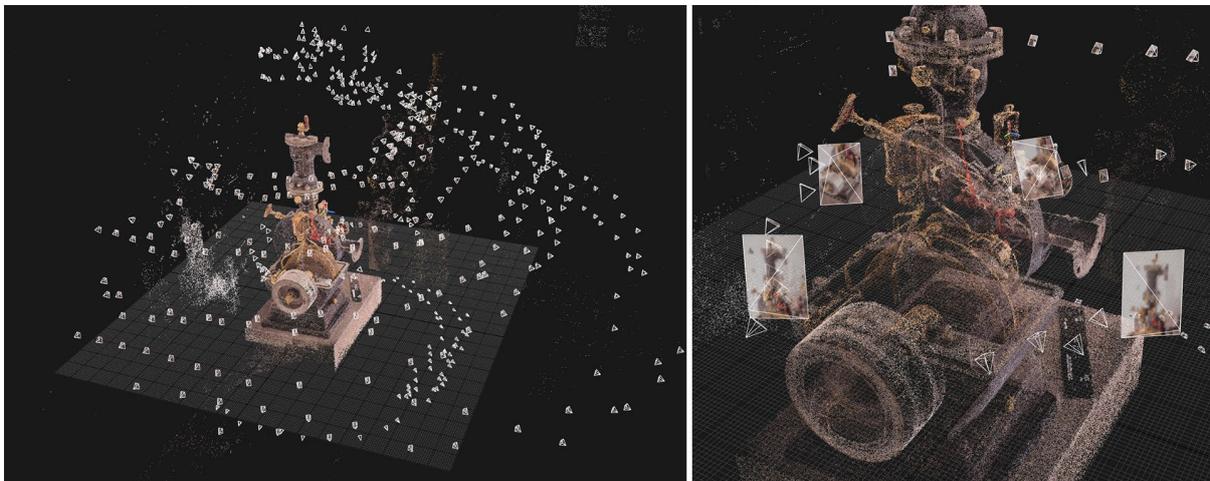


Abbildung 43: Gleichdruck-Dampfturbine, Alignment in RealityCapture, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

3.3.4. Ergebnisvergleich und Fazit

Im Ergebnis zeigt sich, dass bei der Photogrammetrie weniger Scanlücken entstehen, da bei dieser Methode auf flexible Weise passende Bildpaare verwendet werden können, um gemeinsame Oberflächenpunkte auch in schlecht einsehbaren Bereichen zu finden. Bei Streifenlichtscan wird die 3D-Fläche nur anhand der einzelnen Aufnahme-Frames eines festen Kamerasets berechnet. Es werden dabei nur Punkte berücksichtigt, die von allen Kameras zugleich gesehen werden.

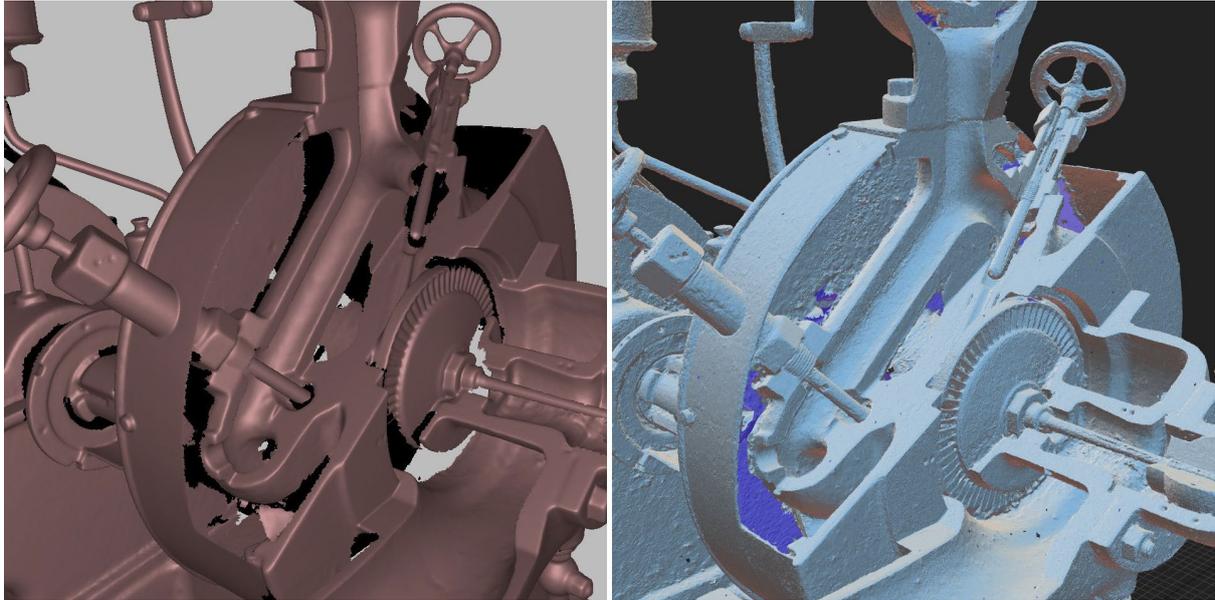


Abbildung 44: Gleichdruck-Dampfturbine, Scanlücken, Artec Leo (links), Photogrammetrie (rechts), Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Auch in der Farbwiedergabe liefert hier die Photogrammetrie das bessere Ergebnis. Hier kann die eingesetzte Kamera ihre Stärken ausspielen. Beim Streifenlichtscan besteht in einer neueren Version der verwendeten Scansoftware die Möglichkeit, zusätzliche Farbaufnahmen in das Projekt zu laden und photogrammetrisch zur bereits aufgenommenen Geometrie zu verorten. Diese Bilder werden dann für die Berechnung einer besseren Farbtextur verwendet.

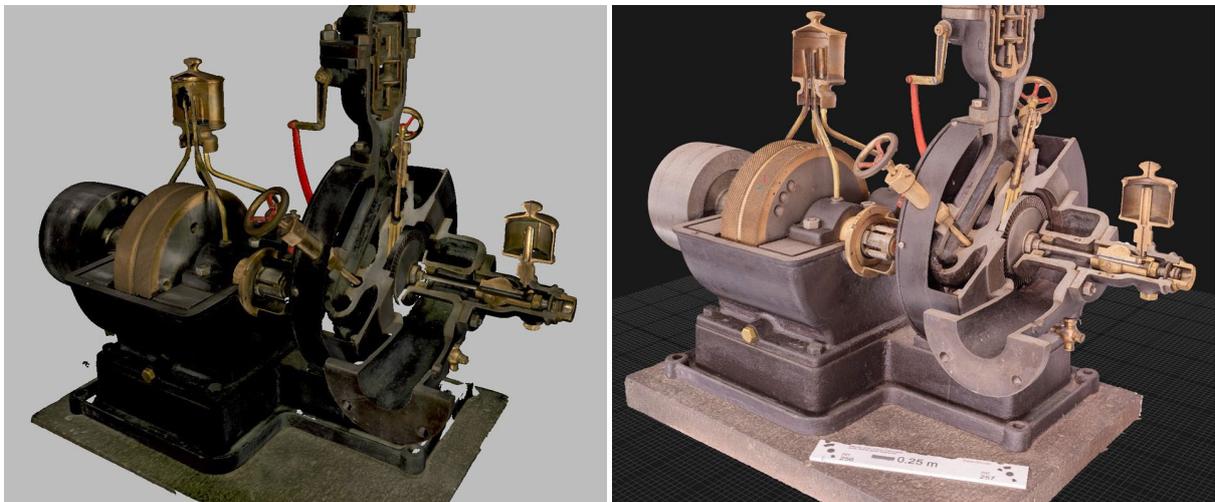


Abbildung 45: Gleichdruck-Dampfturbine, Gesamteindruck texturiert, Artec Leo (links), Photogrammetrie (rechts), Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Es ist jedoch nicht allein die eingesetzte Kamera entscheidend für die Qualität des Scans. Wichtiger sind oft das verwendete Objektiv und die eingesetzte Beleuchtung. Eine gut durchgeführte Aufnahme ist wichtiger als eine teure Kamera.

Bei der Photogrammetrie gilt das Motto „Viel hilft viel“: eine möglichst große Anzahl an Fotos hilft der Software bei der Berechnung. Dies erhöht den Zeitaufwand während der Aufnahme, reduziert jedoch den manuellen Aufwand beim Verorten der Bilder in der Software. Hier gilt es, durch Erfahrungsgewinn eine gute Balance zu finden.

Dort, wo der Streifenlichtscanner die Oberfläche erfasst hat, erscheint die Wiedergabe sauberer als bei der Photogrammetrie, da wir es bei diesem Objekt mit vielen einfarbig lackierten Flächen zu tun haben. Das Photogrammetrie-Ergebnis wirkt dadurch etwas verrauscht. Dies lässt sich in der Nachbearbeitung durch Glättungsfilter wieder reduzieren, was jedoch auf Kosten der Detaildarstellung geht. Die ist allerdings durch die hohe Bildauflösung der Aufnahmen grundsätzlich sehr hoch im Vergleich zum durchgeführten Streifenlichtscan.

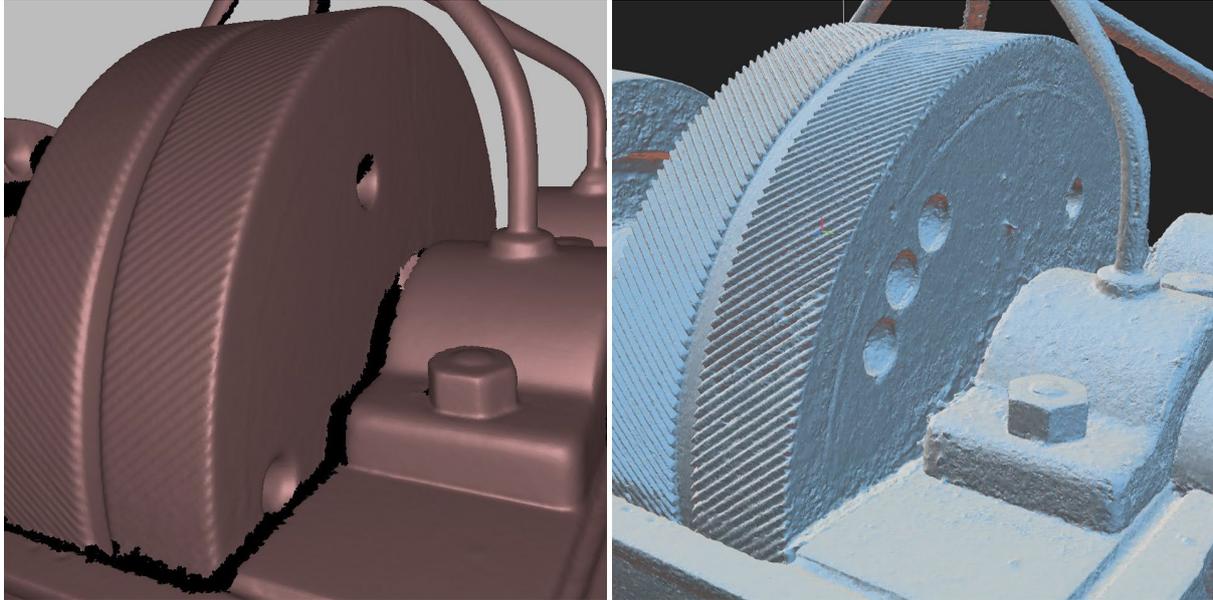


Abbildung 46: Gleichdruck-Dampfturbine, Oberflächenqualität und Details, Artec Leo (links), Photogrammetrie (rechts), Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Die beiden Ergebnisse entsprechen im Vergleich ungefähr den vorherigen Erwartungen. Die Photogrammetrie hat insgesamt positiv überrascht, da größere Probleme bei den hier gegebenen Materialoberflächen erwartet wurden. Bei der finalen Durchführung des Scans während der Beräumungsphase soll deshalb dieses Verfahren eingesetzt werden, obwohl der Aufwand wesentlich höher ist. Dort wird dann auch ein Ringblitz zum Einsatz kommen können.

3.4. Beispiel: Luftfahrthalle – LIDAR-Scan einer Ausstellungshalle



Abbildung 47: Ausstellung Historische Luftfahrt, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

3.4.1. Durchführung der Aufnahme

Kurz nach Anschaffung des Laserscanners Imager5016 von Zoller+Fröhlich wird ein Testlauf in der Ausstellungshalle zur Historischen Luftfahrt durchgeführt, mit Scans von 19 Standpunkten. Jede dieser Aufnahmen benötigt in der gewählten Auflösung und Qualitätsstufe (20.000 Punkte in der Horizontalen, mittlere Qualität) ca. 15 Minuten, inklusive der Farbaufnahmen. Eine Aufnahme lässt sich so von unter zwei Minuten bis auf über eine Stunde einstellen. Hohe Auflösungen sind allerdings nur bei weit entfernten Zielen sinnvoll. Im Nahbereich ist der Laserstrahl breiter als der Abstand der gemessenen Punkte, was zu redundanten Ergebnissen führt. Das benutzte Gerät hat eine Reichweite von ca. 360 Metern. In der Luftfahrthalle ist keine Wand weiter als 50 Meter von einem Aufnahmepunkt entfernt.

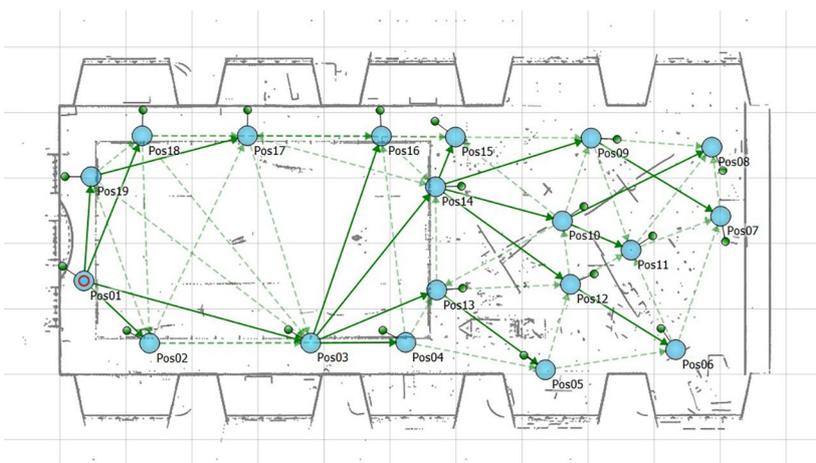


Abbildung 48: Ausstellung Historische Luftfahrt, Scanpositionen, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Die Aufnahmen werden schon vor Ort in der Software zusammengesetzt, um eine Voransicht zu erhalten. So kann überprüft werden, ob zusätzliche Scans erforderlich sind. Dafür wird eine mobile Version der Scansoftware verwendet, die auf Notebooks oder Tablets laufen kann.

3.4.2. Nachbearbeitung

Weitere Bearbeitungsschritte erfolgen nach Übertragung der Daten auf einen PC. Hier können durch Filterfunktionen potentielle Fehlmessungen entfernt werden. Zum Beispiel werden Messpunkte auf dunklen Oberflächen unterhalb eines Grenzwertes maskiert.

Aber nicht alle Fehler können automatisch herausgefiltert werden. Spiegelnde Oberflächen sind auch beim Laserscan ein Problem, wie bei allen anderen optischen Scanverfahren auch. Der Laser wird auf einer spiegelnden Fläche auf ein anderes Objekt oder eine Wand abgelenkt. Dieser neue Oberflächenpunkt wird von Scanner erfasst, mit einer Entfernungsmessung vom Scanner über die Spiegelfläche zur zweiten Fläche. Die Richtung wird von Scanner allerdings in einer Verlängerung der Achse zwischen Scanner und Spiegel angenommen. So erscheint hinter dem eigentlichen Zielobjekt ein Messpunkt, der dort nicht hingehört. Diese Punkte müssen händisch über Auswahlwerkzeuge selektiert und entfernt werden. Solche Artefakte können häufig auftreten, so auch in unserer Luftfahrthalle.

Dort hängt ein Leichtbauflieger mit einem Rumpf aus transparenter Kunststoff-Folie und stark spiegelnden Flügeln. Fehlerhafte Messpunkte sind in weiten Teilen der 3D-Szene verstreut und müssen mühsam aussortiert werden, ohne dabei andere, korrekt aufgenommene Objekte versehentlich mit zu erfassen. Übrig bleibt eine sehr löchrige Punktwolke des Leichtfliegers.



Abbildung 49: Fehler beim Scannen spiegelnder Flächen, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Problematisch ist auch, wenn sich Objekte während der gesamten Aufnahme bewegen. So sind in unserem Beispiel einige Drachenflieger in der Halle nur an einem Faden aufgehängt und haben sich im Verlauf des Tages fast vollständig um die eigene Achse gedreht. Diese Objekte wurden auch aussortiert.

