

3D-Digitalisierung im Museum

Erläuterungen zu Scanverfahren und deren Anwendung im musealen Bereich -
Erfahrungsberichte

Work In Progress

ChangeLog

| Datum | Version | Autor | Anmerkung |
|-------------------|----------------|--|------------------|
| xx.09.2020 | 1.0 | Claus Henkensiefken, Deutsches Museum | |
| | | | |

Inhaltsübersicht

| | |
|---|----|
| ChangeLog..... | 2 |
| Inhaltsübersicht | 3 |
| Einleitung | 5 |
| 1. 3D-Scanverfahren - Übersicht..... | 6 |
| 1.1. Time of Flight | 6 |
| 1.1.1. Time-of-Flight Kameras..... | 7 |
| 1.1.2. Phasenverschiebung | 7 |
| 1.2. Triangulation | 8 |
| 1.2.1. Laser-Triangulation | 9 |
| 1.2.2. Structured Light | 9 |
| 1.2.3. Photogrammetrie..... | 10 |
| 1.3. Computertomographie (CT)..... | 11 |
| 1.3.1. Aufnahmesysteme | 12 |
| 1.3.2. Messergebnis | 12 |
| 1.3.3. Rekonstruktion..... | 13 |
| 1.3.4. Visualisierung | 13 |
| 1.4. Weitere Information | 14 |
| 2. 3D-Scanner – Auswahlkriterien und Limitationen | 14 |
| 2.1. Auflösung | 14 |
| 2.2. Genauigkeit | 14 |
| 2.3. Geschwindigkeit..... | 14 |
| 2.4. Arbeitsbereich..... | 15 |
| 2.5. Farbwiedergabe | 15 |
| 2.6. Mobilität – Anwendungsart | 16 |
| 2.7. Grenzen der Anwendung | 18 |
| 2.7.1. Reflexionen an Oberflächen..... | 19 |
| 2.7.2. Abgeschattete Bereiche | 22 |
| 2.7.3. Dunkle Oberflächen | 22 |
| 2.7.4. Transparente Oberflächen | 23 |
| 2.7.5. Einsatz von Mattierungssprays | 23 |
| 2.8. Weitere Informationen | 23 |
| 3. Durchführung von 3D-Scans | 24 |
| 3.1. Beispiel 1: Automatenfigur Predigender Mönch | 24 |
| 3.1.1. Artec Space Spider (Streifenlicht handgeführt) | 25 |
| 3.1.2. Zeiss RealScan (Streifenlicht stationär)..... | 27 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.1.3. | Photogrammetrie..... | 29 |
| 3.1.4. | Abschließender Vergleich der Methoden..... | 31 |
| 3.2. | Beispiel 2: Spiegelsextant von Brander & Höschel | 32 |
| 3.2.1. | Artec Space Spider | 32 |
| 3.2.2. | Zeiss RealScan | 34 |
| 3.2.3. | Vergleich der Ergebnisse..... | 35 |
| 3.3. | Beispiel 3: Holzschleifapparat von F.G. Keller..... | 36 |
| 3.3.1. | Durchführung..... | 37 |
| 3.3.2. | Ergebnis..... | 37 |
| 4. | Nachbearbeitung | 38 |
| 4.1. | Mögliche Anwendungsfälle..... | 38 |
| 4.1.1. | Retopologisierung..... | 38 |
| 4.1.2. | Remodellierung / Rekonstruktion..... | 39 |
| 4.1.3. | Texturierung..... | 40 |
| 4.1.4. | Animation..... | 40 |
| 4.1.5. | Exportoptionen | 41 |
| 4.2. | Softwareauswahl..... | 41 |
| 4.3. | Beispiel: Holzschleifapparat..... | 43 |
| 4.3.1. | Retopologisierung und Texturierung | 43 |
| 4.3.2. | Zusammenbau, Animation und Export | 44 |
| 5. | Einsatzgebiete im Museum..... | 46 |
| 5.1. | Digitales Backup für Nachbau von Dioramen | 46 |
| 5.1.1. | Hintergrund..... | 46 |
| 5.1.2. | Testablauf..... | 47 |
| 5.1.3. | Fazit | 49 |
| 5.2. | Scan für 3D-Druck | 50 |
| 5.2.1. | Hintergrund..... | 50 |
| 5.2.2. | Durchführung..... | 50 |
| 5.2.3. | Fazit | 51 |
| 6. | Abbildungsverzeichnis | 52 |

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 Dimension 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 Vorschlägen, wie sich die 3D-Digitalisierung über die reine Präsentation für die Besucher auch einsetzen lässt, um klassische Entwicklungs- und Baumaßnahmen im Museum 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 der Objekte, ihre Oberflächenbeschaffenheit und die Umgebungsbedingungen, bei denen der Scan durchgeführt wird. Den einen optimalen Scanner für Alles gibt es nicht.

Unterteilt nach dem zugrundeliegendem technischen Verfahren 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 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:

- Time of Flight
- Triangulation
- Computertomographie

1.1. 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.

Es wird immer nur ein Punkt pro Zeitintervall erfasst. Um eine Fläche zu erfassen, wird der Strahl rasterförmig darüber geführt. Durch den Einsatz schnell beweglicher Spiegel im Scanner lassen sich größere Flächen schnell erfassen. Geräte dieser Art erfassen ca. 100.000 Punkte pro Sekunde.

Ein Vorteil dieser Technik ist die hohe Reichweite, die mehrere hundert Meter betragen kann. Meist wird in diesen Systemen Laserlicht eingesetzt. Daher werden Geräte dieser Art oft Laserscanner genannt. Das Verfahren ist auch unter dem Begriff „LIDAR“ bekannt (Light Detection and Ranging).

Es erfordert allerdings eine sehr präzise Zeiterfassung. Um eine Messgenauigkeit von 1cm zu erreichen, ist eine Zeitmessung im Picosekunden-Bereich erforderlich. Die Geräte sind daher sehr teuer. Scanner mit hoher Genauigkeit kosten oft über 100.000 Euro.

3D-Scanner dieser Art werden überwiegend in der Landschaftsvermessung eingesetzt, aber auch zum Scannen großer Objekte verwendet (z.B. Gebäude, Flugzeuge, etc.). Sie stecken dabei fixiert auf einem Stativ. Für eine 360°-Erfassung drehen sich die Geräte um die eigene Achse. Um abgeschattete Flächen zu vermeiden, wird der Scanvorgang an mehreren Standorten wiederholt.



Abbildung 1: LIDAR-Scanner im Einsatz, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

1.1.1. Time-of-Flight 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 noch 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.



Abbildung 2: Microsoft Kinect für Xbox, Quelle: Wikimedia, Public Domain

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, ist hiermit praktisch noch keine absolute Entfernung messbar, sondern nur Längendifferenzen innerhalb einer Wellenlänge.

Für absolute Entfernungsbestimmung werden mehrere Messungen mit verschiedenen Frequenzen durchgeführt. Man erhält durch deren Überlagerung eine resultierende Schwebung und damit einen erweiterten eindeutigen Messbereich, abhängig von den verwendeten Frequenzen.

1.2. Triangulation

Bei dieser Methode wird das Objekt von zwei Kameras erfasst, die einen dem System bekannten Winkel und Abstand zueinander haben. Einzelne 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:

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

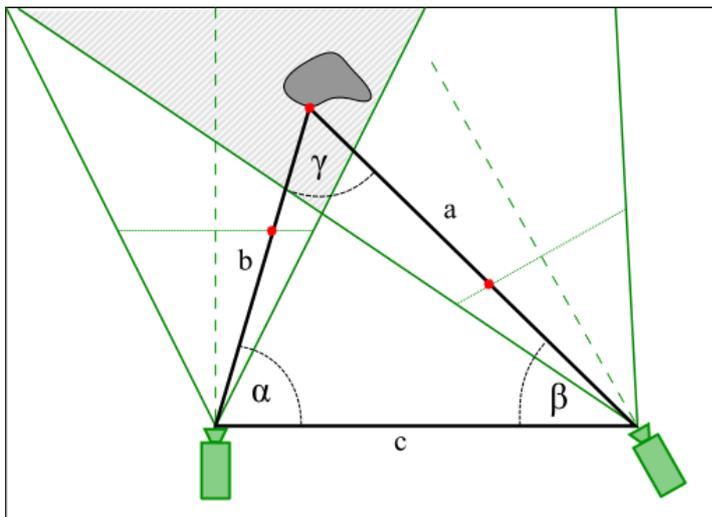


Abbildung 3: Triangulation, Grafik: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

Überträgt man dies hier in 2D dargestellte Prinzip in 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 verschiedene 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 Punktwolke 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 der objektigenen Features erkannt. Diese müssen zahlreich und deutlich erkennbar sein. Eine Photogrammetrie-Software übernimmt hier die Berechnung der Punktwolke.

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. Es handelt sich also um Triangulation in einem aktiven System. Durch schnelle automatisierte Ablenkung des Laserstrahls über Drehspiegel wird eine flächige Abtastung erzielt. Dabei wird der Laserpunkt zu einem scheinbaren Streifen ausgeweitet, der über die Objektoberfläche gezogen 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. Die Auflösung wird auch durch die Qualität der im System verwendeten Kamera bestimmt. Farbaufnahmen für eine Oberflächentextur werden hierbei in der Regel nicht gemacht, da hierfür eine zusätzliche Beleuchtung notwendig wäre, die auf das System abgestimmt ist. 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 Linienmuster 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 ausreicht für die Triangulation. 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. Oder in dem System ist eine weitere Kamera integriert, 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. Gute Geräte liegen schon bei ca. 4000 Euro. Industriescanner gibt es in der Preisspanne von 10.000 bis 100.000 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 Objektgröße und den Aufwand, den man betreiben möchte, um eine möglichst gute Qualität zu erreichen.



Abbildung 4: Photogrammetrie im Einsatz, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

Die Bilder werden in eine Software geladen und analysiert. Sie identifiziert dabei markante Punkte auf den einzelnen Fotos und berechnet in einem ersten Schritt die Position der Kamera bei den einzelnen Aufnahmen. Hierbei entsteht eine erste grobe Punktwolke der gesamten erfassten Szene. 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 Fotoausrüstung. Diese kann unabhängig von der verwendeten Software ausgewählt werden.