Abschließend werden sämtliche Punkte mit den Farbwerten aus den Farbaufnahmen belegt.

3.4.3. Ergebnis

Als Ergebnis erhält man eine farbige Punktwolke, die noch aus den einzelnen Punktwolken der jeweiligen Aufnahmen zusammengesetzt ist. Diese Gesamtszene kann für Messungen im 3D verwendet werden. Dies ist die übliche Verwendung von LIDAR-Scandaten.



Abbildung 50: Scanergebnis als Punktwolke, Screenshot : Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Es besteht auch die Möglichkeit, alle Aufnahmen zusammengefasst in einer Punktwolke für die Weiterverwendung in einer anderen Software zu exportieren. So werden zum Beispiel die Daten der Luftfahrthalle in einer Kunstinstallation im Museum verwendet, bei der die 3D-Szene über mehrere Beamer an die Wände eines Raumes projiziert wird. Der Besucher kann über eine Game-Engine in Echtzeit frei durch die Szene navigieren. Die Punktwolke wird dabei mit Hilfe von Partikeleffekten leicht künstlerisch angehaucht.

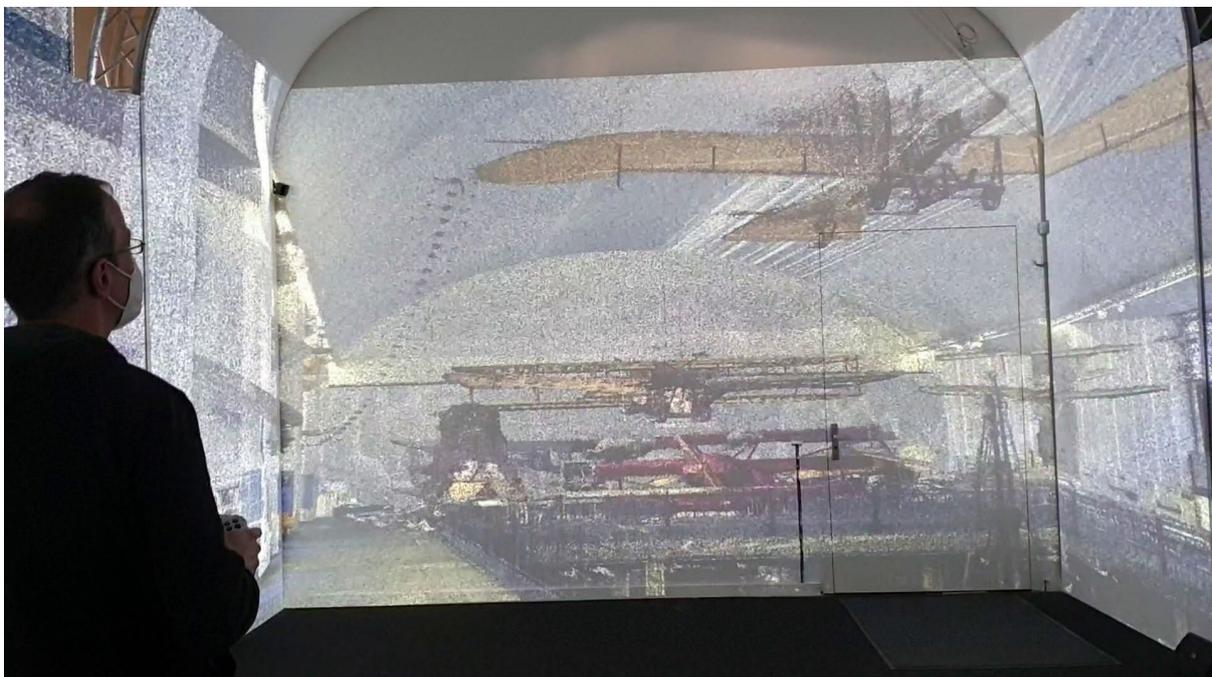


Abbildung 51: Verwendung der Punktwolke in Kunstinstallation, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

3.5. Beispiel: Beleuchtungswagen – Kombination LIDAR-Scan mit Photogrammetrie

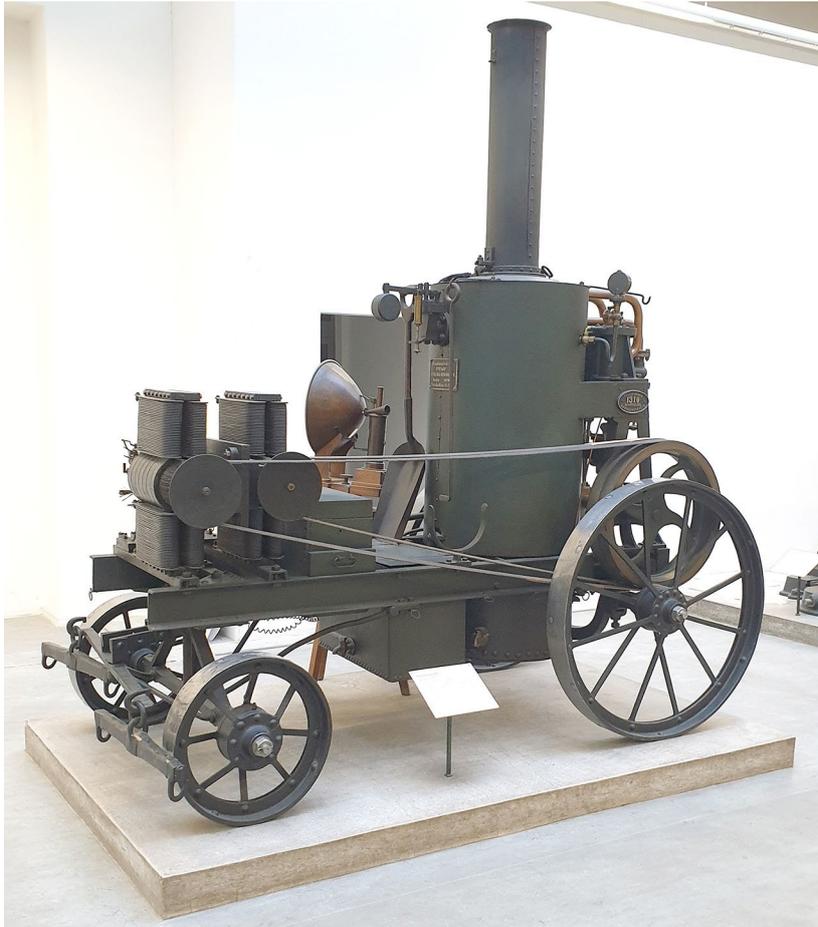


Abbildung 52: Beleuchtungswagen von Siemens und Halske, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Beim Erfassen von großen Objekten mit der Photogrammetrie kann es dazu kommen, dass die Software Probleme hat, das gesamte Objekt geometrisch stimmig zu rekonstruieren. Die Bilder zeigen nur kleine Ausschnitte und müssen in einer langen Kette aneinandergereiht werden, um ein Gesamtbild zu ergeben. Kleine Fehler im Alignment können sich verstärken und am Ende vielleicht nicht mehr aufgelöst werden. Es entstehen Brüche im Ergebnis. Bilder, die dagegen das gesamte Objekt erfassen, sind nicht sehr detailreich genug und können vielleicht auch nicht korrekt verortet werden.

Daher besteht in einigen Photogrammetrie-Programmen die Möglichkeit, eingefärbte Punktwolken aus mehreren LIDAR-Scans, die bereits zueinander positioniert sind, in das Projekt zu importieren. Sie werden dabei jeweils in mehrere 2D-Bilder umgewandelt, die zu einem 6-seitigen Würfel angeordnet sind und zusammen wieder das 360°-Panorama der Scanansicht ergeben. Diese Bilder sind fest verortet in der 3D-Szene und bilden das Grundgerüst, an denen sich das Alignment der übrigen Fotoaufnahmen orientieren kann. Da die Farbqualität eines LIDAR-Scans wahrscheinlich nicht an die der Fotos heranreicht, kann man sie am Ende von der Verwendung für die Berechnung der Farbtextur wieder ausschließen.

Um dieses Verfahren zu testen wird der Beleuchtungswagen von Siemens und Halske aus dem Jahr 1878 ausgewählt. Dieser ist eine von einem Pferdegespann gezogene Dampfmaschine mit angeschlossenem Strom-Generator für die Versorgung einer Baustellenlampe. Diese Maschine soll ein zentrales Objekt in der zukünftigen Ausstellung zur Starkstromtechnik werden. Vom Kurator kam

daher die Anfrage zu den Möglichkeiten einer digitalen Inszenierung mit einem 3D-Modell im Internet oder an den Medienstationen.

Als Benchmark für dieses Vorhaben dient ein ähnliches Projekt vom Londoner Science Museum. Dort wurde die Stephenson's Rocket aus dem Jahr 1829 mit diesem kombinierten Verfahren digitalisiert. Sie ist eine der ersten im Personenverkehr eingesetzten Lokomotiven.

(<https://lab.sciencemuseum.org.uk/scanning-stephensons-rocket-40916fdb4d20>).

3.5.1. Durchführung

Es werden zunächst 30 LIDAR-Scans aus drei unterschiedlichen Höhen rund um den Beleuchtungswagen aufgenommen. Die Scans werden in einer mittleren Auflösung von 10.000 Punkten in der Horizontalen durchgeführt. Dieser Vorgang dauert 1,5 Tage. Danach kommen die Fotoaufnahmen, in drei separaten Sessions, da im Verlauf der Datenbearbeitung in der Software der Bedarf nach zusätzlichen Bildern deutlich wird. Im Verlauf von vier Aufnahmetagen werden insgesamt ca. 2800 Fotos gemacht. Zum Einsatz kommt die Canon Eos 5DS R Spiegelreflexkamera mit einem Aufsteckblitz, über den eine kleine Diffusorbox befestigt wird, um die Schattenbildung etwas abzuschwächen. Ein geeigneter Ringblitz steht zum Zeitpunkt dieser Aufnahmen noch nicht zur Verfügung. Es kommen ein Objektiv mit 35 mm Festbrennweite und ein Zoom-Objektiv zum Einsatz.

Der benutzte Aufsteckblitz reicht nicht aus, um das Motiv ausreichend auszuleuchten. Statt zusätzlicher Lampen oder externer Blitze, die den Aufnahmeprozess verzögern würden, wird das durch die Deckenfenster eindringende Tageslicht genutzt, mit entsprechend längeren Belichtungszeiten, was bei Gegenlichtaufnahmen zu störenden Reflexionen führt, die sich nicht ausreichend durch den Polfilter am Objektiv verringern lassen.

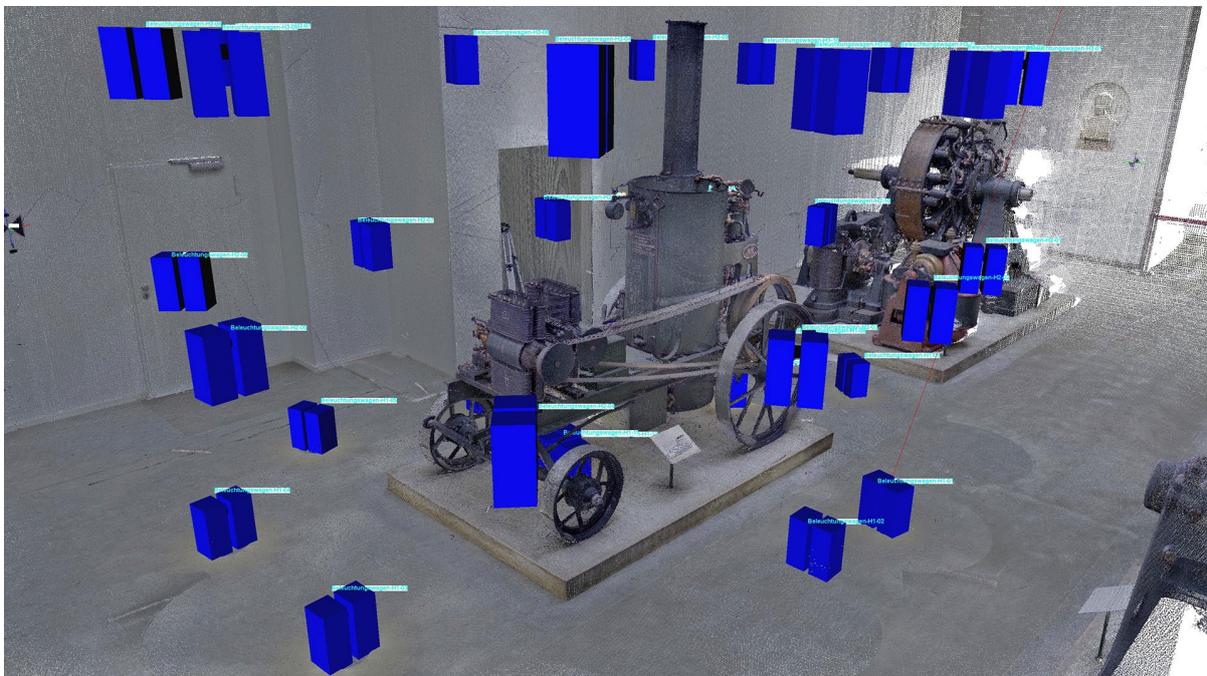


Abbildung 53: LIDAR-Scanpositionen am Beleuchtungswagen, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

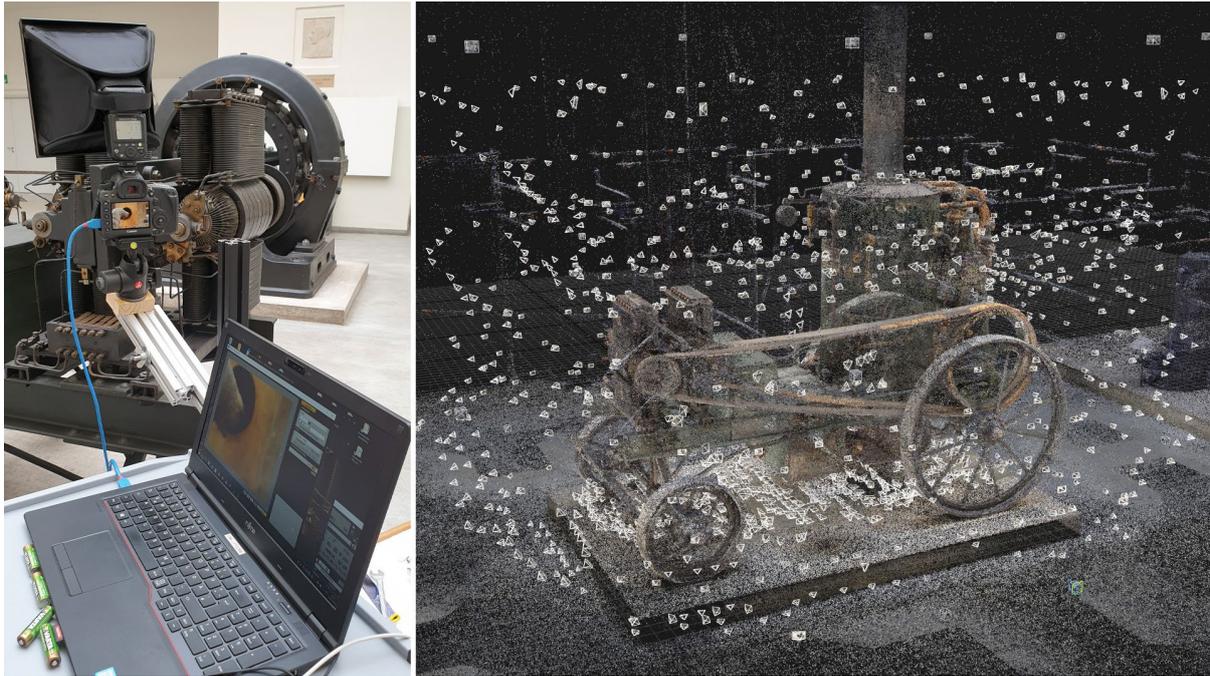


Abbildung 54: Photogrammetrieaufnahmen am Beleuchtungswagen, Foto/Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

3.5.2. Datenaufbereitung

Beim Import der LIDAR-Scans aus den nativen Scannerdaten enttäuscht zunächst die überraschend niedrige Auflösung der generierten Bilder (1250x1250 Pixel). Ein daraus testweise erzeugtes 3D-Modell sieht entsprechend schlecht aus. Erst ein erneuter Import über den Umweg eines Austauschformats (.E57) bringt die erwartete Auflösung (2500x2500). Ein daraus erzeugtes 3D-Modell zeigt schon ein deutlich verbessertes Ergebnis. Mit einem höher aufgelösten Scan (20.000 Punkte in der Horizontalen) könnte man dies vermutlich noch verbessern, da die Auflösung der Farbaufnahmen in dem Fall besser ausgenutzt wäre. Die generierten Bilder hätten dann eine Auflösung von 5000x5000 Pixel. Dies wird in unserem Beispielprojekt nicht gemacht, da eine solche hohe Scanauflösung bei der kurzen Entfernung zum Objekt aus Sicht der Messpunkte Erfassung zunächst als nicht notwendig erscheint.

Bei der Verarbeitung der Fotoaufnahmen wird deutlich, dass der jeweils erfasste Bildausschnitt zu klein gewählt ist, bezogen auf die Gesamtzahl der Bilder. Die Software findet nicht genügend Bildüberlappung um alle Bilder automatisch zu verorten. Es müssen über 150 Ankerpunkte händisch über tausende von Bildern markiert werden, bis eine Registrierung von 2700 aus 3000 Bildern erreicht wird. Die Datenaufbereitung zieht sich aufgrund der großen Datenmengen über einen Zeitraum von ca. drei Wochen.

Während der intensiven Beschäftigung mit den Bildern fällt auf, dass einige Räder und Wellen am Beleuchtungswagen offensichtlich zwischen den zeitlich um mehrere Tage auseinanderliegenden Aufnahmen von den Besuchern verstellt wurden. Dies erschwert natürlich zusätzlich die automatische Zuordnung der Bilder und führt zu fehlerhaften, weil doppelten 3D-Flächen.

3.5.3. Ergebnis

In gut einsehbaren Bereichen, von denen viele Bilder gemacht wurden, ist die erzeugte 3D-Geometrie ausreichend detailliert. Es gibt ein allgemeines Oberflächenrauschen, da es sich in den meisten Fällen um relativ eintönige und glänzende Flächen handelt. Mit aktivierter Farbtextur sind diese Fehler jedoch nicht sichtbar. Zu größeren Fehlern kommt es natürlich in den Bereichen, die mit

der Kamera nur sehr schlecht zu erreichen sind, insbesondere bei den mechanischen Steuerelementen und Rohrleitungen, die außen am Dampfkessel angebracht sind. Auch Flächen, die von der Kamera hauptsächlich nach oben, gegen das Deckenlicht gerichtet erfasst wurden, weisen Fehler auf. Auch die Farbtextur ist an diesen Stellen nicht gut gelungen.

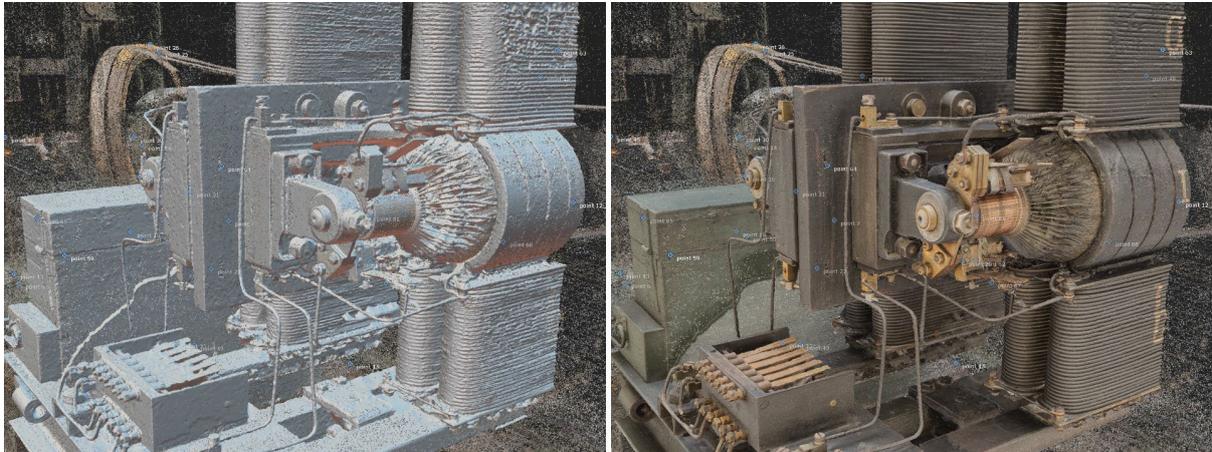


Abbildung 55: Photogrammetrie Oberflächenqualität, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

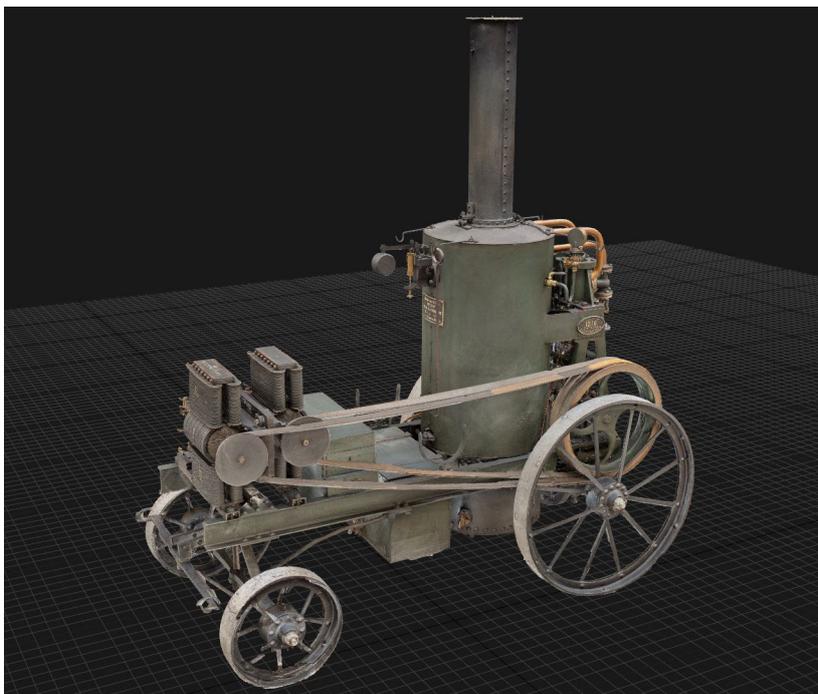


Abbildung 56: Beleuchtungswagen, Ergebnis aus Photogrammetrie, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Am Beispiel dieses Beleuchtungswagen soll ermittelt werden, ob und welche Veränderungen im Aufnahmeprozess zu Verbesserungen im Ergebnis führen.

So sollen die Fotoaufnahmen noch einmal wiederholt werden, diesmal mit einem starken Ringblitz, um die Auslösezeit an der Kamera reduzieren zu können, was den störenden Einfluss des Umgebungslichts verringern soll. Erste Probeaufnahmen zeigen allerdings, dass trotzdem zusätzliche Beleuchtung nötig sein wird, um bei größeren Bildausschnitten die Szene ausreichend auszuleuchten, wenn man mit Polfilter und hoher Blendenzahl arbeitet. Der Gesamtaufwand wird sich auf jeden Fall erhöhen.

Der Bildausschnitt der einzelnen Aufnahmen soll etwas erweitert werden, um noch mehr Überlappungen zwischen den Bildern zu erhalten. Hierfür soll ein neues Objektiv mit 24mm Brennweite eingesetzt werden. Die 50 Megapixel der einzelnen Aufnahmen sollten dafür noch ausreichende Details liefern. Eine Alternative wäre es, die Anzahl der Aufnahmen zu verdoppeln. Dieser Aufwand soll allerdings vermieden werden.

Die LIDAR-Scans sollen ebenfalls in einer höheren Auflösung wiederholt werden. Frühere Bedenken wegen der dann vierfachen Datengröße haben sich im Verlauf des Projektes relativiert, da die Datenmenge aus den Fotoaufnahmen um ein Vielfaches größer ist, und der zusätzliche Zeitaufwand bei der Bearbeitung dieser Daten gegenüber dem Rest der Photogrammetrie eher gering ist.

4. Nachbearbeitung der Scanergebnisse in externen Programmen

4.1. Mögliche Anwendungsfälle

Viele Schritte zur Bearbeitung der Scandaten können bereits in der zum Scanner gehörenden Software gemacht werden. In der Regel beinhalten diese Programme einfache Werkzeuge zum Auswählen und Entfernen von Bereichen der Punktwolke bzw. der Polygonfläche, zum automatischen Füllen von Löchern, zur Glättung von Oberflächen und zur Reduzierung der Polygonanzahl. Ist der Scanner in der Lage zur Erfassung der Oberflächenfarbe, dann stellt die Software auch Funktionen zur Texturierung des Modells bereit. Einige Scan-Programme ermöglichen sogar seit kurzem erweiterte Texturoptionen mit der Erzeugung von Normal-Maps und der Vorberechnung von Schattentexturen (Ambient Occlusion), zwei neben der Farbe wesentliche Texturen für eine als realistisch empfundene Darstellung eines 3D-Modells.

Oft reichen diese Möglichkeiten bereits aus, um ein brauchbares Modell zu erzeugen. Aber für einige Anwendungsszenarien ist eine Bearbeitung in weiteren Programmen erforderlich.

4.1.1. Retopologisierung

Das Ergebnis eines Scans ist ein engmaschiges Netz aus Dreiecken. Es lässt sich in der Scan-Software weiter reduzieren, folgt dabei jedoch primär dem Ziel, eine bestimmte maximale Abweichung vom Original nicht zu unterschreiten. Die Struktur dieses Netzes ist für einige Anwendungszwecke nicht geeignet, es kann zu Problemen in anderen Programmen führen.

3D-Modellierprogramme bieten umfangreiche Werkzeuge zur Neuordnung dieses Polygonnetzes an. Sie können zum Beispiel das Dreiecksnetz in ein Netz aus geordneten Vierecken umwandeln, welches sich besser für die Nachmodellierung eignet. Auch die Texturierung lässt sich besser an einem geordneten Polygonnetz bewerkstelligen. Die durch eine Vereinfachung des Netzes verloren gegangenen Oberflächendetails können in nachfolgenden Schritten wieder restauriert werden.

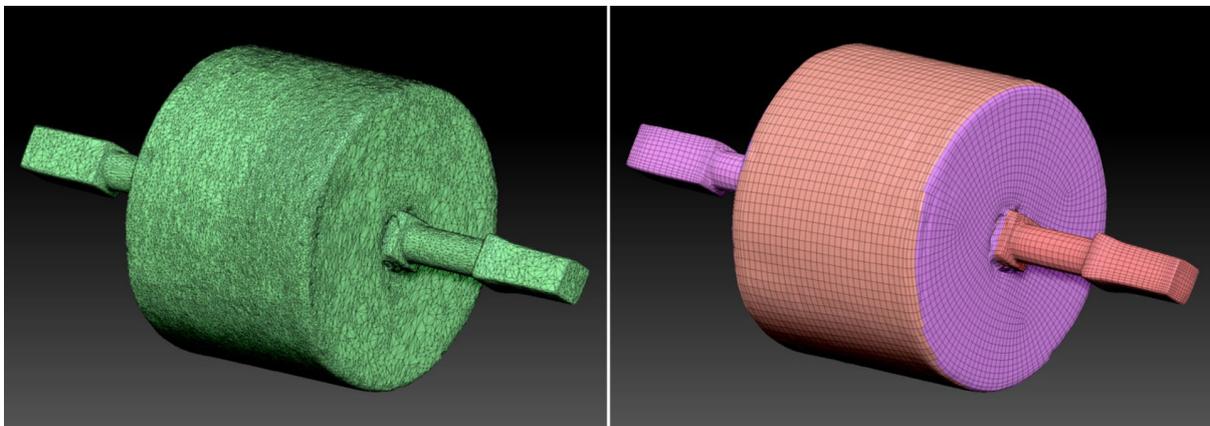


Abbildung 57: Retopologisierung am Beispiel Holzschleifapparat, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

4.1.2. Remodellierung / Rekonstruktion

Es gibt Anwendungsfälle, bei denen eine direkte Nutzung der Scandaten problematisch ist:

- Die Datenmenge ist zu groß, zum Beispiel für eine Anwendung in einer Echtzeit-3D-Anwendung, und eine automatische Reduzierung dieser Daten geht zu sehr zu Lasten der Darstellungsqualität.
- Ein technisches Objekt soll funktional dargestellt werden, konnte jedoch nur im Ganzen gescannt werden, so dass sich die Einzelteile nicht bewegen lassen.

- Aufgrund von stark glänzenden und transparenten Oberflächen konnte das Objekt nicht vollständig und nur in schlechter Qualität gescannt werden

Hier gibt es mit der Nutzung zusätzlicher Software erweiterte Möglichkeit, die betroffenen Regionen der Scandaten zu korrigieren, oder man erstellt ein komplett neues 3D-Modell und nutzt die Scandaten lediglich als Referenz.

Im Wesentlichen unterscheidet man zwei Ansätze für ein solches Vorgehen:

Polygonmodellierung

Hier erzeugt und manipuliert man ein Netz aus einzelnen miteinander verbundenen Punkten aus denen sich die Objektoberfläche zusammensetzt. Die beim Scan erzeugten Daten sind solche Punktwolken. Jeder Punkt hat eine Verortung im Raum, dazwischen wird eine gerade Linie gezogen. Je gröber das Netz, desto kantiger wirkt das Modell und desto größer ist die Abweichung von der realen Vorlage.

CAD / Flächenmodellierung

Bei dieser Methode wird der Verlauf der Objektoberfläche mathematisch exakt beschrieben. Zum Beispiel wird eine Kugel durch Ihren Mittelpunkt und Radius beschrieben. Es lassen sich Flächen, Rundungen und Bohrungen als solche definieren und zur Veränderung werden einfach ihre Parameter angepasst.

Die Polygonmodellierung ermöglicht eine eher künstlerische Herangehensweise beim Modellieren, und ist besonders geeignet für organische Formen wie Skulpturen, während CAD ein eher technischer Ansatz ist. Je nach beruflichem Hintergrund und persönlicher Präferenz des Anwenders entscheidet man sich für den einen oder anderen Weg. Technische Objekte sind einfacher im CAD zu erstellen, jedoch auch mit der Polygonmodellierung möglich, wie dieses Beispiel einer Dampfmaschine zeigt, die zunächst photogrammetrisch gescannt wurde, für Ihren Einsatz in einer 3D-Engine für VR jedoch komplett mit einem Polygonmodellierer funktional nachgebaut wurde.

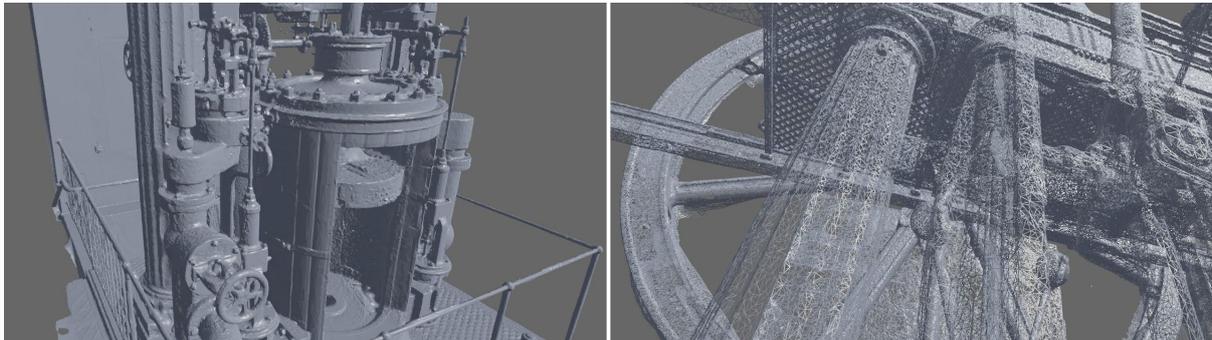


Abbildung 58: Sulzer Dampfmaschine, Modell aus Scandaten, stark reduziert, Screenshots: VR Dynamix, CC BY-SA 4.0

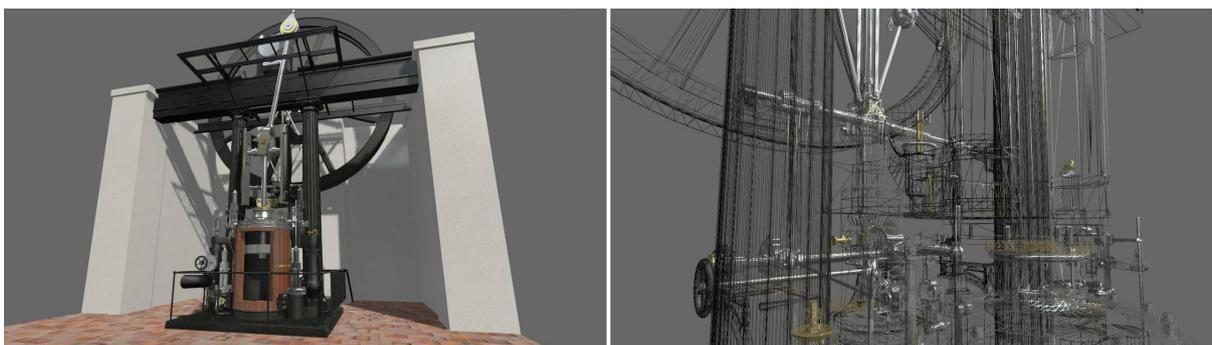


Abbildung 59: Sulzer Dampfmaschine, nachmodelliert, getrennt nach Bauteilen, Screenshots: VR Dynamix, CC BY-SA 4.0

4.1.3. Texturierung

Für die Erstellung der Texturen, wird das Polygonnetz eines 3D-Objektes zerschnitten und auf eine Ebene entfaltet, ähnlich des Ausbreitens der Alufolie eines Schokoladenweihnachtsmanns. Passend zu den Koordinaten auf dieser Fläche wird eine Textur erstellt, bei der jeder Farbpixel einer Punktkoordinate auf der Objektoberfläche zugeordnet ist.