Generell wird die Qualität gesteigert durch:

- Hohe Bildauflösung
- Vermeidung von Tiefenunschärfe
- Gleichmäßige Ausleuchtung
- Vermeidung von spiegelnden Reflexionen

- Vermeidung von Komprimierungsartefakten

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

Das obere Ende bildet ein professionelles Fotostudio in Verbindung mit einer Software für 3.000 bis 15.000 Euro. Hinzu kommt ein entsprechend leistungsstarker Rechner mit genügend Arbeitsspeicher.

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.

Diese Verfahren bietet eine hohe Flexibilität und es lassen sich Systeme mit mehreren Kameras realisieren, um den Aufnahmeprozess 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 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.

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.

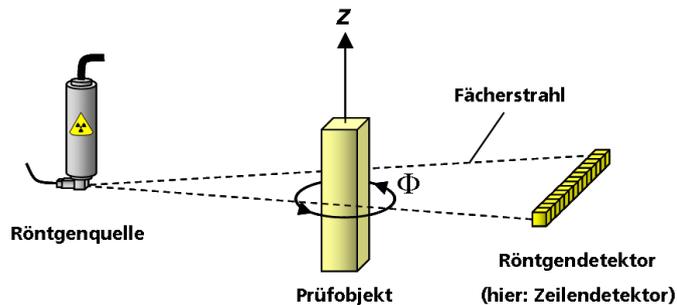


Abbildung 5: Prinzip Zeilendetektor, Grafik: T.Brandmüller, Quelle: Wikimedia, CC BY-SA 3.0

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

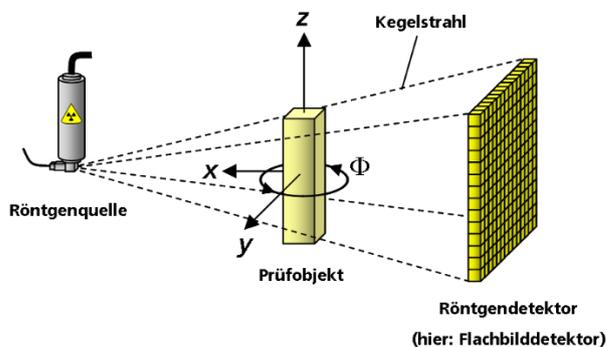


Abbildung 6: Prinzip Flächendetektor, Grafik: T.Brandmüller, Quelle: Wikimedia, CC BY-SA 3.0

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-Micrometer-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 ebenfalls 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 einen mittleren Grauwert erhält. Stark absorbierende 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 übereinandergesetzt 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. Aus solchen Darstellungen können 3D-Polygonmodelle der sichtbaren Oberflächen generiert werden. Zudem lassen sich beliebige Schnitte durch das Volumenmodell anzeigen.

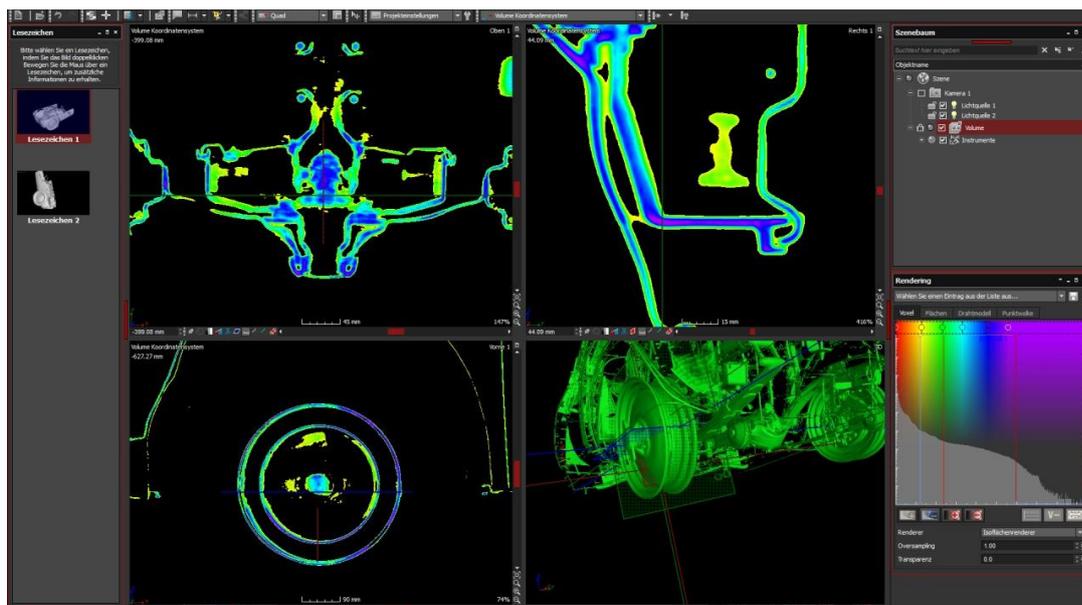


Abbildung 7: CT-Daten im Viewer, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

1.4. Weitere Information

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

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

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

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

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

https://www.gamasutra.com/blogs/JosephAzzam/20170110/288899/Everything_You_%20Need_to_Know_about_Photogrammetry_I_hope.php

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

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 LIDAR-Scanner, die besonders robust für den Außeneinsatz gebaut sind, wesentlich teurer als ansonsten vergleichbare Geräte, die man besser in geschützter Umgebung einsetzt. Ein handgeführter Scanner ist teurer als ein stationär betriebenes Gerät mit gleicher Scanqualität.

Im folgenden Abschnitt werden Kriterien aufgeführt, die bei einer solchen Entscheidung eine Rolle spielen sollten. 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 zu 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 Kamera 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.

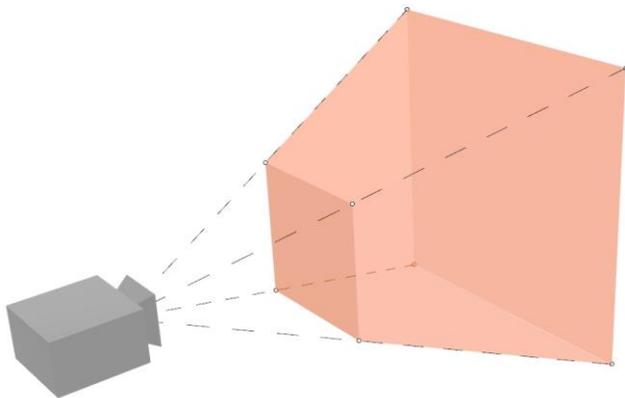


Abbildung 8: 3D-Scan Arbeitsraum, Grafik: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0.

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 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 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 zu nächsten geben. Je nach Komplexität des Objektes reichen ca. 12 bis 32 Aufnahmen aus. Je nach Objektform sind mehrere Durchgänge aus verschiedene 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 ihre 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 9: Stationärer Streifenlichtscanner, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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



Abbildung 10: handgeführter Streifenlichtscanner, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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 11: handgeführter Laserscanner mit externem Positions-Tracking, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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 Scannervolumen wieder eingeschränkt.



Abbildung 12: Photogrammetrie unterstützt durch Roboterarm, 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.

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 aufgeraut sind.

Bei technischen Objekten fällt auch besonders auf, dass scharfe Kanten nicht genau nachgebildet werden können. Abhängig von der Scanauflösung kommt es zu unterschiedlich starken Verrundungen.

2.7.1. Reflexionen an Oberflächen

Die Genauigkeit eines Scans hängt bei der Triangulation davon von ab, ob es dem System gelingt, identische Punkt 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.

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.

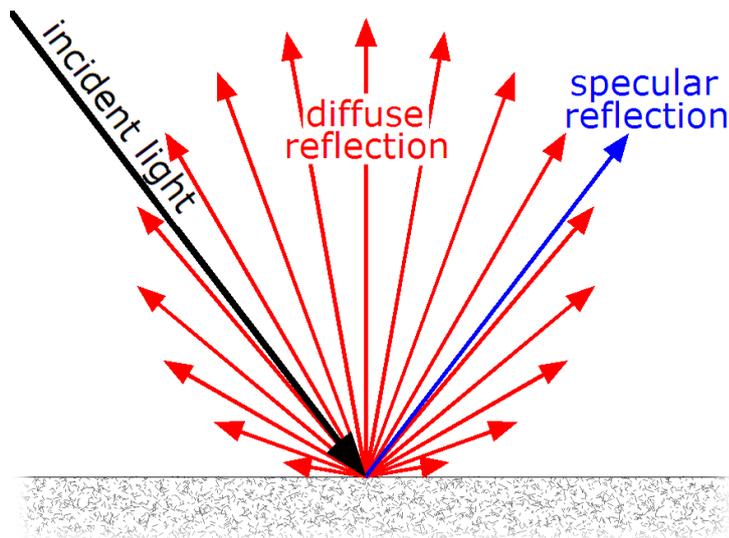


Abbildung 13: Diffuse und Spiegelnde Reflexion, Grafik: GianniG46, Quelle: Wikimedia CC BY-SA 3.0

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.

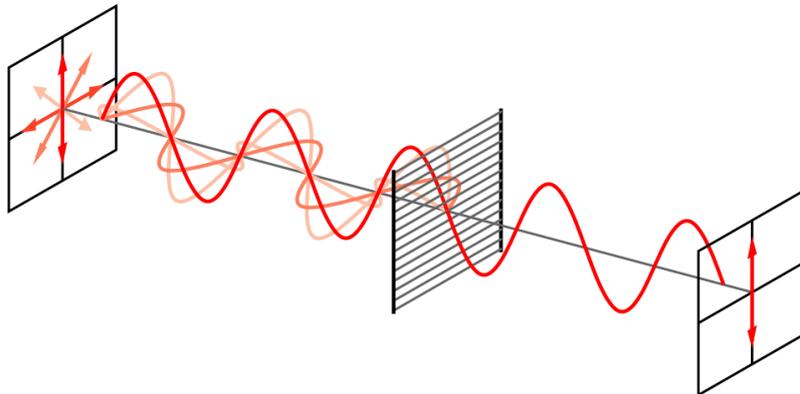


Abbildung 14: Diffuse und Spiegelnde Reflexion, Grafik: Bob Mellish, Quelle: Wikimedia CC BY-SA 3.0

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 15: Polarisationsfilter in verschiedenen Stellungen, Quelle: Wikimedia, Public Domain

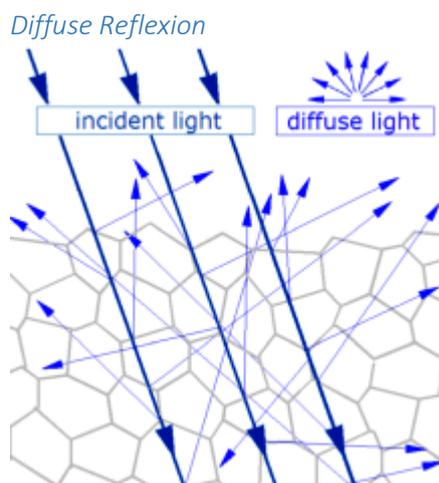


Abbildung 16: Diffuse Reflexion, Grafik: GianniG46, Quelle: Wikimedia CC BY-SA 3.0

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 Reflektion 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 den 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).