Dieser Vorgang geschieht in der Scansoftware nahezu vollautomatisch. Manchmal möchte man allerdings die Schnitte an dem Polygonnetz manuell setzen, um den Verlauf der Textur zu kontrollieren. Damit können sichtbare Brüche in der Textur in Bereiche der Objektoberfläche versetzt werden, die weniger auffällig sind. Für solche Zwecke bieten andere 3D-Programme umfangreiche Möglichkeiten. Es können zudem weitere Texturarten erzeugt werden.

Ist beim Scanvorgang keine Farbinformation aufgenommen worden, oder nur in unzureichender Qualität, dann lassen sich mit externen Programmen auch komplett neue Texturen erzeugen. Die entsprechen dann zwar nicht mehr unbedingt dem Original, aber das ist auch bei einer schlechten Aufnahme der Objektoberfläche nicht mehr gegeben. Mit neu erstellten Texturen kann oft ein besserer Eindruck der Materialität erzeugt werden.

4.1.4. Animation

Um die Funktion eines Objektes in einer Animation darzustellen ist eine umfangreiche Aufbereitung der Scandaten notwendig, bis hin zu einer Neumodellierung und der Festlegung der Bewegungsmöglichkeiten der einzelnen Bauteile und der Abhängigkeiten untereinander (Rigging). Diese Möglichkeiten hat man in keinem Scanprogramm. Dazu sind weitere Programme notwendig.

4.1.5. Exportoptionen

Scanprogramme bieten eine Auswahl der gängigsten Exportformate, um die Daten für die Weiterbearbeitung in ein anderes Programm zu bekommen. Von dort können dann weitere Schritte unternommen werden, um die 3D-Modelle für spezifische Anwendungen in das jeweils passende Format zu bringen, zum Beispiel mit hinzugefügten Materialeinstellungen und Animationssequenzen in eine 3D-Engine für VR oder in ein für Webviewer optimiertes Format.

4.2. Softwareauswahl

Oft ist es mit dem Einsatz nur einer weiteren Software nicht getan, sondern es reihen sich mehrere unterschiedliche Programme in einer Prozesskette aneinander, je nach Anwendungsszenario und den Möglichkeiten des Anwenders. In vielen Fällen gibt es neben den umfangreichen, kostenpflichtigen Programmen auch freie Alternativen. Es folgt eine (nicht vollständige) Auflistung möglicher 3D-Programme, die für die Aufbereitung von Scandaten eingesetzt werden können:

Autodesk 3ds Max / Autodesk Maya / Maxon Cinema 4D

Drei umfangreiche kostenpflichtige Programme, welche jeweils den kompletten 3D-Produktionsprozess, von der Polygonmodellierung (auch Flächenmodellierung), über Animation, Texturierung, Beleuchtung und Rendern abdecken können. Es sind die führenden Anwendungen in der kreativen 3D-Branche.

Während Autodesk ausschließlich dem Abo-Trend folgt und seine Produkte nur gegen eine jährliche Gebühr lizenziert, bietet Maxon alternativ auch (noch) eine Dauerlizenz.

<https://www.autodesk.de/products>

<https://www.maxon.net/de/produkte/cinema-4d/cinema-4d>

Blender

Eine starke kostenlose Alternative zu den drei oben genannten 3D-Vollprogrammen, die seit der Version 2.8 mit einer Überarbeitung der UI sogar nutzerfreundlich geworden ist und eine zentrale Stellung in der Prozesskette einnehmen kann. In vielen Fällen kann man auf weitere Programme verzichten, wenn das Budget für Software begrenzt ist.

Blender ist eines der größten Open Source Projekte und wird von einer aktiven Community unterstützt. Somit ist auch weiterhin mit einer ständigen Weiterentwicklung der Software zu rechnen.

<https://www.blender.org/>

CloudCompare

Ein kostenloses Programm, das speziell für die Ansicht, Filterung und den Vergleich von Punktwolken aus 3D-Scans entwickelt wurde. Es bietet Importmöglichkeiten für zahlreiche Formate dieser Art, die in anderen Programmen nicht zu finden sind und kann somit oft die letzte Möglichkeit sein, von Externen gelieferte Scandaten zu öffnen, ohne die passende Scanner-Software zu besitzen.

Dieses Programm bedient einen eingeschränkten Anwendungsbereich und wird von einer kleinen Community am Leben erhalten.

<http://www.cloudcompare.org/>

MeshLab

Ein ebenfalls kostenloses Programm zur Analyse und Nachbearbeitung von Polygonnetzen aus 3D-Scans. Es wurde an einem Informatik-Institut in Pisa für wissenschaftliche Anwendungsbereiche entwickelt und hat einen hohen Bekanntheitsgrad in der 3D-Scan-Community. Es beinhaltet zahlreiche Algorithmen zur Retopologisierung. Nach einigen Jahren Pause erhält die Software seit 2020 wieder regelmäßig Updates.

www.meshlab.net

Pixologic ZBrush

ZBrush ist ein bekanntes kommerzielles 3D-Sculpting-Programm, in dem man Polygonmodelle mit Methoden erstellt, die dem Bearbeiten von Clay nachempfunden sind. Es kann gut mit sehr großen Polygonmengen umgehen und hat mächtige Werkzeuge zur Retopologisierung, was es für die Nachbearbeitung von 3D-Scans sehr beliebt macht. Die Sculpting-Werkzeuge können zur Behebung von Fehlstellen eingesetzt werden. Es eignet sich auch gut für die Übertragung von Scandetails in die Normalentextur eines polygonreduzierten Modells. Anfang 2022 wurde bekannt gegeben, dass der Entwickler Pixologic von der Firma Maxon, dem Entwickler von Cinema4D gekauft wurde. Wie sich das auf Preis und Lizenzmodell auswirkt, wird sich mit der Zeit zeigen.

www.pixologic.com

Adobe Substance

Die Standard-Programmreihe zur Erstellung von prozeduralen PBR-Materialien, zur Generierung von Materialien aus Fotovorlagen und zur 3D-Texturierung für eine möglichst real wirkende Erscheinung von 3D-Objekten. Gerade bei glänzenden metallischen Oberflächen ist eine neu generierte Textur dem Fotomaterial aus dem Scan deutlich überlegen.

Die Entwicklerfirma wurde vor wenigen Jahren von Adobe übernommen, dessen Substance-Programme sind mittlerweile Teil des Adobe Creative Cloud Pakets.

www.substance3d.com

Rhino

Ein kommerzieller Flächenmodellierer, der verglichen mit anderer CAD-Software einen großen Programmumfang zu einem relativ günstigen Preis bietet, und ihn daher in der Kreativwirtschaft sehr beliebt macht. Er eignet sich zum Nachmodellieren von Scanobjekten.

www.rhino3d.com

Dassault Solid Works

Eine weit verbreitete CAD-Anwendung im mittleren Preissegment. Es eignet sich zur Neukonstruktion von technischen Scanobjekten. Es ist wesentlich teurer als die bislang aufgeführten Programme. Dies ist jedoch nicht unbedingt ein Hinweis auf einen entsprechend höheren Funktionsumfang. CAD wird überwiegend in der Industrie eingesetzt und dort können höhere Preise verlangt werden als in der Kreativbranche.

www.solidworks.com/de

3D Systems Geomagic Design X

Eine Reverse-Engineering-Software, die spezielle Werkzeuge zur Verfügung stellt, um 3D-Scans in CAD-Modelle zu konvertieren. So werden zum Beispiel automatisch Flächen und Radien erkannt. Es soll damit die Erstellung eines sauberen 3D-Modell wesentlich vereinfacht und beschleunigt werden. Dafür wird allerdings auch ein sehr hoher Preis verlangt.

<https://de.3dsystems.com/software/geomagic-design-x>

4.3. Beispiel: Holzschleifapparat von F. G. Keller – Scan und Nachbearbeitung



Abbildung 60: Holzschleifapparat von F.G.Keller, Foto: HJBecker / © Deutsches Museum

Mit diesem Schleifapparat zerfaserte der Weber Friedrich Gottlob Keller im Jahr 1843 erstmals Holz unter Zugabe von Wasser, um aus der Fasersuspension Papier herzustellen. Dies war der Beginn für die Nutzung von Holzschliff Fasern in der Papierindustrie.

Beim Scan eines Objektes entsteht ein zusammenhängendes starres Polygonnetz, auch wenn das Objekt aus beweglichen Einzelteilen besteht. Möchte man diese Funktionalität der Bauteile auch im 3D-Modell darstellen, dann müsste das Modell in einem Nachbearbeitungsschritt an den entsprechenden Stellen geteilt werden. Diese Schnittstellen lassen offene Flächen zurück, die der Scanner nicht einsehen konnte. Daher gibt es auch keine Texturinformationen zu diesen Bereichen. Diese Oberflächen müssen neu hinzugefügt werden, und es wird schwierig, einen gleichmäßigen optischen Eindruck zwischen gescannten und modellierten Flächen zu erzeugen.

Ein besseres Ergebnis wird erzielt, wenn man das Objekt vor dem Scan in seine funktionalen Baugruppen zerlegen kann und diese einzeln erfasst, um sie dann später wieder virtuell zusammenzubauen. Bei der Automatenfigur aus einem der vorigen Beispiele war dies nicht möglich, sowie mit den meisten anderen musealen Objekten.

Der Holzschleifapparat hingegen durfte für diesen Zweck zerlegt werden. Dadurch bestand auch die Gelegenheit, das Innere des Apparates nahezu lückenlos zu erfassen.

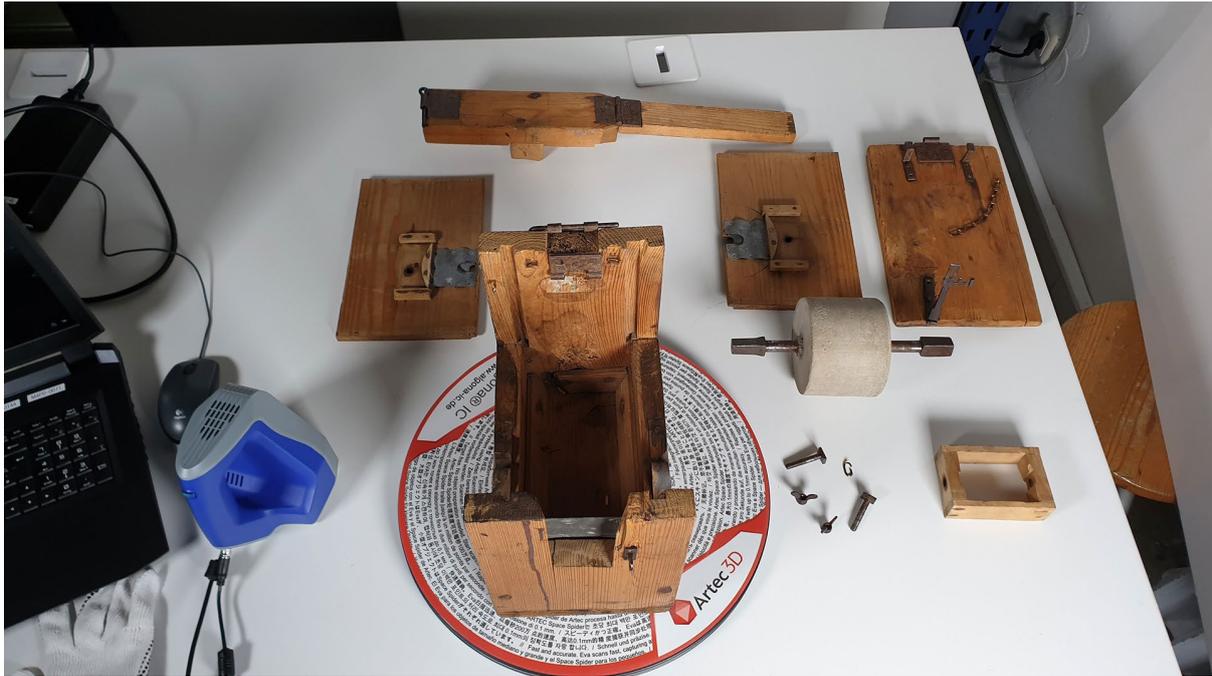


Abbildung 61: Holzschleifapparat zerlegt für 3D-Scan / Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

4.3.1. Durchführung des Scans

Durchgeführt wurde der Scan mit dem handgeführten Artec Space Spider, der mit seiner sehr hohen geometrischen Auflösung eine detailreiche Erfassung der Holzstrukturen ermöglicht. Durch die Aufteilung in kleinere Scanportionen war die Größe des Objektes gut handhabbar.

Obwohl der Schleifapparat nur wenige und nicht so sehr glänzende Metalteile besitzt und die Teile generell gut für den Scanner einsehbar waren, gab es einige Stellen, wo die Scandaten nicht ausreichend erfasst wurden. Hier wird deutlich, dass der Scanner für metallische Oberflächen mehr Zeit benötigt, um flächendeckend brauchbare Daten zu erhalten. Der optimale Erfassungswinkel ist gegenüber matten Flächen eingeschränkt. Die Fehlstellen konnten noch mit den Bearbeitungsmöglichkeiten der Scan-Software bereinigt werden.

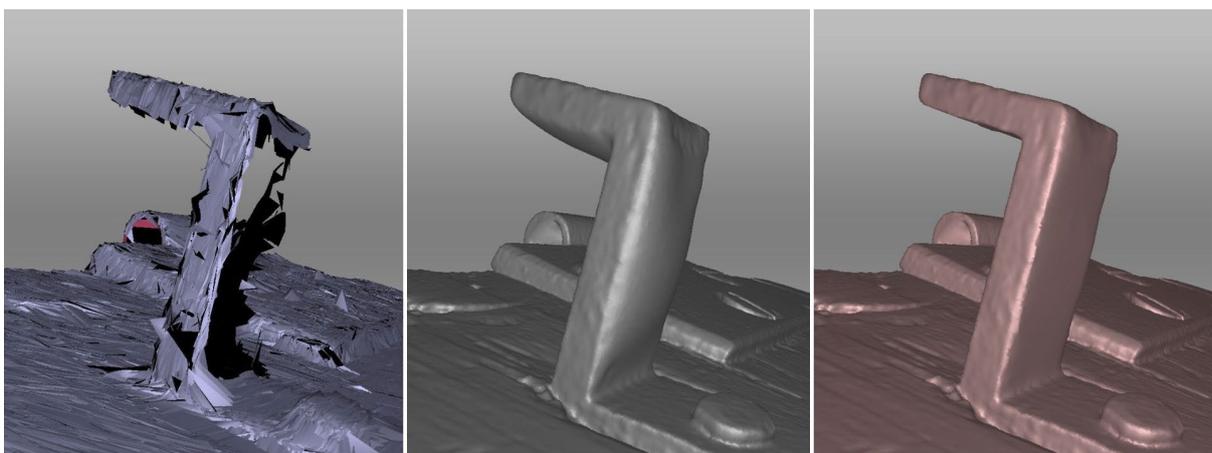


Abbildung 62: Rohscandaten (links), Fusionsergebnis mit automatischer Lückenfüllung (mitte), Nachbearbeitung (rechts), Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

4.3.2. Ergebnis nach Scan

Die Oberflächenstruktur des Holzes ist gut erkennbar. Dies gibt später dem gerenderten 3D-Modell einen realistischen Eindruck. Mithilfe von weiteren Programmen lässt sich die Polygonzahl des sehr hoch aufgelösten 3D-Modells reduzieren, ohne dass der optische Eindruck der feinen Holzstruktur verloren geht. Am Ende lassen sich die Einzelteile wieder zusammensetzen und beliebig animieren.