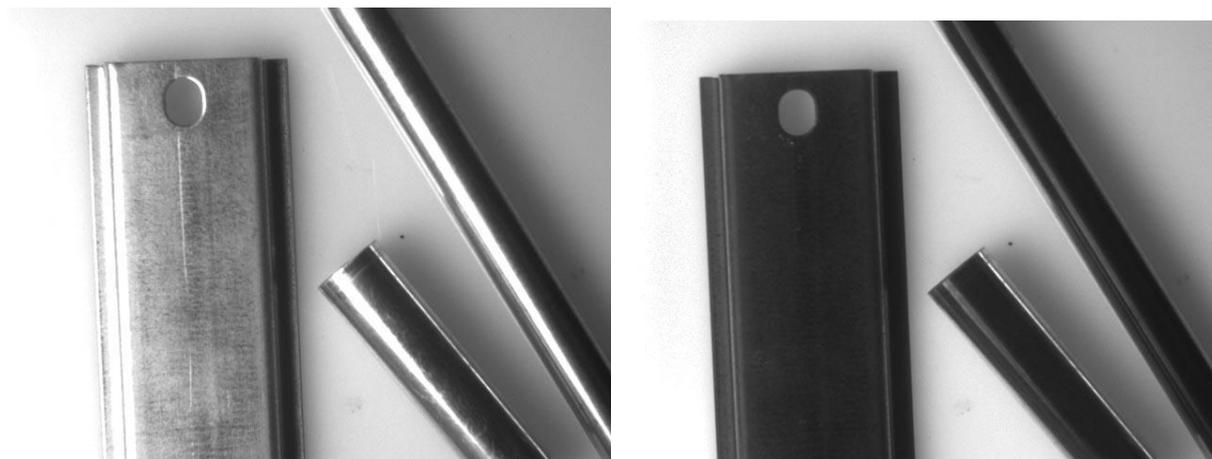


Abbildung 17: Einsatz Polarisationsfilter bei Metalloberflächen, Quelle: www.vision-doctor.com

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.

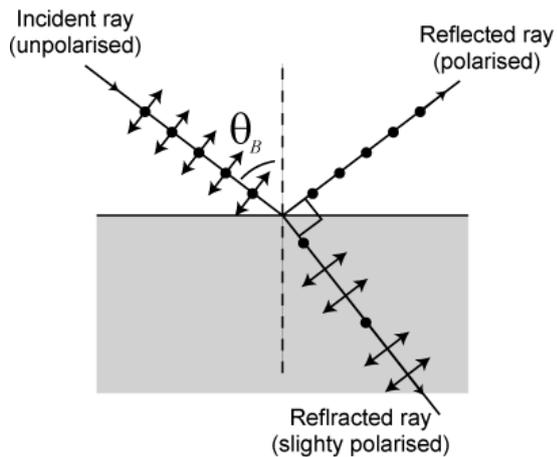


Abbildung 18: teilweise Polarisierung an nichtmetallischer Oberfläche, Quelle: Wikimedia, Public Domain

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 diese 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 Kamerapaares 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.

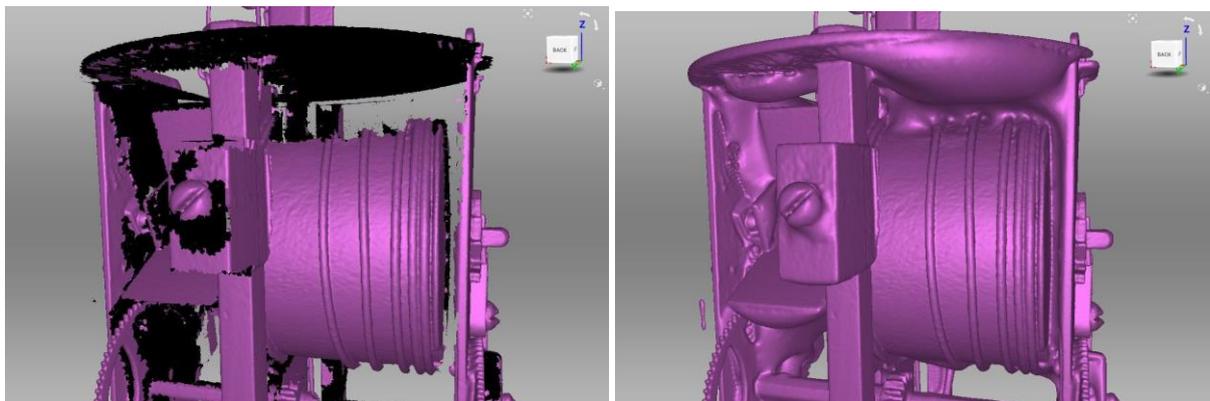


Abbildung 19: automatische Schließung von Scanlücken, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

2.7.3. Dunkle Oberflächen

Problem tauchen bei dunklen Oberflächen auf, wo zu wenig Licht reflektiert wird und dadurch der Helligkeitskontrast zu gering ausfällt. Dies können für sich dunkle Materialien sein oder schwach

ausgeleuchtete Bereiche, 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.

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 lassen sich, ohne dass man sie 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 wurden. 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 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 bedenkenlos 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 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 1: Automatenfigur Predigender Mönch

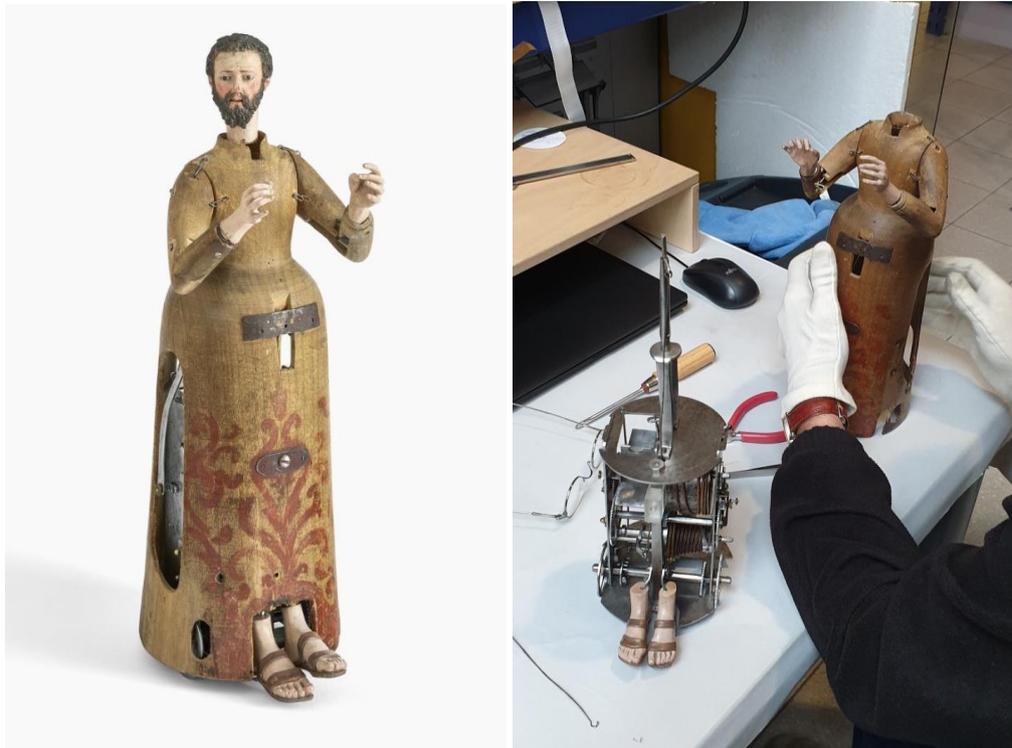


Abbildung 20: Automatenfigur Predigender Mönche Studioaufnahme, Foto: Konrad Rainer, Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

Abbildung 21: Predigender Mönch, Kleid getrennt von Mechanik, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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 22: Predigender Mönch mit Artec Space Spider, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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).

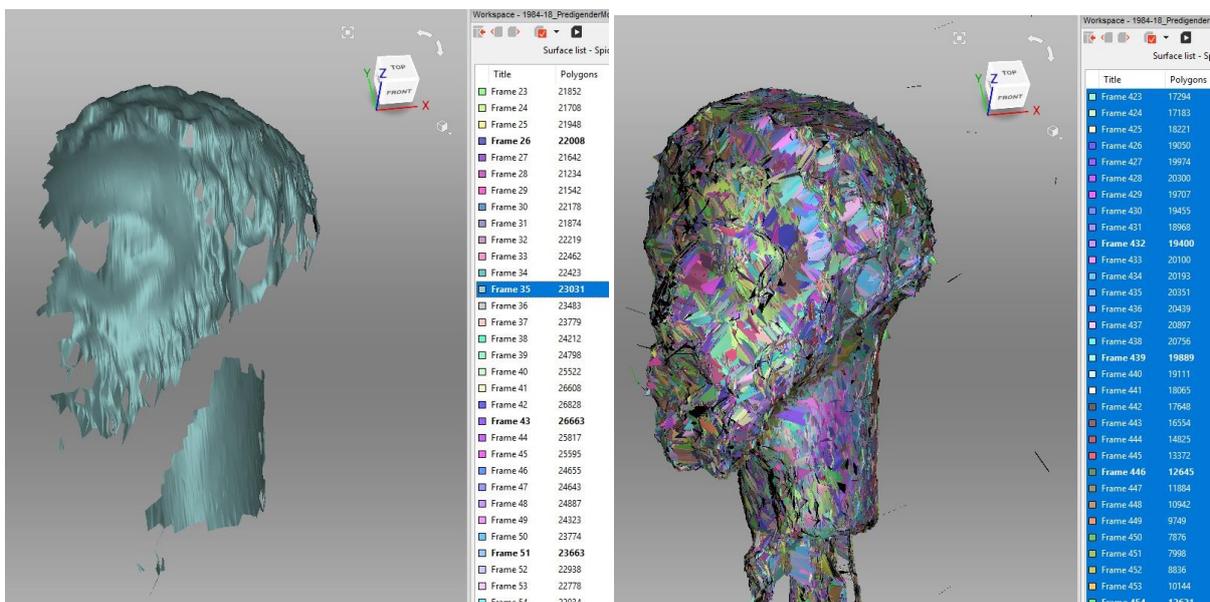


Abbildung 23: Rohscan-Ansicht Einzelframe (links) und alle Frames (rechts), Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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 (Align). 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.
- 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 Oberfläche neu einzustellen. Hier erhält man das erste Ergebnis aus dem Scanvorgang, das als 3D-Modell exportiert werden könnte.

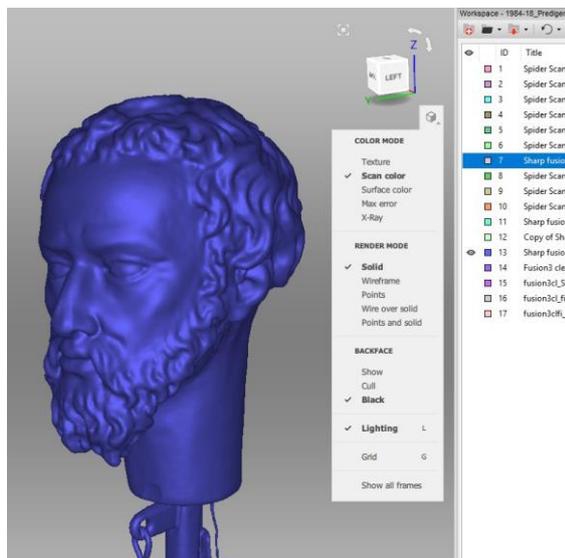


Abbildung 24: 3D-Modell nach Fusion der Scanframes, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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 Löcher können geschlossen werden.
- 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.

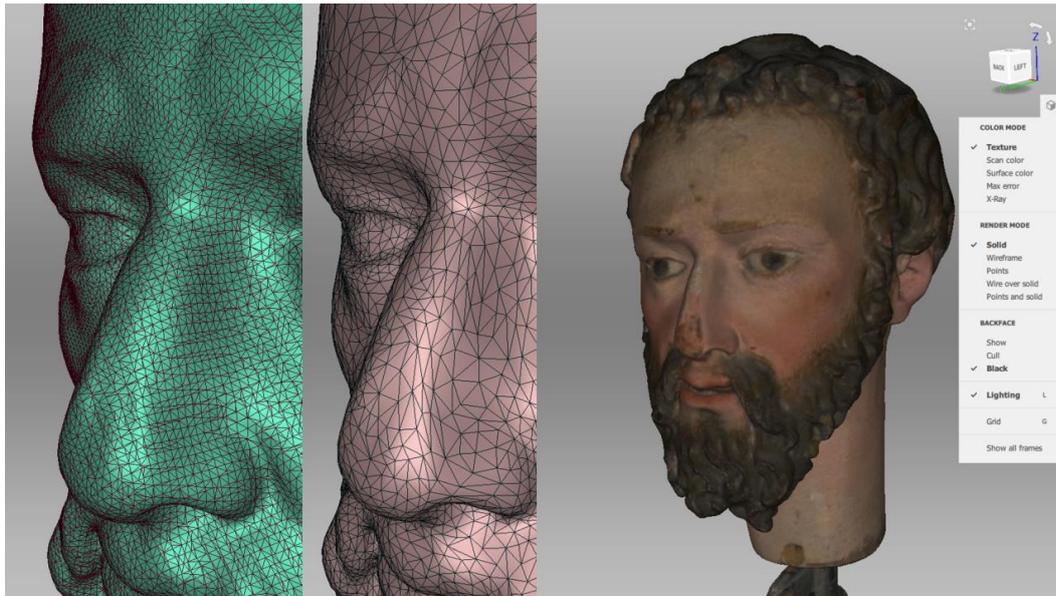


Abbildung 25: Polygonreduzierung und Texturierung, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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-Geometrikameras 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 Objekte damit erfassen, die bei einer Umpositionierung ihre Form ändern würden. Die Objektgröße ist systemseitig auf ca. 50 cm begrenzt.

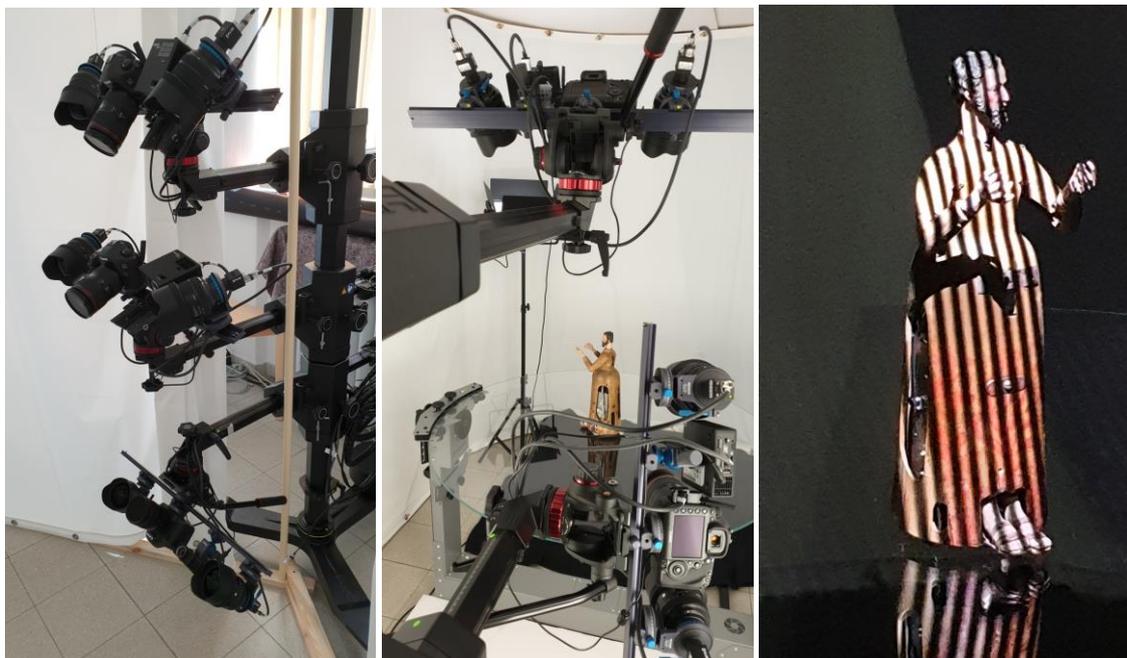


Abbildung 26: ZEISS RealScan scan Predigenden Moench, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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 Eindruck 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, die Objekte in entsprechende Gruppen zum Scannen zusammenzufassen.

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 27: Predigender Mönch, Ergebnis mit ZEISS RealScan, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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 Skelettteile 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 Pano 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 bei dieser Kamera die geringe Tiefenschärfe, die nur durch eine zeitaufwendige Kombination mehrerer Aufnahmen erweitert werden kann.

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, mittels Licht und Schatten die Form des 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.

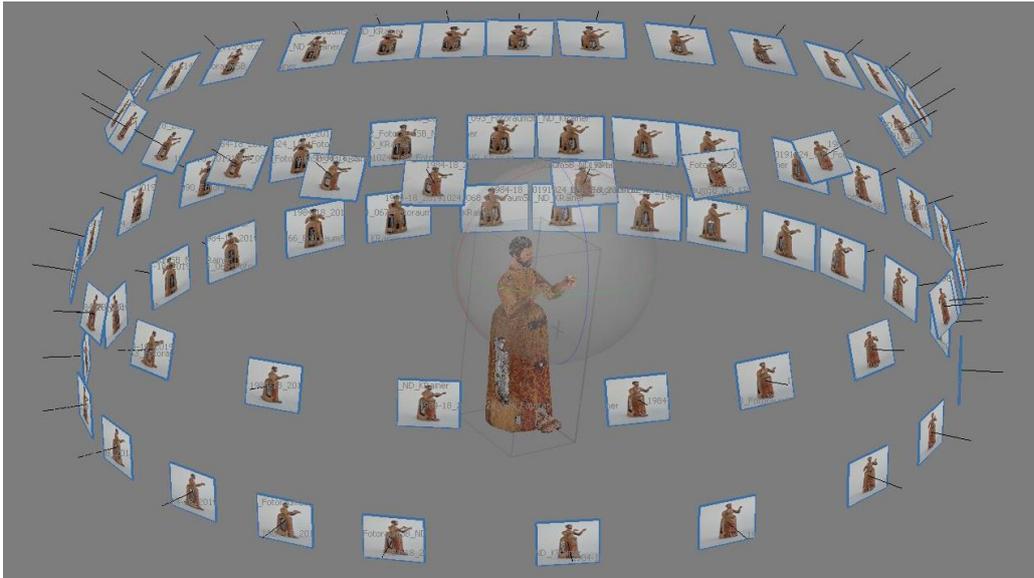


Abbildung 28: Predigender Mönch, Ansicht in Agisoft Metashape, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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.