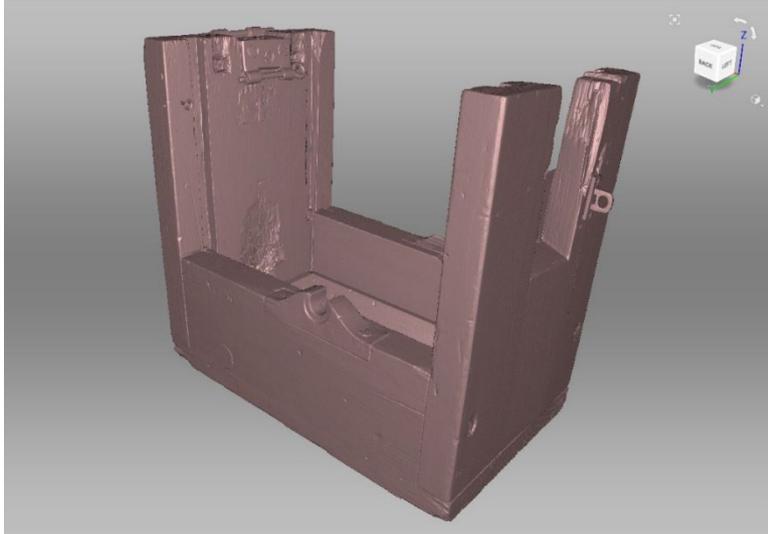


Abbildung 63: Holzschleifapparat Scanergebnis Gehäuse, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

4.3.3. Retopologisierung und Texturierung

In der Software ZBrush wird nun (nach einer Retopologisierung des Meshes zur Bereinigung von Vernetzungsfehlern) das hochaufgelöste Modell sehr stark reduziert. Nach einer Zuordnung der Model- auf Texturkoordinaten (UV-Mapping) wird die Struktur des hochaufgelösten Meshes auf das reduzierte Modell als Normalentextur übertragen.

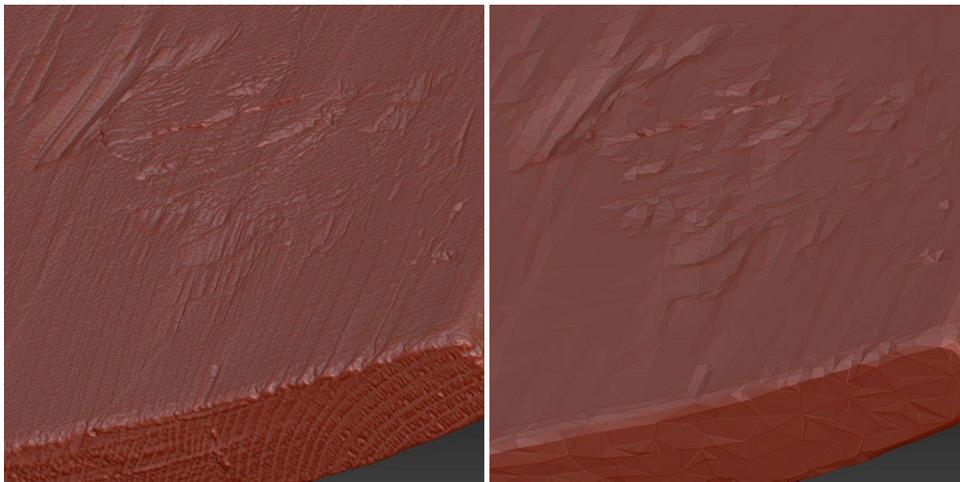


Abbildung 64: Reduzierung der Polygonzahl in ZBrush, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

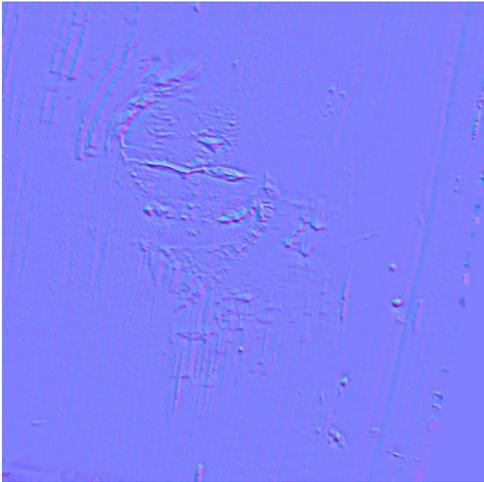


Abbildung 65: Ausschnitt der generierten Normalentextur, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Die Normalentextur verändert die Reflexionsrichtung des Lichts bei der Darstellung des Modells, individuell für jeden, einem Texturpixel zugeordneten, Oberflächenpunkt. Dadurch erscheint das Modell detailreicher, als es die Anzahl der Polygone eigentlich ermöglicht. Diese Art der Darstellung ist weniger rechenintensiv als bei einem hochaufgelösten Polygonmodell. Ohne Farbtextur ist dieser Effekt deutlich erkennbar:

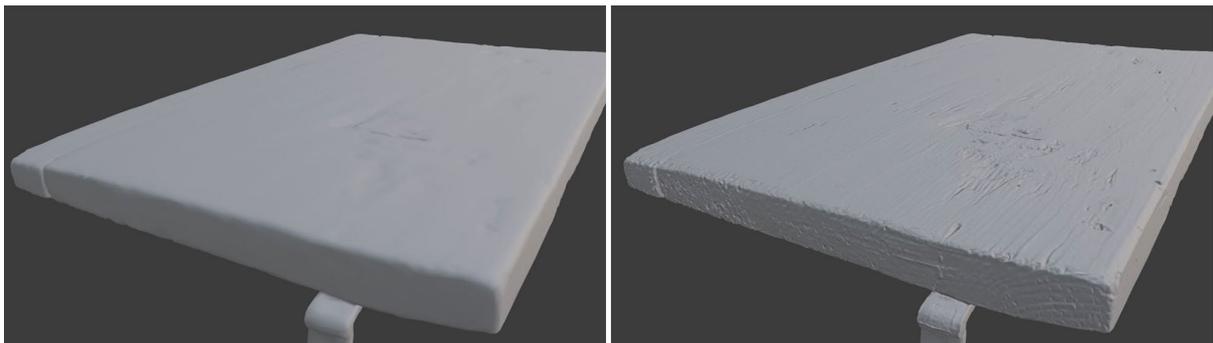


Abbildung 66: Darstellung ohne Normalentextur (links), dasselbe Modell mit Normalentextur (rechts), Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Zusammen mit der Farbtextur ist der Effekt in diesem Beispiel nur schwach sichtbar. Aber insbesondere bei stärker reflektierenden Oberflächen kann eine Normalentextur wesentlich zu einem realistischen Eindruck in der Darstellung beitragen.

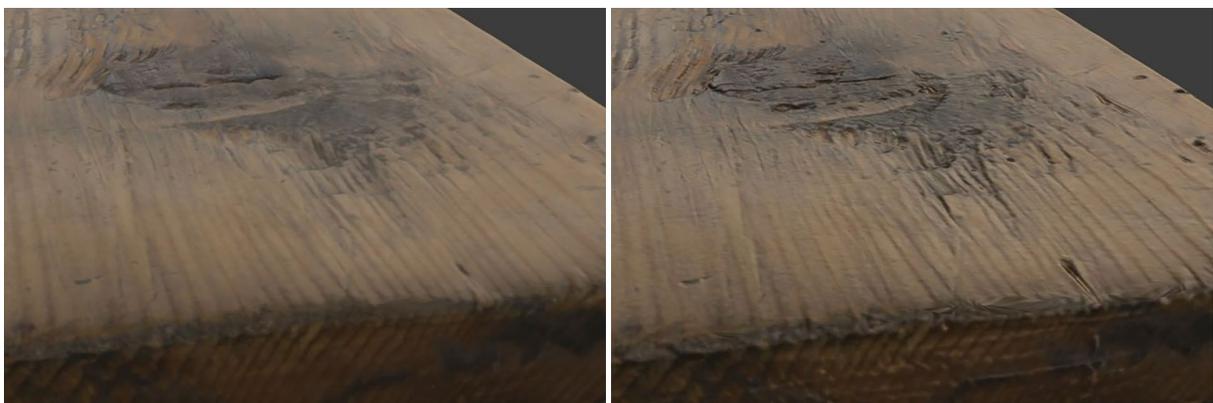


Abbildung 67: Darstellung mit Farbtextur, links: ohne Normalentextur, rechts: mit Normalentextur, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

4.3.4. Zusammenbau, Animation und Export

In der Software Blender werden die Einzelteile aus den Scans zusammengesetzt und gruppiert und für eine Animation vorbereitet. Es wird eine Kamerafahrt erstellt, die den Apparat einmal umrundet, während dieser seine Funktionalität zeigt, wobei zeitweise eine Seitenwand ausgeblendet wird um einen Blick in das Innere zu ermöglichen.



Abbildung 68: Holzschleifapparat 3D-Scan Endergebnis, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

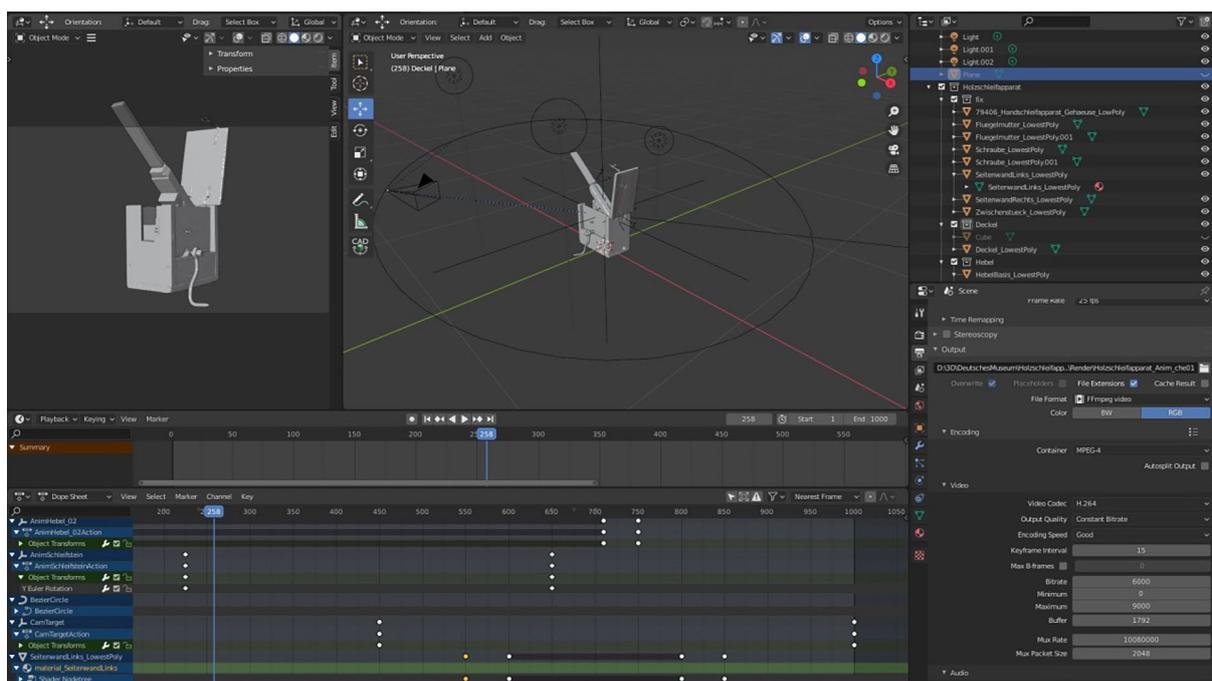


Abbildung 69: Vorbereitung der Animation in Blender, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Zum Abschluss werden zwei Exportoptionen zur Darstellung der Animation gewählt:

- Als 3D-Modell inklusive Animationssequenz in einem webfähigen Format
- Als gerendertes Video der Animation

Das GLTF-Format ist ein freies, für die Darstellung im Webbrowser optimiertes Format. Es gibt zahlreiche Viewer, die in eigene Webseiten eingebunden werden können, aber auch Standalone-Versionen, die auf dem Desktop laufen

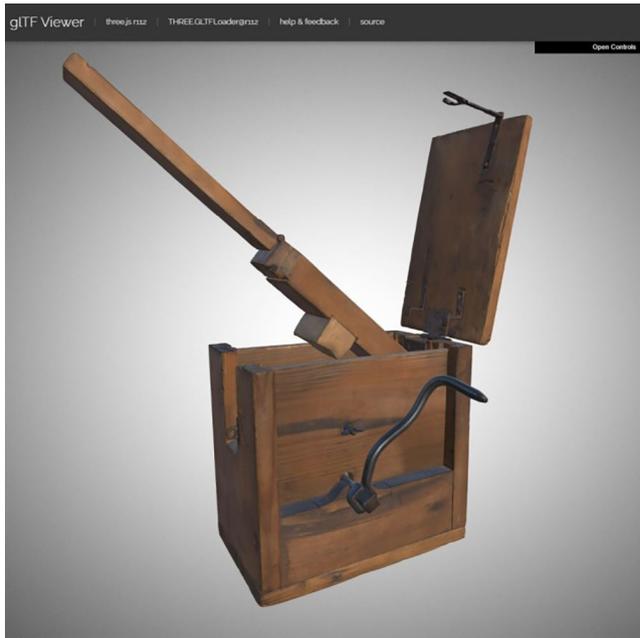


Abbildung 70: Darstellung des Modells im 3D-Viewer, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0



Video wird im PDF
nicht angezeigt

Abbildung 71: Animation des Holzschleifapparats, Animation: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

5. Anwendungsmöglichkeiten für 3D-Digitalisierung

Mit Blick auf den Einsatz der 3D-Digitalisierung im Museum denkt man vielleicht zuerst an einen Scan zur Visualisierung eines Objektes in einer virtuellen Ausstellung. Aber die digitalen Ergebnisse können auch dazu beitragen, reale Herstellungsprozesse zu unterstützen. Gerade in größeren Häusern wie dem Deutschen Museum mit seinen zahlreichen Werkstätten bieten sich dort große Potentiale.

5.1. Beispiel: Dioramenhintergründe – Digitale Dokumentation für einen Nachbau

5.1.1. Hintergrund

Das Deutsche Museum verfügt in seinen Ausstellungen über viele Dioramen, die in den Werkstätten des Hauses entstanden sind. Im Zuge der umfangreichen Sanierungsmaßnahmen und der Neugestaltung sämtlicher Ausstellungen werden diese Dioramen herausgenommen, eingelagert und teilweise in den neuen Ausstellungen weiterverwendet. Die Hintergründe sind allerdings direkt an die Wände gemalt und können zum Großteil nicht erhalten werden. Sie müssen stattdessen für Ihrem nächsten Standort neu geschaffen werden.

Mithilfe von 3D-Scans soll die genaue Form der Hintergründe und dessen Bemalung erfasst werden, um nach einer Reproduktion den perspektivischen Eindruck des Originals wiederherzustellen. Die gescannte Geometrie soll später im CAD bei der Neukonstruktion als Vorlage dienen, während in der Textur das Hintergrundbild festgehalten wird.

5.1.2. Testablauf (Herbst 2020)

An einem Beispiel-Diorama (200cm breit, ca. 400 cm hoch, 140cm tief) werden verschiedene Methoden ausprobiert, um die Qualität der Ergebnisse und den dafür benötigten Zeitaufwand abschätzen zu können. Die zu erfassende Kalotte ist 200 cm breit und 140 cm tief, die Deckenhöhe beträgt ca. 4 m. Als problematisch für den Scan kann sich die einfache Geometrie der Kalotte erweisen, da es kaum Ecken und Kanten gibt, an denen sich die einzelnen Aufnahmen ausrichten können. Um trotzdem eine verlässliche Berechnung zu ermöglichen, soll der Türrahmen und ein Teil des Bodens als Referenz miterfasst werden. Dadurch ergibt sich ein Rundum-Scan. Passen bei der Nachberechnung der Daten Anfang und Ende wieder zusammen, sollte die Geometrie korrekt erfasst worden sein. Ansonsten gäbe es einen Knick und doppelte Flächen am Türrahmen. Da dieser Rahmen allerdings gleichmäßig weiß ist, werden dort mehrere Markierungen aus Klebestreifen hinzugefügt, um die Registrierung der Scanflächen zu unterstützen.