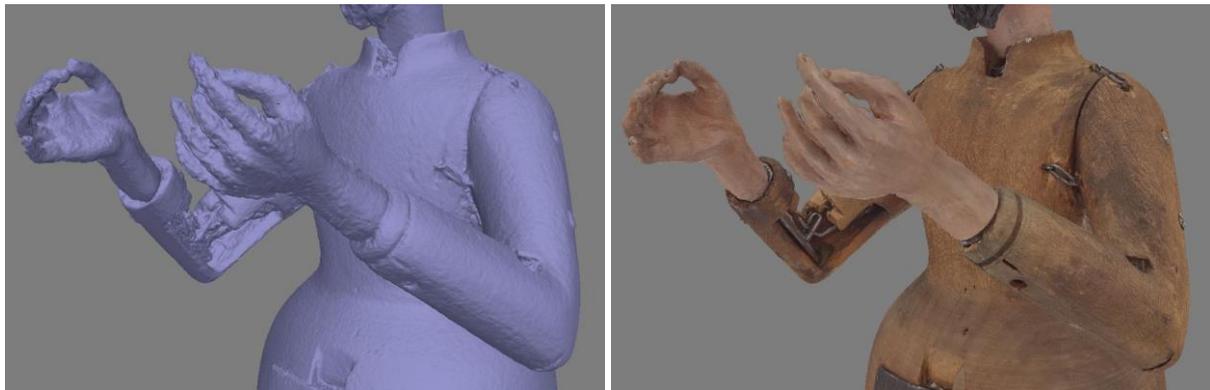


Abbildung 29: Ergebnis Photogrammetrie, verrauschte Oberfläche, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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 30: Scanlücken, unterschiedlicher Grad der automatischen Schließung , Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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 31: Ergebnis-Vergleich Photogrammetrie (links), RealScan (mitte), Space Spider (recht), Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

3.2. Beispiel 2: Spiegelsextant von Brander & Höschel



Abbildung 32: Spiegelsextant von Brander & Höschel, Foto: Konrad Rainer, Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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 länger benötigt der Scanner, um eine geschlossene Fläche zur erfassen, bis es schließlich gar nicht mehr funktioniert.

Aus diesem Grund musste 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 gelockert 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 korrigieren. Dies geschieht allerdings nach Augenmaß und im Rahmen der vorhandenen Möglichkeiten durch die zur Verfügung stehenden Werkzeuge.

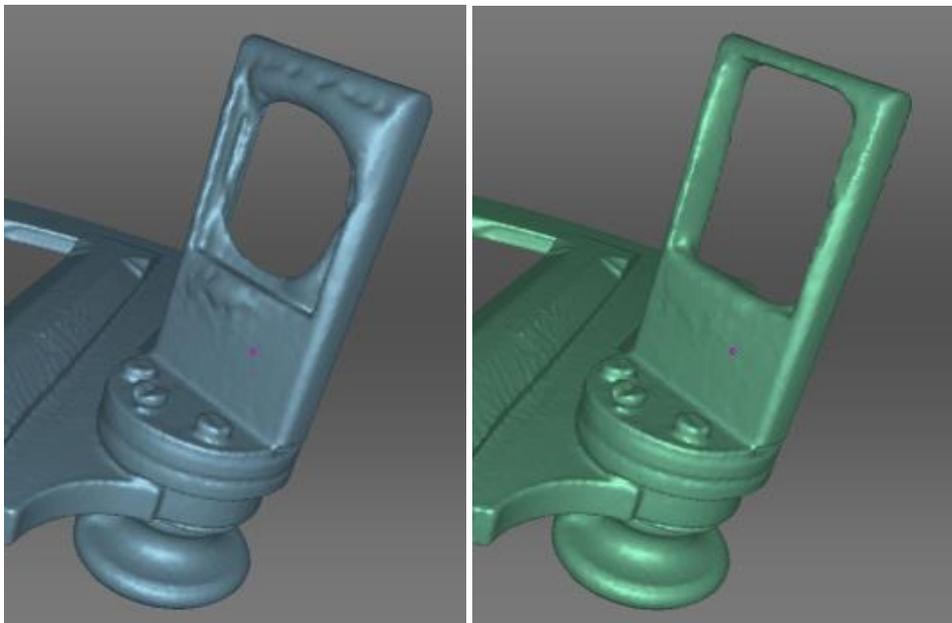


Abbildung 33: manuelle Korrektur von Fehlstellen, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

Ergebnis und Beurteilung

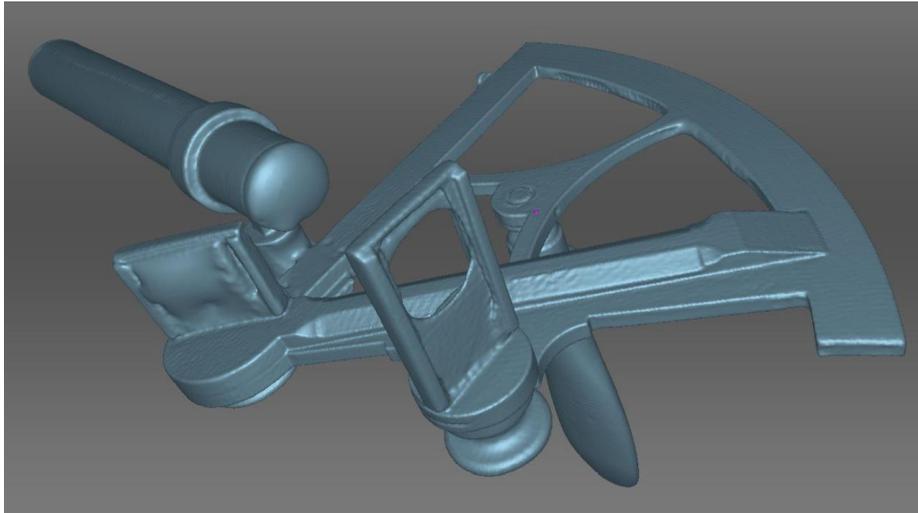


Abbildung 34: Ergebnis Space Spider: leicht verrauschte Oberfläche, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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 texturiertem 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

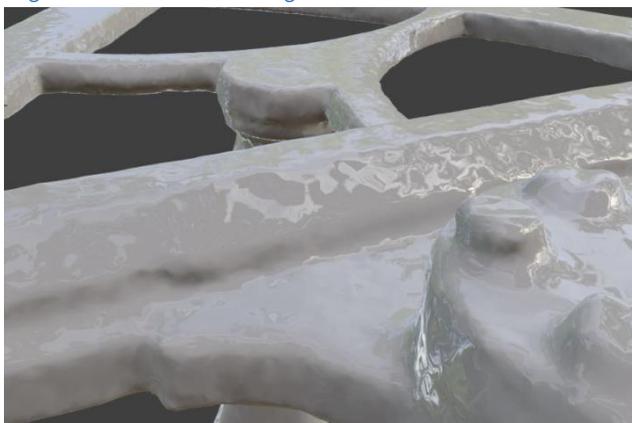


Abbildung 35: Ergebnis RealScan; stark abgerundete Kanten, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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.

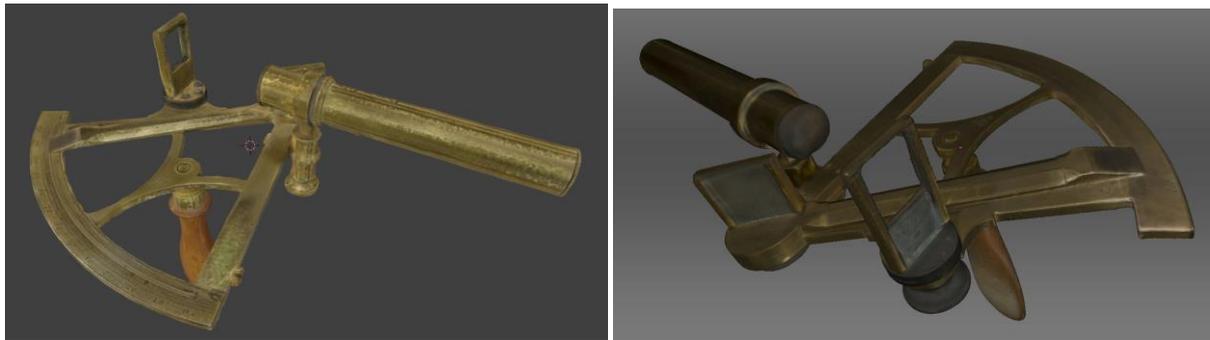


Abbildung 36: Ergebnisse: RealScan (links), SpaceSpider (rechts), Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

Problematisch bei der Texturerzeugung von glänzenden Oberfläche 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 SpaceSpider von Artec bietet eine Option zur automatischen Glanzreduzierung während der Berechnung der Farbtextur. Dadurch erscheint allerdings die Textur insgesamt etwas weichgezeichnet und es kann Bereich geben, wo die Farbe ausgewaschen wirkt (siehe Holzgriff im Beispiel).

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 Leuchtquellen für eine effektivere Kreuzpolarisation gibt es nicht.

3.3. Beispiel 3: Holzschleifapparat von F.G. Keller



Abbildung 37: Exponatfoto Ausstellung Papiertechnik 2015 / Foto: HJBecker / © Deutsches Museum

Mit diesem Schleifapparat zerfaserte 1843 der Weber Friedrich Gottlob Keller 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 müssten 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 scannt, um sie dann später wieder in 3D zusammenzubauen. Bei der Automatenfigur aus dem 16. Jahrhundert 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 38: Holzschleifapparat zerlegt zum Scan / Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

3.3.1. Durchführung

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 kleiner Scanportionen war die Größe des Objektes gut handhabbar.

Obwohl der Schleifapparat nur wenige und nicht 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.

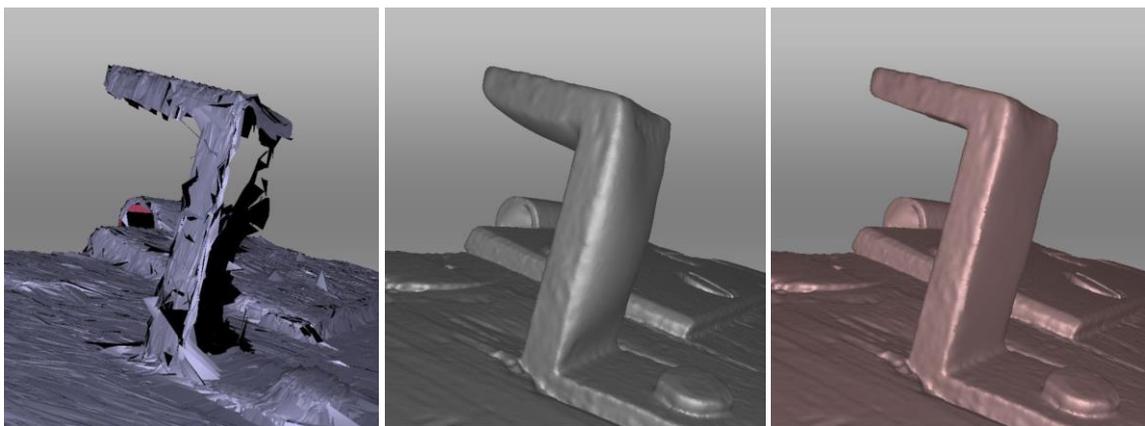


Abbildung 39: Rohscandaten, Fusionsergebnis mit automatischer Lückenfüllung, Nachbearbeitung / Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

3.3.2. Ergebnis

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.

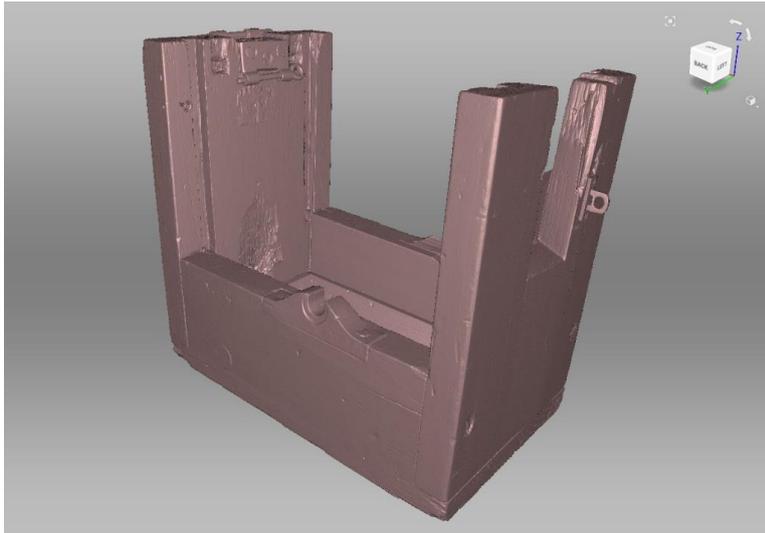


Abbildung 40: Holzschleifapparat Gehäuse / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0



Abbildung 41: Holzschleifapparat 3D-Modell gerendert / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

4. Nachbearbeitung

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 brauchbare 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 gegangene Oberflächendetails können in nachfolgenden Schritten wieder restauriert werden.

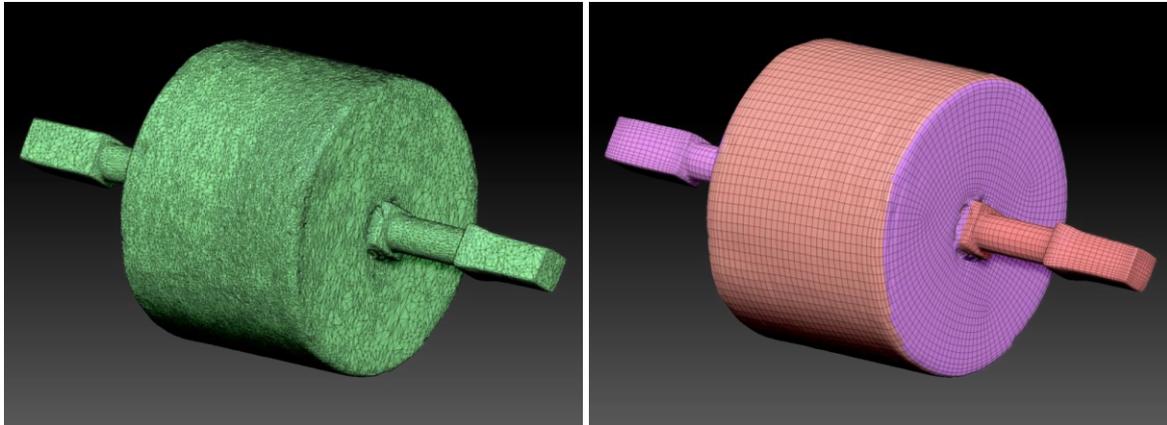


Abbildung 42: Retopologisierung am Beispiel Holzschleifapparat / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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 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 verbunden 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 größer 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.

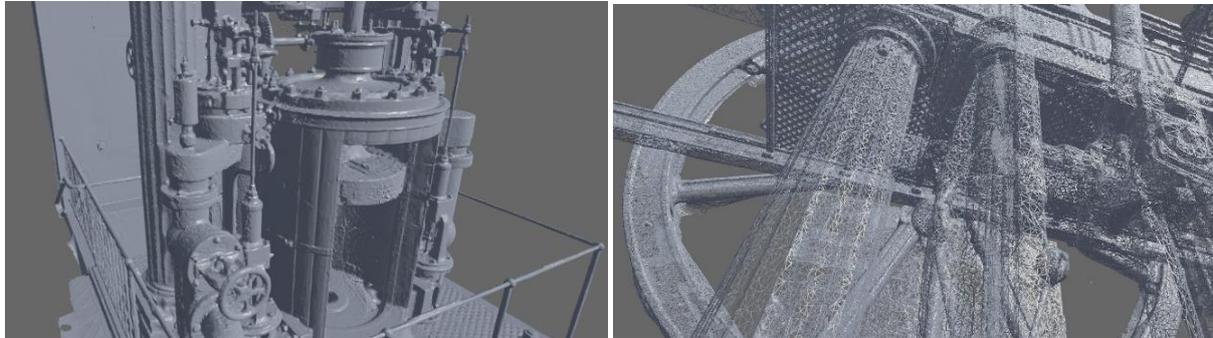


Abbildung 43: Sulzer Dampfmaschine, Modell aus Scandaten, stark reduziert, Screenshots: VR Dynamix, CC BY-SA 3.0

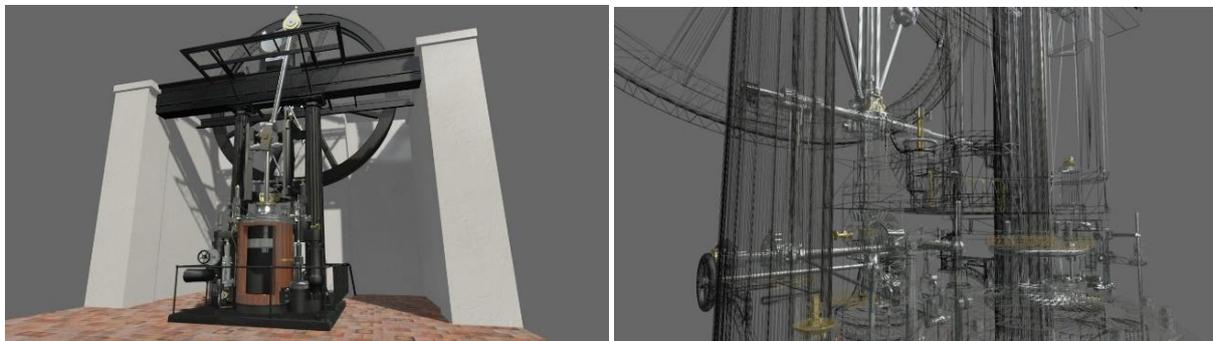


Abbildung 44: Sulzer Dampfmaschine, nachmodelliert, getrennt nach Bauteilen, Screenshots: VR Dynamix, CC BY-SA 3.0

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 Punktcoordinate 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.

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. Dabei 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 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 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 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. Nach einigen Jahren Pause hat es im Sommer 2020 ein Update erhalten. Es beinhaltet zahlreiche Algorithmen zur Retopologisierung.

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.

www.pixologic.com

Adobe Substance

Das Standard-Programm zur Erstellung von Materialien und zur 3D-Texturierung für eine möglichst real wirkende Erscheinung von 3D-Objekten. Gerade bei glänzenden metallischen Oberflächen ist eine neu generierte Textur dem Photomaterial aus dem Scan deutlich überlegen.

Die Entwicklerfirma wurde vor wenigen Jahren von Adobe übernommen, dessen Substance-Programme sind jedoch noch nicht Teil des Creative-Cloud-Pakets und müssen separat gekauft werden.

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 Machmodellieren 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 wesentlich höherer Preis verlangt.

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

4.3. Beispiel: Holzschleifapparat

Der Holzschleifapparat aus Kapitel 3 wurde hochaufgelöst mit dem Artec Space Spider gescannt. Viele Detail in der Holzstruktur sind dabei erfasst worden, die dafür notwendige Anzahl der Polygone ist allerdings für viele Darstellungen, zum Beispiel in einem Webbrowser, zu hoch.

4.3.1. Retopologisierung und Texturierung

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

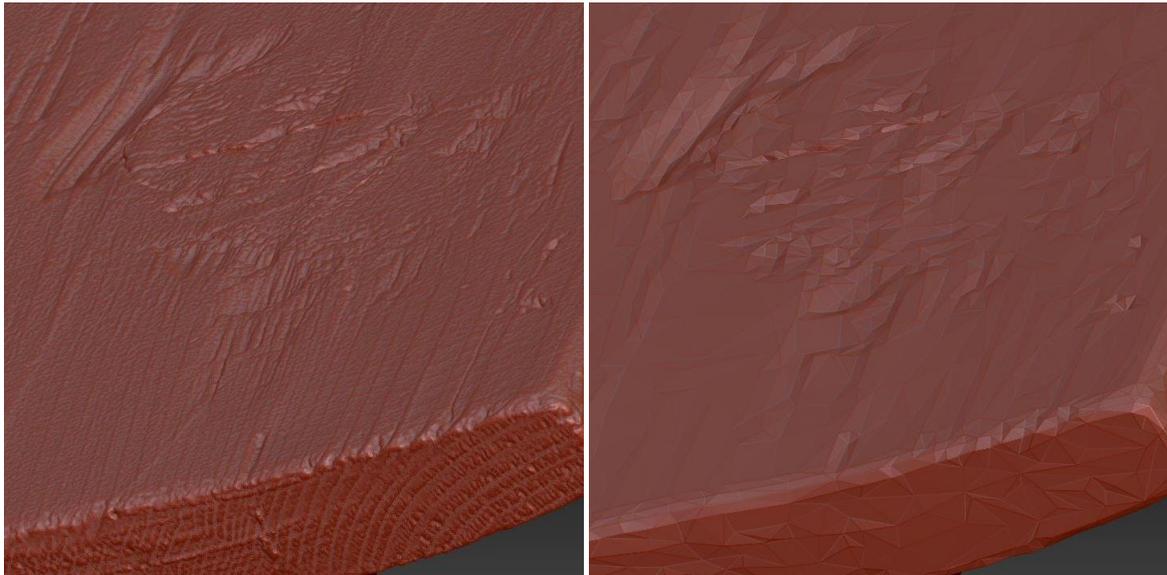


Abbildung 45: Reduzierung der Polygonzahl in ZBrush / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