Mit den im Deutschen Museum zum Zeitpunkt der Tests verfügbaren Mitteln kommen hier zwei Scan-Verfahren in Frage:

- Handgeführter Streifenlichtscan
- Photogrammetrie



Abbildung 72: 3D-Scan eines Diorama-Hintergrunde mit Artec Leo (links), mit Photogrammetrie (rechts), Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Test mit Streifenlichtscan

Der mobile Streifenlichtscanner Artec Leo ermöglicht einen schnellen Aufnahmevorgang. Je nach Größe des Objektes nimmt die anschließende Datenverarbeitung in der Software jedoch deutlich mehr Zeit in Anspruch. Bei diesem Test wird auf die Erfassung des oberen Diorama-Himmels verzichtet, da der momentan verfügbare Rechner bereits an seiner Kapazitätsgrenze beansprucht wird. Der Scan dauert ca. 15 Minuten, die Nachbereitung der Daten den Rest des Tages. Das Ergebnis ist zufriedenstellend. Alle Scans lassen sich problemlos zusammenführen, es gibt kaum Ausreißer. Die erzielte Auflösung ist für diesen Einsatz mehr als ausreichend. Die Textur ist erwartungsgemäß leicht verschwommen. Mit der Photogrammetrie ist eine bessere Textur zu erwarten.

Test mit Photogrammetrie

Der zu betreibende Aufwand bei den Aufnahmen für die Photogrammetrie ist deutlich höher. In diesem Fall wird ein halber Tag dafür benötigt. Die Szene wird mit vier LED-Flächenleuchten ausgeleuchtet und mit einer Spiegelreflexkamera von einem Stativ aus aufgenommen.

Bei der Aufbereitung der Daten treten Probleme auf. Obwohl zahlreiche Markierungen am Türrahmen angebracht wurden, schafft die Software keine ausreichende Bestimmung der Kamerapositionen, die Grundlage für weitere Berechnungen zum 3D-Modell ist. Auch der kontrastarme Diorama-Himmel weist zu wenig markante Merkmale für eine automatische, eindeutige Identifizierung von identischen Oberflächenpunkten auf, ein generelles Problem der Photogrammetrie. Auch ein umfangreiches manuelles Setzen von Markierungspunkten über sämtliche Fotos hinweg hilft kaum weiter. Am Ende müssen viele Bilder aus dem Bearbeitungsprozess herausgenommen werden, da sie das Ergebnis zu stark verfälschen. Die übrig gebliebenen Bilder reichen nicht aus, um einen am Ende geschlossenen Himmel zu erhalten.

Die Probleme können durch folgende Umstände verursacht sein:

- In den beengten Verhältnissen ist die Wahl der Kameraperspektiven eingeschränkt.
- Die Beleuchtung wird manchmal verschoben um neue Aufnahmepositionen zu ermöglichen. Dadurch kommt es zu leichten Veränderungen bei der Ausleuchtung. Mit dem bloßen Auge wird dies kaum wahrgenommen, die Auswirkungen bei den Fotoaufnahmen sind später am PC-Bildschirm sichtbar.
- Die Klebestreifen am Türrahmen sind zu sehr in einer Linie angebracht. Eine flächige Verteilung ist sinnvoller. Die Verwendung von ausgedruckten, nummerierten Markern, welche von der Software erkannt werden, wäre vermutlich noch besser gewesen. Diese hätten auch direkt auf der Oberfläche des Diorama-Himmels angebracht werden müssen.



Abbildung 73: Scan-Ergebnis Streifenlichtscan mit Artec Leo (links), Photogrammetrie mit Agisoft Metashape (rechts), Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

5.1.3. Fazit

Beide hier angewandten Verfahren bieten bisher nicht die optimale Lösung für dieses Anwendungsszenario zum Erfassen von Diorama-Hintergründen. Das Streifenlichtverfahren, liefert solide Ergebnisse, ist aber für größere Dioramen aufgrund der benötigten Rechenkapazität nicht gut geeignet. Bei der Photogrammetrie gibt es sicher noch Verbesserungspotential bei der Anwendung. Es zeigt sich jedoch schon so, dass ein relativ großer Aufwand betrieben werden muss, um diese einfachen Kalotten korrekt zu erfassen. Bei der zu erwartenden Anzahl an Dioramen, die digital erfasst werden sollen, wird der Gesamtaufwand zu groß.

Ein LIDAR-Scanner wäre die bessere, weil effizientere Wahl für dieses Anwendungsszenario. Es müssen bei den Diorama-Hintergründen nur einfache Raumgeometrie erfasst werden. Mit nur einem Scandurchlauf könnte die relevante Geometrie bereits vollständig erfasst werden. Zusätzlich mit diesem Scanner aufgenommene Farbbilder, die von der Scansoftware zu einem vollständigen 360°-Panoramabild zusammengefügt werden können, haben zudem den Vorteil, dass diese Aufnahmen aus der gleichen Position erfolgen wie die Geometrieaufnahme. Beides geschieht in einem kombinierten Vorgang. Dies erspart den Aufwand zusätzlicher Aufnahmen mit anderen Kameras, die erst mühsam positioniert und ausgerichtet werden müssten. Die Auflösung der Farbaufnahmen mit einem LIDAR-Scanner reicht im allgemeinen nicht an die Möglichkeiten heran,

die man mit normalen Fotokameras hat. Bei den geringen Entfernungen, die im Anwendungsfall der Dioramen gegeben sind, wäre die Auflösung jedoch sicher ausreichend.



Abbildung 74: LIDAR-Scan Diorama-Hintergrund, Test mit Leihgerät, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

5.1.4. Update 2021

Mit der Anschaffung eines eigenen LIDAR-Scanners (Imager 5016 von Zoller+Fröhlich) im Frühjahr 2021 ist nun vorgesehen, mit diesem Gerät den Ausbau der Dioramen in den folgenden Jahren zu begleiten. Die Modellbauer werden die Aufnahmen durchführen und als Basis für ihre weitere Arbeit zur Wiederherstellung der Hintergründe nutzen.

5.2. Beispiel: Harfenkopf – Scan für 3D-Druck

5.2.1. Hintergrund

Am Beispiel des reich verzierten Kopfes einer Doppelpedalharfe soll in der Musikinstrumente-Ausstellung der Produktionsprozess eines solchen Teils dargestellt werden. Dazu soll eine Kopie des Harfenkopfes angefertigt werden, sowie einige Zwischenprodukte, wie der Holzdrehkörper der Grundform und einzelne Ornamente, die darauf angebracht werden, sowie deren Gussformen. Eine direkte Abnahme der Form mittels Silikonmasse kommt für das Original nicht in Frage. Stattdessen sollen 3D-Scans durchgeführt werden, die als Vorlage für 3D-Ausdrucke verwendet werden können.

5.2.2. Durchführung Teil 1: Scan des gesamten Harfenkopfes (Sommer 2020)

In diesem Fall kommt der Artec Space Spider zum Einsatz, aufgrund seiner hohen Scanauflösung. Der Vorgang verläuft problemlos, trotz der vergoldeten Oberfläche.

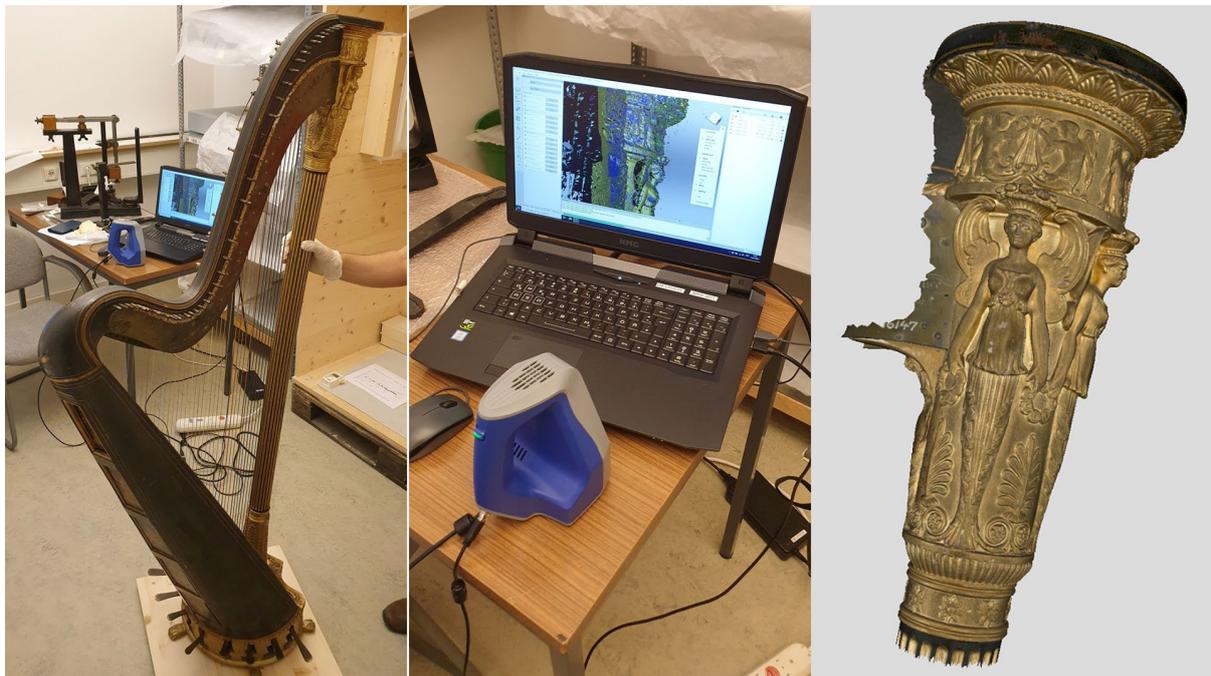


Abbildung 75: Doppelpedalharfe (links), 3D-Scan des Kopfes (mitte), Scanergebnis (rechts), Fotos, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Um die Ornamente im digitalen Objekt von der Grundform trennen zu können, wird das Scanergebnis in ein Programm für Flächenmodellierung (Rhino 6) importiert. Dort wird ein passender Rotationskörper erstellt, der später auf Basis dieser Daten in einer CNC-Drehmaschine aus Holz gefertigt werden kann. Dieser Drehkörper soll vom Scanergebnis in einer booleschen Operation abgezogen werden, um als Resultat die Ornamente inklusive einer rückseitigen Fläche zu erhalten.

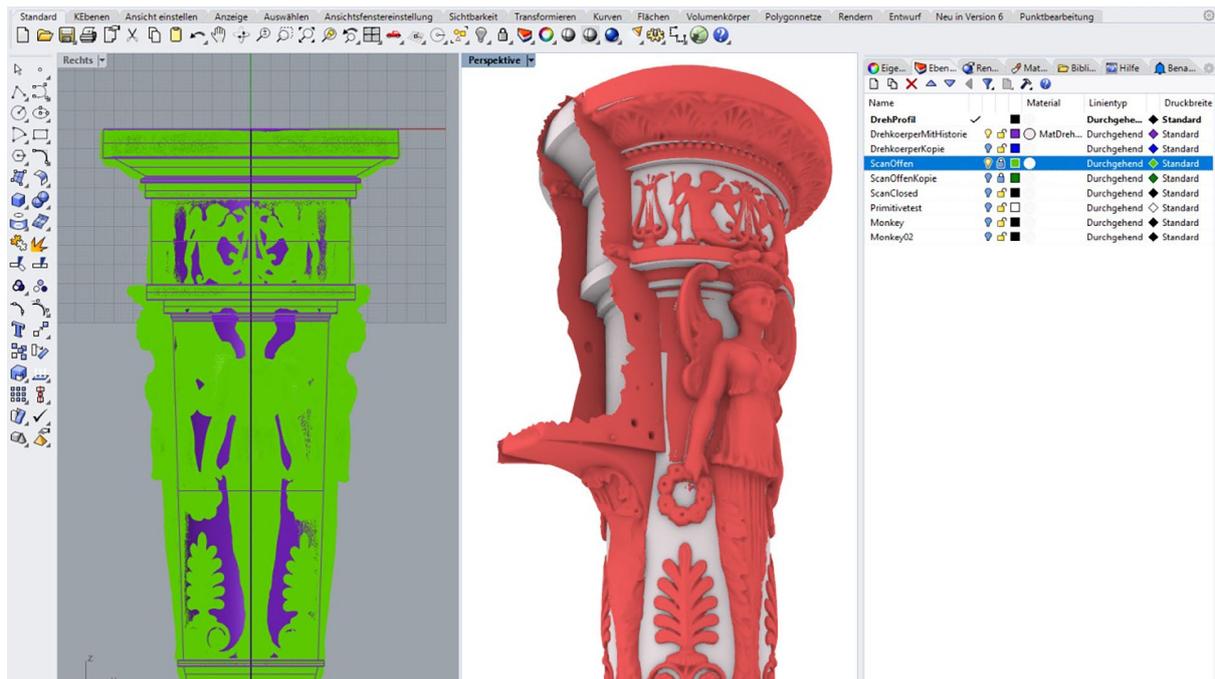


Abbildung 76: Erzeugung eines Drehkörpers in Rhino 6, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0



Abbildung 77: Ansicht nach Subtraktion des Drehkörpers vom Scanmodell in ZBrush / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

5.2.3. Zwischenfazit

Was in der Theorie sehr einfach klingt, stellt sich in der Umsetzung als problematisch heraus. Der Harfenkopf ist leicht verzogen, wodurch der idealer Drehkörper die Scanoberfläche nicht mehr gleichmäßig schneidet. Zudem muss man bedenken, dass der gescannte Körper mit einer Farbschicht überzogen ist, die nicht überall gleich aufgetragen ist und den Ornamenten etwas von ihrer Detailschärfe nimmt.

Es wäre also in diesem Fall ein nicht unerheblicher Aufwand nötig, um in einer Software zur Polygonmodellierung die Daten weiter aufzubereiten. Es kann Schichtdicke abgetragen und die Form nachgeschärft werden, es können Fehlstellen ergänzt und die einzelnen Ornamente ausgeschnitten und für die Gussform begradigt werden, so wie sie ursprünglich angefertigt wurden. Das Problem ist allerdings, dass man sich mit diesen händischen Operationen zu weit von der ursprünglichen Form entfernen könnte.

In unserem Fall wurde in der Zwischenzeit als mögliche Alternative ein Instrumentenbauer gefunden, der bereits von baugleichen Harfen Abdrücke des Harfenkopfes angefertigt hatte und mit diesen Formen ein weiteres Teil erstellen könnte. Inwieweit die Scandaten des Kopfes noch benötigt werden, muss noch erörtert werden. Als Basis für die kostengünstige Variante eines 3D-Drucks zur Darstellung eines Zwischenprodukts in der Erstellung eines Harfenkopfes bleiben die bisherigen Daten weiter verwendbar.

5.2.4. Durchführung Teil 2: Scan einer originalen Ornament-Gussform (Sommer 2021)

In einem Londoner Museum wurde eine originale Gussform für eines der Ornamente unseres Harfenkopfes gefunden und für eine Rekonstruktion ausgeliehen.

Da auch hier kein direkter Abdruck erlaubt ist, wird die gesamte Form 3D-gescannt, inklusive der Holzeinfassung. Dabei kommt wieder der Artec Space Spider zum Einsatz.

Die Nachbearbeitung erfolgt in der freien Software Blender, um das Ergebnis für einen 3D-Druck vorzubereiten. Aus dem Scanergebnis wird die eigentliche Gussform herausgeschnitten. Die Sculpting-Werkzeugen von Blender ermöglichen kleine Korrekturen am 3D-Modell. Abschließend wird die ausgeschnittene Fläche wieder zu einem 3D-Volumen extrudiert und dessen Rückseite in eine ebene Fläche umgeformt.

Neben der Nachbildung der Gussform entsteht auch ein invertiertes Gegenstück, ein Negativ, welches als Druckvorlage für das Gussstück dienen soll. Die ausgedruckte Gussform wird von den Modellbauern wieder in Holz eingefasst und entsprechend dem Original bemalt.



Abbildung 78: Ornament, 3D-Scan der originalen Gussform, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0



Abbildung 79: Ornament, 3D-Modell Scanergebnis, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

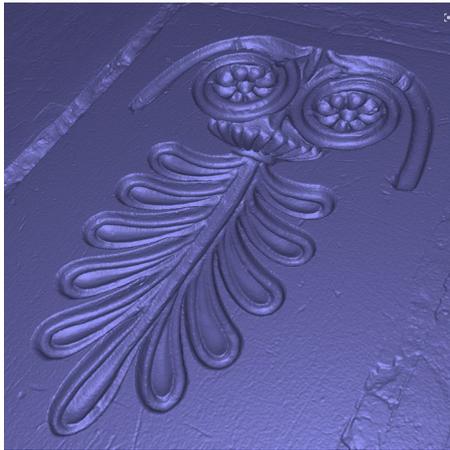


Abbildung 80: Ornament, Detail des Scanergebnisses, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0



Abbildung 81: 3D-gedrucktes Ornament (als Positiv und Negativ), Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0



Abbildung 82: 3D-gedrucktes Ornament, in Holz eingefasst und bemalt, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

5.2.5. Fazit

Es bringt Vorteile mit sich, hauseigene Kapazitäten zum 3D-Scan vorzuhalten, insbesondere in größeren Museen mit eigenen Werkstätten, in denen schon Möglichkeiten zur weiteren Nutzung von Scandaten vorhanden sind, wie zum Beispiel 3D-Drucker. Hier wird mit dem 3D-Scan eine Lücke in der Prozesskette geschlossen, um von einer Idee (Nutzung einer Kopie zu Anschauungszwecken in einer Ausstellung) zum fertigen Produkt zu gelangen.