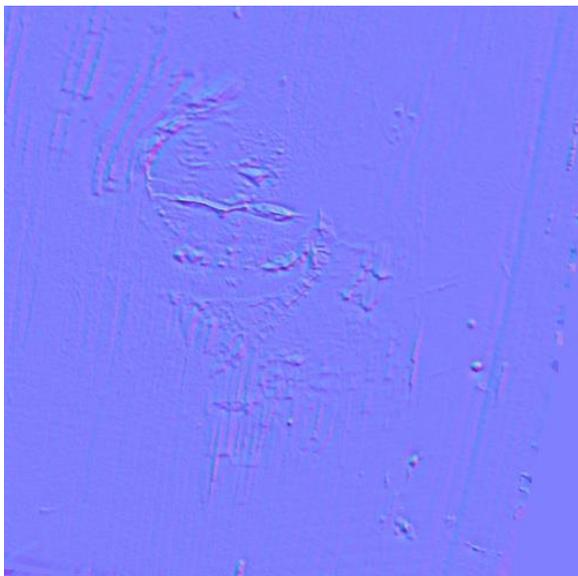


Abbildung 46: Ausschnitt der generierten Normalentextur / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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:

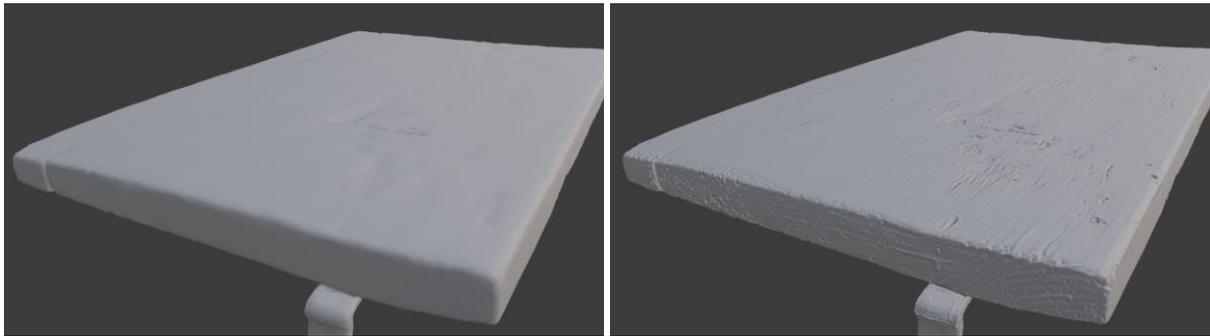


Abbildung 47: links: Darstellung ohne Normalentextur, rechts: gleiches Modell mit Normalentextur / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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 48: Darstellung mit Farbtextur, links: ohne Normalentextur, rechts: mit Normalentextur / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

4.3.2. 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.

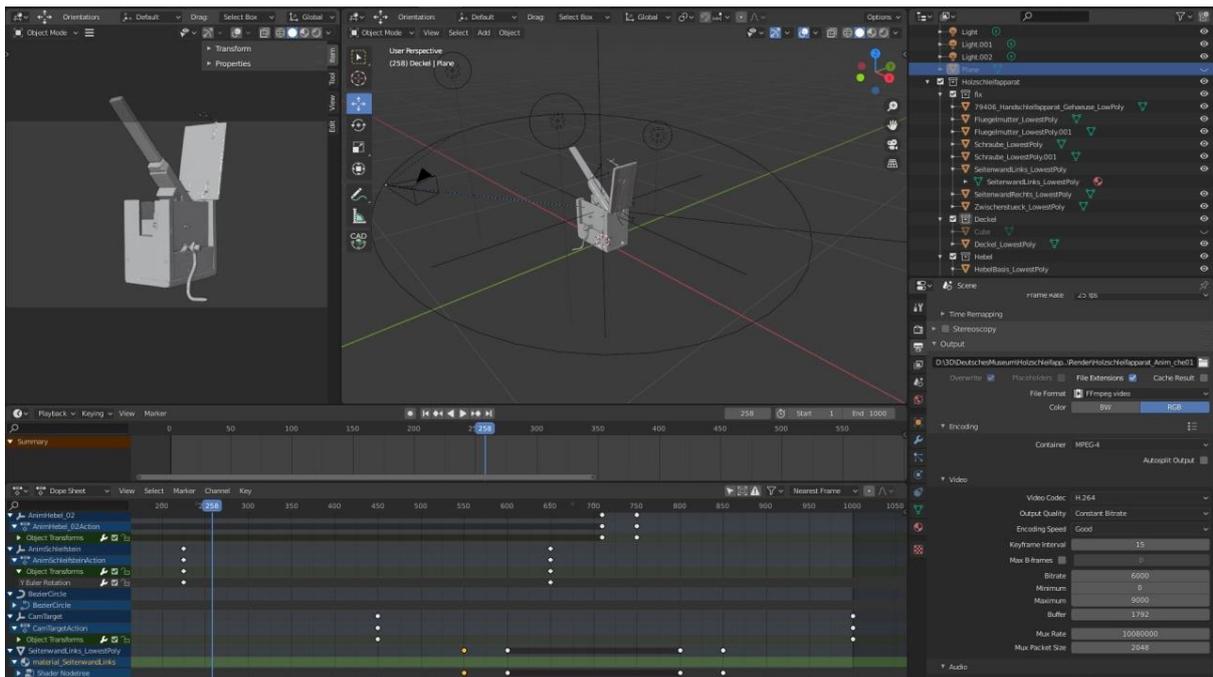


Abbildung 49: Vorbereitung der Animation in Blender / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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

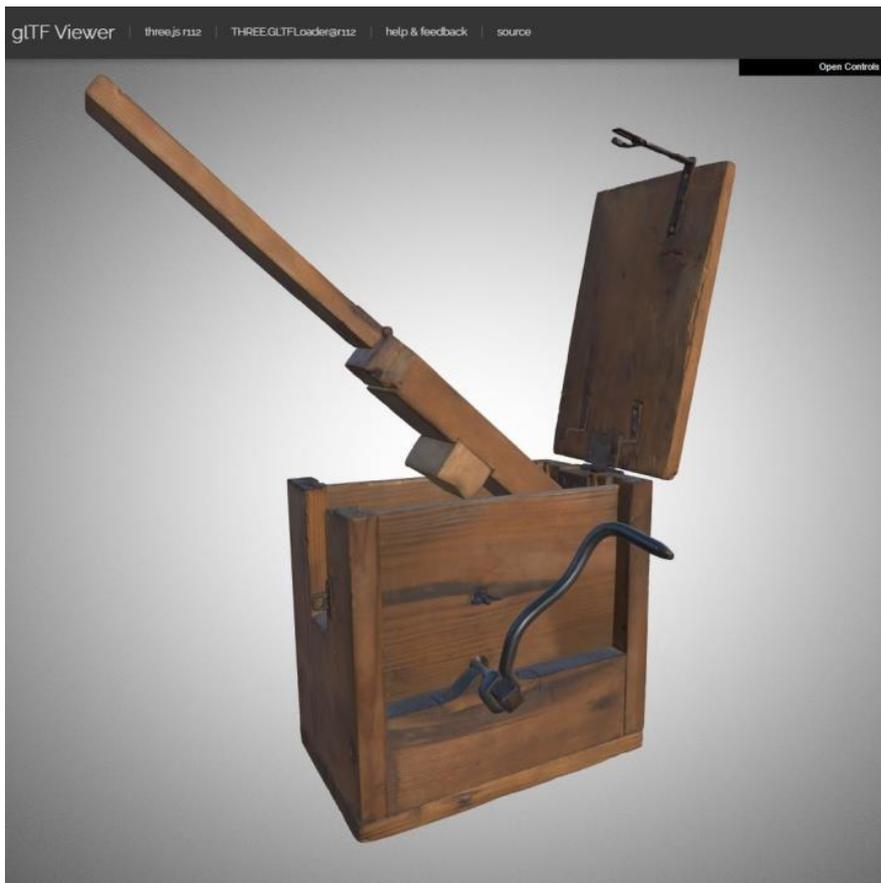


Abbildung 50: Darstellung des Modells im 3D-Viewer / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0



Abbildung 51: Animation des Holzschleifapparats / Animation: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

5. Einsatzgebiete im Museum

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. Digitales Backup für Nachbau von Dioramen

5.1.1. Hintergrund

Das Deutsche Museum verfügt in seinen Ausstellungen über viele Dioramen, die über Jahrzehnte 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 an Ihrem neuen Standort neu erstellt werden.

Mithilfe von 3D-Scans soll die genaue Form der Hintergründe erfasst werden, um nach einer Reproduktion zusammen mit dem gemalten Szenario den perspektivischen Eindruck des Originals wiederzugeben. 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

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 200cm 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 Scans 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 gleichförmig weiß ist, werden dort mehrere Markierungen aus Klebestreifen hinzugefügt, um die Registrierung der Scanflächen zu unterstützen.

Mit den im Deutschen Museum bisher verfügbaren Mitteln kommen hier zwei Scan-Verfahren in Frage:

- Handgeführter Streifenlichtscan
- Photogrammetrie



Abbildung 52: 3D-Scan eines Diorama-Hintergrundes, Vergleich Artec Leo vs. Photogrammetrie / Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

Test mit Streifenlichtscan

Der mobile Streifenlichtscanner Artec Leo ermöglicht einen schnellen Aufnahmevorgang. Je nach Größe des Objektes nimmt die Nachberechnung 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. 10 Minuten, die Nachbereitung der Daten den Rest des Tages. Das Ergebnis ist sehr zufriedenstellend. Alle Scans lassen sich problemlos zusammenführen, es gibt kaum Ausreißer. Die erzielbare 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 50 Megapixel Vollformat-Kamera 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 Diorama-Himmel weist zu wenig markante Merkmale für eine automatische, eindeutige Identifizierung von

identischen Oberflächenpunkten auf, ein generelles Problem der Photogrammetrie. Der Kontrast in den Bildern ist zu gering. 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 53: Scan-Ergebnis, links: Artec Leo, rechts: Photogrammetrie mit Agisoft Metashape Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

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.