Dieser Prozess kann intern sehr flexibel gehandhabt werden, ohne über eine externe Vergabe an inhaltliche und zeitliche Vorgaben gebunden zu sein. In diesem Beispiel war zu Beginn nicht sicher, ob das gewählte Verfahren überhaupt zu einem befriedigenden Ergebnis führen würde und es

ergaben sich im Laufe der Zeit alternative Lösungswege. Darauf hätte man bei einer externen Beauftragung ohne zusätzliche Kosten und Verzögerungen nur schwer reagieren können.

Es wäre für das Ausstellungsteam auch schwierig gewesen, diesen Auftrag von Beginn an eindeutig zu beschreiben, da noch keine ausreichende Vorstellung von den Möglichkeiten vorhanden war, die sich aus der Nutzung von 3D-Scans ergeben. Hier konnte die interne Digitalisierungsabteilung helfen, das allgemeine Verständnis über diese neue Technologie im Haus weiter zu verbreiten.

5.3. Beispiel: Schiffsbrücke – Echtzeitvisualisierung (als Punktwolke oder Polygonoberflächen?)

LIDAR-Scanner sind im Wesentlichen für die Vermessung von Gebäuden und Landschaften entwickelt worden. Dazu passende Viewer bieten Werkzeuge, um in den Punktwolken Schnittflächen zu definieren, Abstände und Winkel zu bestimmen und Orthogonal-Ansichten zu erstellen. Eine Einfärbung der Punktwolken nach Daten aus Farbaufnahmen ist optional, jedoch nicht zentral für den Workflow. Es hilft bei der Orientierung in der 3D-Szene, aber nicht jeder LIDAR-Scanner bietet diese Funktion.

Zunehmend werden diese Daten jedoch auch für eine reine Visualisierung verwendet. Hierfür ist auch die Qualität der Farbaufnahme entscheidend. Deshalb werden immer mehr Geräte mit dieser Option ausgestattet.

Bereits in der Scansoftware können Kameraflüge durch die 3D-Szene eingerichtet und als Video exportiert werden. Aber die Punktwolken lassen sich auch exportieren und zum Beispiel in einer Game-Engine begehbar machen, auch in VR.

Am Beispiel der „Wörmann-Brücke“, der Kommandobrücke eines Handelsschiffes aus der Kolonialzeit, soll dies durchgeführt werden. Anlass dafür ist eine Anfrage vom Kuratoren-Team der Schifffahrtsausstellung zu Möglichkeiten, den Aufbau der Brücke vor dem Abbau in 3D zu dokumentieren und für später erlebbar zu machen. Bei der Gelegenheit sollen die Punktwolken auch für Messungen zur Vorbereitung der Ausbaumaßnahmen genutzt werden.



Abbildung 83: Wörmann-Brücke, begehbares Diorama, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

5.3.1. Durchführung der 3D-Scans

Insgesamt 19 Scans werden in dem ca. 5 x 5 Meter großen begehbaren Diorama erstellt, verteilt auf zwei Aufnahmehöhen. Es wird eine niedrige Auflösung (5000 Punkte in der Horizontalen) verwendet, da nicht erwartet wird, eine höhere Punktedichte für eine Echtzeitdarstellung nutzen zu können. Außerdem sollen die Scans nicht zu lange dauern, weil die Aufnahmen mitten im Publikumsverkehr stattfinden und die Schiffsbrücke ein Durchgangsbereich ist.

Da der Raum nur schwach ausgeleuchtet ist, wird für die Farbaufnahmen die LED-Beleuchtung des Scanners hinzugeschaltet.

Leider kann nicht verhindert werden, dass etwas zur Hälfte der gesamten Aufnahmen ein Besucher am Steuerrad dreht. Daher kommt es später zur doppelten Darstellung in der 3D-Ansicht.

5.3.2. Datenaufbereitung

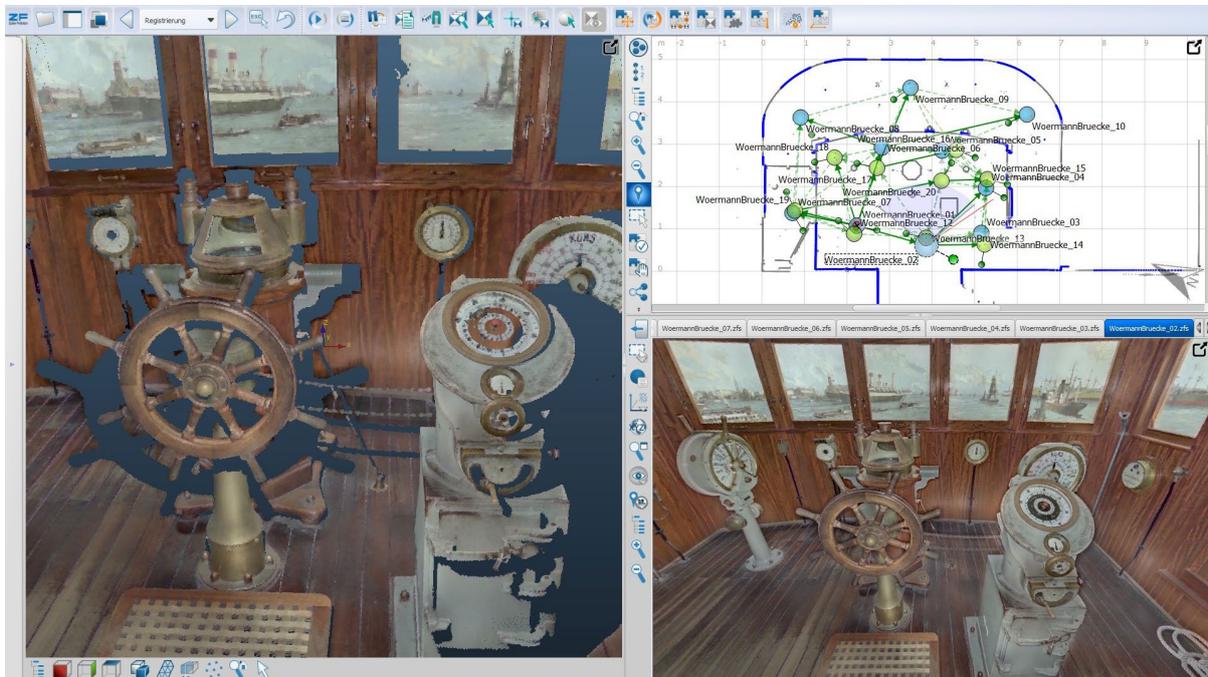


Abbildung 84: Wörmann-Brücke, Scanansicht in Scanner-Software „LaserControl“, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Nach den üblichen Schritten in der Scansoftware (Filterung von Fehlmessungen, Positionierung der Scans und Einfärbung der Punkte), wird das Ergebnis als eine zusammenhängende Punktwolke exportiert für eine Weiterverarbeitung in der Software CloudCompare. Hier erfolgt eine weitere Reduzierung der Punktedichte. Während im Scanprogramm nur eine Punktereduzierung für einzelne Scans durchgeführt werden kann und die Punkte nur aus Sicht der jeweiligen Scanposition regelmäßig verteilt erscheinen, tatsächlich jedoch unregelmäßig im 3D-Raum verstreut liegen, werden hier die gesamten Daten nun gleichmäßig weiter ausgedünnt. Für die weitere Verwendung in anderen Programmen erstellen wir zwei unterschiedlich große Punktwolken (5 Mio. und 20 Mio. Punkte).

Unity verwendet ein Plug-In aus dem Asset-Store, um diese Punktwolken einzulesen und darstellen zu können (<https://assetstore.unity.com/packages/tools/utilities/point-cloud-viewer-and-tools-16019>). Die 3D-Szene wird für die Verwendung mit einer VR-Brille vorbereitet und aus der Perspektive des Benutzers begehbar gemacht.

5.3.3. Ergebnis

Die Performance beim Abspielen der Szene ist in Ordnung, auch in VR. Es bestünde die Möglichkeit, noch größere Datenmengen darzustellen. Extrem große Punktwolken könnten hierfür in kleinere Abschnitte aufgeteilt und bei Bedarf nachgeladen werden.

In der Visualisierung kann die Größe der dargestellten Punkte eingestellt werden, so dass sich die Lücken optisch schließen lassen. Die Punktgröße lässt sich abhängig von der Entfernung zum Betrachter verändern.

Die Punkte werden dargestellt als Scheiben oder Rechtecke, die immer zum Betrachter ausgerichtet sind. Je nach Entfernung wird dabei eine Scheibe vor der benachbarten Scheibe abgebildet. Diese Reihenfolge kann sich je nach Betrachtungswinkel ändern, was bei tausenden Punkten im Blickfeld zu einem stetigen Flimmern führt. Dieser Effekt wirkt vor Allen im VR störend. Bei dem verwendeten Plug-In hat man jedoch die Möglichkeit, die Punkte als 3D-Würfel darzustellen, wodurch dieses Flimmern stark reduziert wird.

Auffällig ist die unterschiedliche Einfärbung der einzelnen, direkt nebeneinanderliegenden Punkte, was zu stark verwaschenen Oberflächenfarben führt. Die dargestellten Flächen bestehen aus einer Mischung von Punkten unterschiedlicher Scanpositionen. Von Jeder dieser Positionen erhält die Kamera einen unterschiedlichen Farbeindruck von reflektierenden Oberflächen, in diesem Fall den lackierten Holz- und Metalloberflächen. Das bei der Aufnahme verwendete Licht hat diesen Effekt noch verstärkt.



Abbildung 85: Würmann-Brücke, Punktwolke in Game-Engine, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

5.3.4. Photogrammetrie als Alternative

Testweise wurden die Scandaten auch in die Photogrammetriesoftware RealityCapture importiert und ausschließlich mit diesem Input zu einem Polygonmodell umgewandelt. Das Ergebnis der Geometrie ist trotz der niedrigen Scanauflösung besser als erwartet. Die berechnete Textur ist jedoch eindeutig zu niedrig. Hier ist im Gegensatz zu den bisherigen Projektbeispielen der Gesamteindruck nach der Texturierung schlechter. Hier wären bei einer höheren Scanauflösung allerdings noch große Qualitätssprünge zu erwarten.

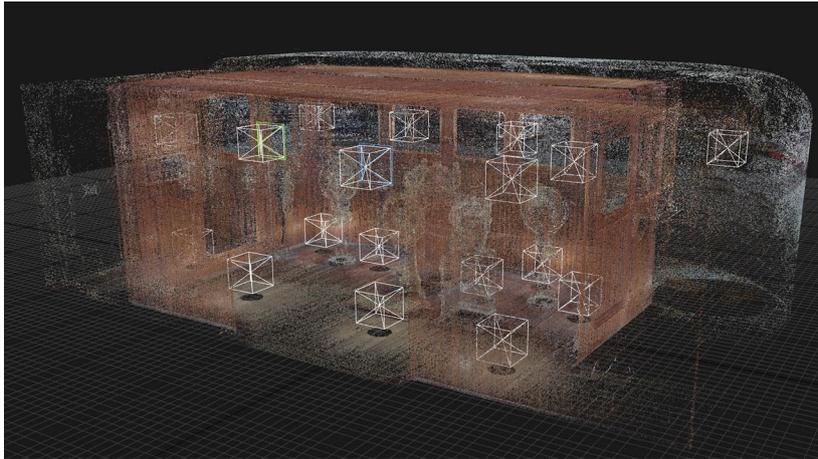


Abbildung 86: Würmann-Brücke, Photogrammetrie, 3D-Berechnung aus den Ansichten der Laserscanpositionen, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0



Abbildung 87: Würmann-Brücke, Polygonmodell aus niedrig aufgelösten Laserscans, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

5.3.5. Ausblick

Der Scanvorgang soll noch einmal durchgeführt werden, diesmal mit hoher Auflösung und mit einem anderen Beleuchtungssetup, das mehr auf eine indirekte Aufhellung des Raums zielt, um starke Reflexionen zu vermeiden. Die hohe Auflösung soll für einen erneuten Test mit Photogrammetrie verwendet werden, diesmal mit einer begrenzten Anzahl zusätzlicher Farbaufnahmen mit einer Spiegelreflexkamera, die hauptsächlich für eine Verbesserung der Farbtextur dienen sollen. Anschließend sollen der Gesamteindruck und die Performance der beiden Ergebnisse (Punktwolke und Polygonmodell) in der Game-Engine noch einmal verglichen werden.

5.4. Beispiel: Büsten im Ehrensaal – Nutzung für diverse Projekte



Abbildung 88: Ehrensaal im Deutschen Museum, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Die 38 Marmorbüsten und -reliefs im Ehrensaal des Deutschen Museums werden mit dem handgeführten Streifenlichtscanner Artec Leo aufgenommen und in der dazu gehörenden Scansoftware ArtecStudio zu fertigen 3D-Modellen aufbereitet, jeweils in zwei verschiedenen Auflösungen. Da die Objekte bezüglich ihrer Form und Materialität keine besonderen Schwierigkeiten machen, ist das Ergebnis auf Anhieb zufriedenstellend.

Um die Figuren als Gruppe in Szene zu setzen, wird der Ehrensaal selbst als Low-Poly-Modell in der Software Blender nachgebaut. Als Grundlage für die Modellierung dienen Grundrisszeichnungen und selbst durchgeführte Messungen per Hand. Die Texturen basieren auf einfachen Fotos mit dem Smartphone. Da die Szene für interne Testanwendungen gedacht ist, kommt es hier nicht auf absolute Präzision an.

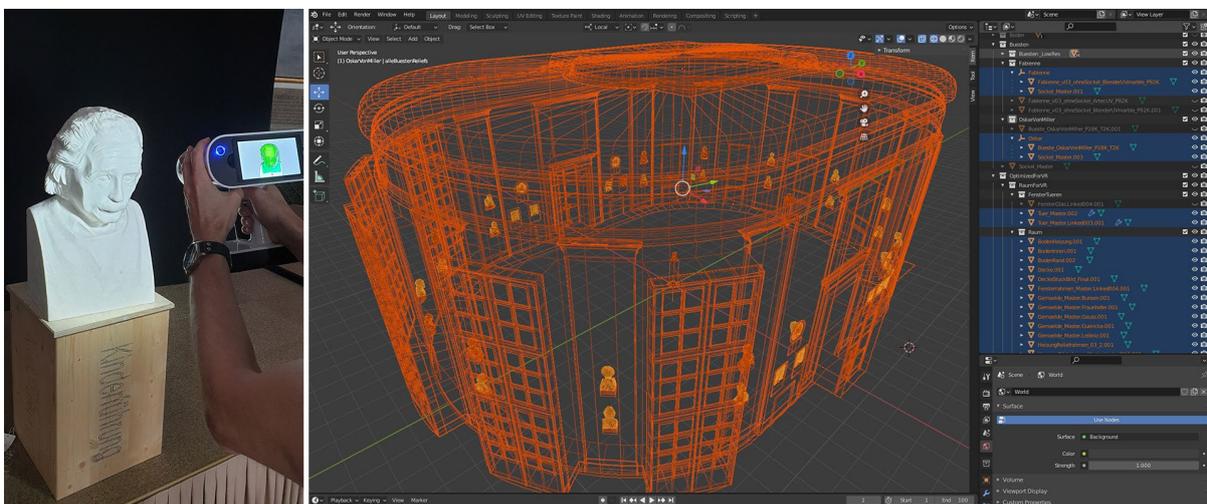


Abbildung 89: Ehrensaal, 3D-Scan der Büsten (links), Modellierung des Saals (rechts), Foto/Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

5.4.1. Anwendung in einer Web-3D-Szene

Die Low-Poly-Versionen der gescannten Modelle werden im nachmodellierten Ehrensaal platziert und auf Mozilla Hub hochgeladen. Mozilla Hubs ist ein Open-Source-Projekt der Mozilla-Foundation. Dort können browserbasiert 3D-Räume erstellt und von mehreren Nutzern zeitgleich betreten und zum Teil umgestaltet werden, um so zum Beispiel virtuellen Ausstellungsräume zu erschaffen. Dafür werden eigene oder von Sketchfab bereitgestellte Modelle verwendet. Innerhalb dieser Räume

können die Besucher miteinander kommunizieren (<https://hubs.mozilla.com/>). Unser Ehrensaal wird für eine virtuelle Weihnachtsfeier verwendet.



Abbildung 90: Ehrensaal mit Büsten, Verwendung in Mozilla Hubs, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

5.4.2. Verwendung in einer Kunstinstallation

Eine weitere Verwendung der Modelle ergibt sich anlässlich eines Kunstfestivals, das 2021 zeitgleich zur Langen Nacht der Museen im Deutschen Museum stattfindet. Eine Gruppe von Videokünstlern nutzt die bereitgestellten 3D-Modelle für den Aufbau einer 3D-Szene in einer Game-Engine, in der die Büsten mit Licht- und Partikeleffekten interagieren. Dies wird von virtuellen Kameras aufgenommen. Diese Videos werden im realen Ehrensaal wieder auf die entsprechenden Büsten projiziert, so dass der Eindruck erscheint, als würden sie tatsächlich aus unterschiedlichen Richtungen angestrahlt, Schatten werfen und mit Farbe übergossen.



Abbildung 91: Ehrensaal, Videoprojektion auf die realen Büsten, Fotos: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

In einer anderen Videoinstallation werden die Büsten, neben anderen gescannten Objekten, in einer stereoskopischen Darstellung an die Wände im VRlab des Museums projiziert. Diese scheinen dann für den Betrachter, der eine 3D-Brille trägt, fast greifbar im Raum zu schweben, während sie um sich selbst rotieren.



Abbildung 92: gescannte 3D-Modelle der Büsten, Stereoprojektion auf drei Wände, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

5.5. Beispiel: Diorama Töpferwerkstatt – Augmentierung mit animierten Scanobjekten



Abbildung 93: Diorama Römische Töpferwerkstatt, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Zu Demonstrationszwecken über die Möglichkeiten zur Nutzung von Augmented Reality Anwendungen in einer Ausstellung wird ein Prototyp erstellt am Beispiel eines Dioramas. Dieses Diorama zeigt eine römische Töpferwerkstatt. Verschiedene Tätigkeiten werden dargestellt von einzelnen Figuren, zum Beispiel einer Person an einer Töpferscheibe oder eine weitere Person beim Befeuern des Ofens. Außer einer kurzen allgemeinen Einführung auf einer Tafel sind keine weiteren Erklärungen gegeben. Eine AR-App soll nun mehr Inhalte bereitstellen, ausgehend von der Tätigkeitsbeschreibung der Figuren.

5.5.1. Durchführung

Hierfür wird jede dieser ca. 20 cm großen Figuren aus dem Diorama entnommen und mit dem handgeführten Streifenlichtscanner Artec Space Spider gescannt. Für diese Art Objekt ist der Scanner sehr gut geeignet, jede Figur benötigt nur ungefähr 30 bis 45 Minuten bis zum Endergebnis.



Abbildung 94: Diorama Römische Töpferwerkstatt, Scan der Figuren mit Artec Space Spider, Foto/Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

Das gesamte Diorama, wird ebenfalls aufgenommen, diesmal photogrammetrisch, jedoch nur mit relativ wenigen Bildern und nur von einer Seite. Das Ergebnis ist entsprechend lückenhaft, soll jedoch nur als 3D-Referenz zur Platzierung der virtuellen Inhalte in der AR-Anwendungen dienen.



Abbildung 95: Diorama Römische Töpferwerkstatt, Scan der Gesamtszene photogrammetrisch, Foto/Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

5.5.2. Ergebnis

Die gescannten Figuren werden in einem weiteren Bearbeitungsschritt für eine Animation vorbereitet und gemäß ihrer Tätigkeit bewegt. Diese kurzen Sequenzen lassen sich in der fertigen App vom Nutzer starten, wenn er über das Handy oder Tablet auf das Diorama schaut und dabei auf die Figuren tippt. Zusätzlich erscheinen Infotexte auf dem Bildschirm.

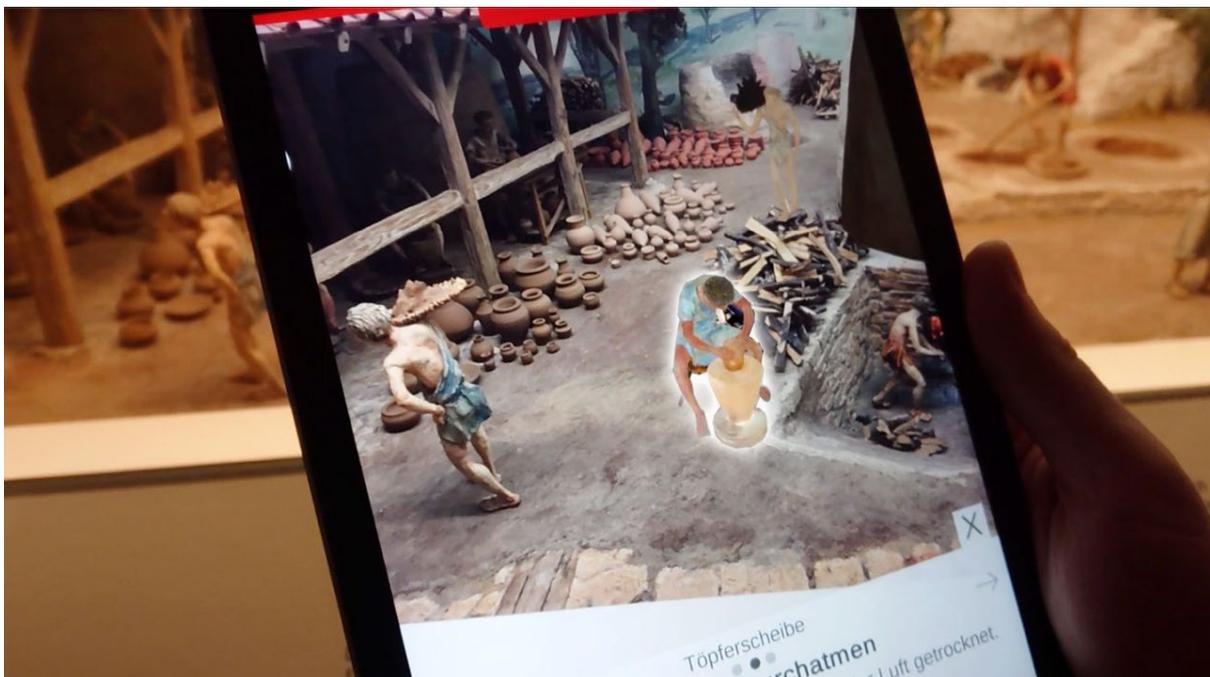


Abbildung 96: Diorama Römische Töpferwerkstatt, Ergebnis in AR-Anwendung, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0

6. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: LIDAR-Scanner im Einsatz, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	8
Abbildung 2: Ergebnis LIDAR-Scan, 360°-Ansicht der Intensität, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	9
Abbildung 3: Ergebnis LIDAR-Scan, eingefärbte 3D-Punktewolke, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	9
Abbildung 4: Phasenverschiebung, Grafik: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	10
Abbildung 5: Microsoft Kinect für Xbox One, Foto: Wikimedia, Public Domain.....	11
Abbildung 6: Kamera-Array des iPhone12 Pro mit LIDAR-Kamera (unten rechts), Quelle: Wikimedia, CC SA 4.0, Autor: KKPCW	11
Abbildung 7: Triangulation, Grafik: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	12
Abbildung 8: Photogrammetrie im Einsatz, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	14
Abbildung 9: Prinzip CT-Zeilendetektor, Grafik: T.Brandmüller, Quelle: Wikimedia, CC BY-SA 3.0	16
Abbildung 10: Prinzip CT-Flächendetektor, Grafik: T.Brandmüller, Quelle: Wikimedia, CC BY-SA 3.0	17
Abbildung 11: CT-Daten im Viewer, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	18
Abbildung 12: 3D-Scan Arbeitsraum, Grafik: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	21
Abbildung 13: Stationärer Streifenlichtscanner, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	22
Abbildung 14: Handgeführter Streifenlichtscanner, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	23
Abbildung 15: Handgeführter Laserscanner mit externem Positions-Tracking, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	24
Abbildung 16: Photogrammetrie, unterstützt durch Roboterarm (CultArm3D), Foto: Fraunhofer IGD	25
Abbildung 17: diffuse und spiegelnde Reflektion, Grafik: GianniG46, Wikimedia CC BY-SA 3.0.....	26
Abbildung 18: Polarisation, Grafik: Bob Mellish, Wikimedia CC BY-SA 3.0.....	26
Abbildung 19: Polarisationsfilter in verschiedenen Stellungen, Fotos: Wikimedia, Public Domain.....	26
Abbildung 20: diffuse Reflektion, Grafik: GianniG46, Wikimedia CC BY-SA 3.0	27
Abbildung 21: Einsatz von Polarisationsfiltern bei Metalloberflächen, Foto: www.vision-doctor.com	28
Abbildung 22: teilweise Polarisierung an nichtmetallischer Oberfläche, Grafik: Wikimedia, Public Domain.....	28
Abbildung 23: automatische Schließung von Scanlücken, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	29
Abbildung 24: Automatenfigur Predigender Mönch, Foto: Konrad Rainer, Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	31
Abbildung 25: Predigender Mönch, Kleid getrennt von Mechanik, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	31
Abbildung 26: Predigender Mönch gescannt mit Artec Space Spider, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	32
Abbildung 27: Rohscan-Ansicht in ArtecStudio, Einzelframe (links) und alle Frames (rechts), Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	33
Abbildung 28: 3D-Modell nach Fusion der Scanframes, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	34
Abbildung 29: Polygonreduzierung und Texturierung, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	34
Abbildung 30: ZEISS RealScan scannt Predigenden Mönch , Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	35

Abbildung 31: Predigender Mönch, Ergebnis mit ZEISS RealScan, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	36
Abbildung 32: Predigender Mönch, Photogrammetrie Kamera-Alignment, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	37
Abbildung 33: Ergebnis Photogrammetrie, verrauschte Oberfläche, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	38
Abbildung 34: Scanlücken, automatische Schließung in Agisoft Metashape , Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	38
Abbildung 35: Ergebnis-Vergleich Photogrammetrie (links), RealScan (mitte), Space Spider (rechts), Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	39
Abbildung 36: Spiegelsextant von Brander & Höschel, Foto: Konrad Rainer, Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	40
Abbildung 37: manuelle Korrektur von Fehlstellen in ArtecStudio, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	41
Abbildung 38: Ergebnis mit Artec Space Spider: leicht verrauschte Oberfläche, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	41
Abbildung 39: Ergebnis mit RealScan:, stark abgerundete Kanten, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	42
Abbildung 40: Vergleich der Ergebnisse: RealScan (links), Space Spider (rechts), Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	42
Abbildung 41: Gleichdruck-Dampfturbine, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	43
Abbildung 42: Gleichdruck-Dampfturbine, Aufnahmen für Photogrammetrie, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	44
Abbildung 43: Gleichdruck-Dampfturbine, Alignment in RealityCapture, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	45
Abbildung 44: Gleichdruck-Dampfturbine, Scanlücken, Artec Leo (links), Photogrammetrie (rechts) , Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	46
Abbildung 45: Gleichdruck-Dampfturbine, Gesamteindruck texturiert, Artec Leo (links), Photogrammetrie (rechts) , Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	46
Abbildung 46: Gleichdruck-Dampfturbine, Oberflächenqualität und Details, Artec Leo (links), Photogrammetrie (rechts) , Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	47
Abbildung 47: Ausstellung Historische Luftfahrt, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	48
Abbildung 48: Ausstellung Historische Luftfahrt, Scanpositionen, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	48
Abbildung 49: Fehler beim Scannen spiegelnder Flächen, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	49
Abbildung 50: Scanergebnis als Punktwolke, Screenshot : Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	50
Abbildung 51: Verwendung der Punktwolke in Kunstinstallation, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	50
Abbildung 52: Beleuchtungswagen von Siemens und Halske, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	51
Abbildung 53: LIDAR-Scanpositionen am Beleuchtungswagen, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	52
Abbildung 54: Photogrammetrieaufnahmen am Beleuchtungswagen, Foto/Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	53
Abbildung 55: Photogrammetrie Oberflächenqualität, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	54

Abbildung 56: Beleuchtungswagen, Ergebnis aus Photogrammetrie, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	54
Abbildung 57: Retopologisierung am Beispiel Holzschleifapparat, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	56
Abbildung 58: Sulzer Dampfmaschine, Modell aus Scandaten, stark reduziert, Screenshots: VR Dynamix, CC BY-SA 4.0.....	57
Abbildung 59: Sulzer Dampfmaschine, nachmodelliert, getrennt nach Bauteilen, Screenshots: VR Dynamix, CC BY-SA 4.0.....	58
Abbildung 60: Holzschleifapparat von F.G.Keller, Foto: HJBecker / © Deutsches Museum	61
Abbildung 61: Holzschleifapparat zerlegt für 3D-Scan / Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	62
Abbildung 62: Rohscandaten (links), Fusionsergebnis mit automatischer Lückenfüllung (mitte), Nachbearbeitung (rechts), Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	62
Abbildung 63: Holzschleifapparat Scanergebnis Gehäuse, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	63
Abbildung 64: Reduzierung der Polygonzahl in ZBrush, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	63
Abbildung 65: Ausschnitt der generierten Normalentextur, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	64
Abbildung 66: Darstellung ohne Normalentextur (links), dasselbe Modell mit Normalentextur (rechts) , Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	64
Abbildung 67: Darstellung mit Farbtextur, links: ohne Normalentextur, rechts: mit Normalentextur, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	64
Abbildung 68: Holzschleifapparat 3D-Scan Endergebnis, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	65
Abbildung 69: Vorbereitung der Animation in Blender, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	65
Abbildung 70: Darstellung des Modells im 3D-Viewer, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	66
Abbildung 71: Animation des Holzschleifapparats, Animation: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	66
Abbildung 72: 3D-Scan eines Diorama-Hintergrunde mit Artec Leo (links), mit Photogrammetrie (rechts), Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	68
Abbildung 73: Scan-Ergebnis Streifenlichtscan mit Artec Leo (links), Photogrammetrie mit Agisoft Metashape (rechts), Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	69
Abbildung 74: LIDAR-Scan Diorama-Hintergrund, Test mit Leihgerät, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	70
Abbildung 75: Doppelpedalharfe (links), 3D-Scan des Kopfes (mitte), Scanergebnis (rechts), Fotos, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	71
Abbildung 76: Erzeugung eines Drehkörpers in Rhino 6, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	72
Abbildung 77: Ansicht nach Subtraktion des Drehkörpers vom Scanmodell in ZBrush / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	72
Abbildung 78: Ornament, 3D-Scan der originalen Gussform, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	73
Abbildung 79: Ornament, 3D-Modell Scanergebnis, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	73

Abbildung 80: Ornament, Detail des Scanergebnisses, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	74
Abbildung 81: 3D-gedrucktes Ornament (als Positiv und Negativ), Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	74
Abbildung 82: 3D-gedrucktes Ornament, in Holz eingefasst und bemalt, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	74
Abbildung 83: Wörmann-Brücke, begehbare Diorama, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	76
Abbildung 84: Wörmann-Brücke, Scanansicht in Scanner-Software „LaserControl“, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	77
Abbildung 85: Wörmann-Brücke, Punktwolke in Game-Engine, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	78
Abbildung 86: Wörmann-Brücke, Photogrammetrie, 3D-Berechnung aus den Ansichten der Laserscanpositionen, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	79
Abbildung 87: Wörmann-Brücke, Polygonmodel aus niedrig aufgelösten Laserscans, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	79
Abbildung 88: Ehrensaal im Deutschen Museum, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	80
Abbildung 89: Ehrensaal, 3D-Scan der Büsten (links), Modellierung des Saals (rechts), Foto/Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	80
Abbildung 90: Ehrensaal mit Büsten, Verwendung in Mozilla Hubs, Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	81
Abbildung 91: Ehrensaal, Videoprojektion auf die realen Büsten, Fotos: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	81
Abbildung 92: gescannte 3D-Modelle der Büsten, Stereoprojektion auf drei Wände, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	82
Abbildung 93: Diorama Römische Töpferwerkstatt, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.83	
Abbildung 94: Diorama Römische Töpferwerkstatt, Scan der Figuren mit Artec Space Spider, Foto/Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	83
Abbildung 95: Diorama Römische Töpferwerkstatt, Scan der Gesamtszene photogrammetrisch, Foto/Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0.....	84
Abbildung 96: Diorama Römische Töpferwerkstatt, Ergebnis in AR-Anwendung, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 4.0	84