Ein LIDAR-Scanner wäre die bessere Wahl für dieses Anwendungsszenario. Es müssen bei den Diorama-Hintergründen nur einfache Raumgeometrie erfasst werden. Mit nur einem 360-Grad Scandurchlauf könnte die relevante Geometrie bereits vollständig erfasst werden. Die Erfassung einer Farbtextur gehört allerdings nicht zu den Stärken dieser Geräte. Sollte deren Qualität nicht

ausreichen, dann könnte ein separat aufgenommenes 360°-Panoramafoto in einem Nachbearbeitungsschritt auf die Geometrie projiziert werden.

5.2. 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. Dafür sollen 3D-Ausdrucke verwendet werden.

5.2.2. Durchführung

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

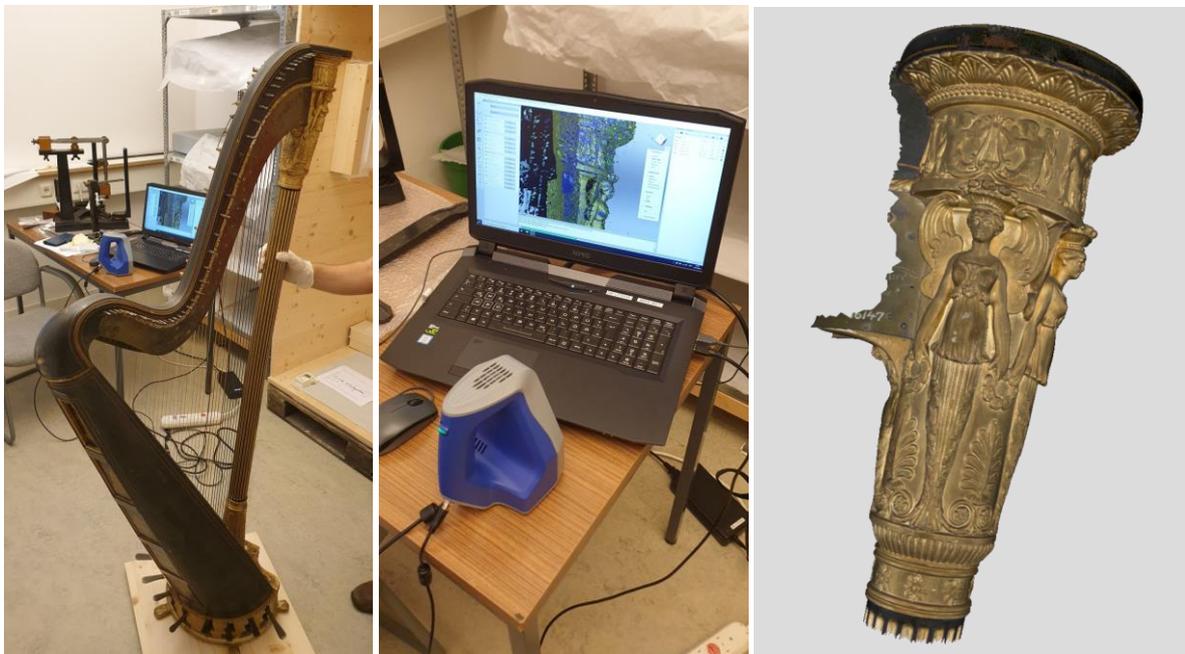


Abbildung 54: 3D-Scan des Kopfes einer Doppelpedalharfe / Foto, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

Um die Ornamente im digitalen Objekt von der Grundform trennen zu können, wird das Scanergebnis in ein Programm für Flächenmodellierung 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.

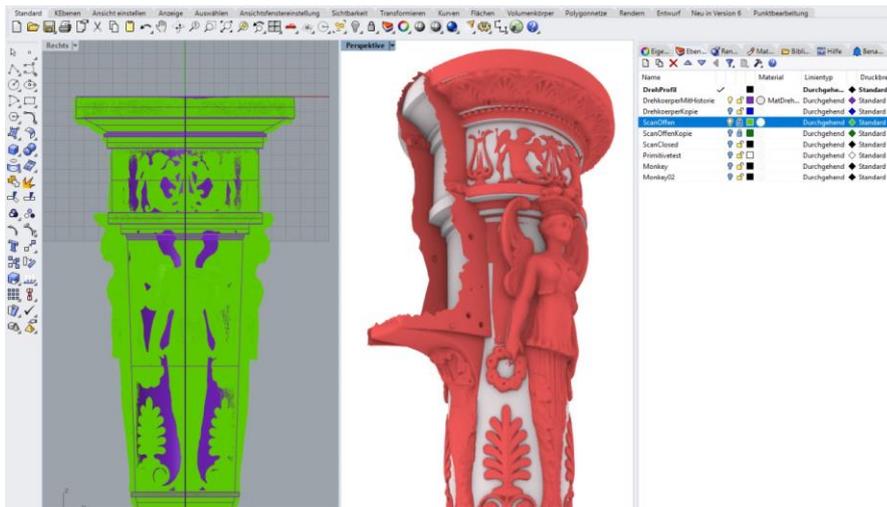


Abbildung 55: Erzeugung eines Drehkörpers in Rhino6 / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0



Abbildung 56: Ansicht nach Subtraktion des Drehkörpers vom Scanmodell in ZBrush / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0

5.2.3. Fazit

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

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

Im konkreten Fall wurde als mögliche Alternative ein Instrumentenbauer gefunden, der bereits die passenden Gussformen für diesen Harfenkopf besitzt und Abgüsse herstellen könnte. Inwieweit die 3D-Daten nun tatsächlich verwendet werden, muss noch erörtert werden. Als Basis für die kostengünstige Variante eines 3D-Drucks des gesamten Harfenkopfes bleiben die bisherigen Daten verwendbar.

6. Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: LIDAR-Scanner im Einsatz, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0 | 7 |
| Abbildung 2: Microsoft Kinect für Xbox, Quelle: Wikimedia, Public Domain | 7 |
| Abbildung 3: Triangulation, Grafik: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0 | 8 |
| Abbildung 4: Photogrammetrie im Einsatz, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0 | 10 |
| Abbildung 5: Prinzip Zeilendetektor, Grafik: T.Brandmüller, Quelle: Wikimedia, CC BY-SA 3.0..... | 12 |
| Abbildung 6:Prinzip Flächendetektor, Grafik: T.Brandmüller, Quelle: Wikimedia, CC BY-SA 3.0..... | 12 |
| Abbildung 7: CT-Daten im Viewer, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0 | 13 |
| Abbildung 8: 3D-Scan Arbeitsraum, Grafik: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 15 |
| Abbildung 9: Stationärer Streifenlichtscanner, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 16 |
| Abbildung 10: handgeführter Streifenlichtscanner, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0 . | 17 |
| Abbildung 11: handgeführter Laserscanner mit externem Positions-Tracking, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0 | 18 |
| Abbildung 12: Photogrammetrie unterstützt durch Roboterarm, Foto: Fraunhofer IGD | 18 |
| Abbildung 13: Diffuse und Spiegelnde Reflektion, Grafik: GianniG46, Quelle: Wikimedia CC BY-SA 3.0 | 19 |
| Abbildung 14: Diffuse und Spiegelnde Reflektion, Grafik: Bob Mellish, Quelle: Wikimedia CC BY-SA 3.0 | 20 |
| Abbildung 15: Polarisationsfilter in verschiedenen Stellungen, Quelle: Wikimedia, Public Domain | 20 |
| Abbildung 16: Diffuse Reflektion, Grafik: GianniG46, Quelle: Wikimedia CC BY-SA 3.0 | 20 |
| Abbildung 17: Einsatz Polarisationsfilter bei Metalloberflächen, Quelle: www.vision-doctor.com | 21 |
| Abbildung 18: teilweise Polarisierung an nichtmetallischer Oberfläche, Quelle: Wikimedia, Public Domain..... | 22 |
| Abbildung 19: automatische Schließung von Scanlücken, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 22 |
| Abbildung 20: Automatenfigur Predigender Mönche Studioaufnahme, Foto: Konrad Rainer, Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 24 |
| Abbildung 21: Predigender Mönch, Kleid getrennt von Mechanik, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 24 |
| Abbildung 22: Predigender Mönch mit Artec Space Spider, Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY- SA 3.0 | 25 |
| Abbildung 23: Rohscan-Ansicht Einzelframe (links) und alle Frames (rechts), Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0 | 26 |
| Abbildung 24: 3D-Modell nach Fusion der Scanframes, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 26 |
| Abbildung 25: Polygonreduzierung und Texturierung, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY- SA 3.0 | 27 |
| Abbildung 26: ZEISS RealScan scant Predigenden Moench , Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY- SA 3.0 | 27 |
| Abbildung 27: Predigender Mönch, Ergebnis mit ZEISS RealScan, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 28 |
| Abbildung 28: Predigender Mönch, Ansicht in Agisoft Metashape, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 30 |
| Abbildung 29: Ergebnis Photogrammetrie, verrauschte Oberfläche, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 30 |
| Abbildung 30: Scanlücken, unterschiedlicher Grad der automatischen Schließung , Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 31 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 31: Ergebnis-Vergleich Photogrammetrie (links), RealScan (mitte), Space Spider (recht), Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 32 |
| Abbildung 32: Spiegelsextant von Brander & Höschel, Foto: Konrad Rainer, Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 32 |
| Abbildung 33: manuelle Korrektur von Fehlstellen, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0 | 33 |
| Abbildung 34: Ergebnis Space Spider: leicht verrauschte Oberfläche, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 34 |
| Abbildung 35: Ergebnis RealScan:, stark abgerundete Kanten, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 34 |
| Abbildung 36: Ergebnisse: RealScan (links), SpaceSpider (rechts), Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 35 |
| Abbildung 37: Exponatfoto Ausstellung Papiertechnik 2015 / Foto: HJBecker / © Deutsches Museum | 36 |
| Abbildung 38: Holzschleifapparat zerlegt zum Scan / Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0 | 37 |
| Abbildung 39: Rohscandaten, Fusionsergebnis mit automatischer Lückenfüllung, Nachbearbeitung / Screenshots: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0 | 37 |
| Abbildung 40: Holzschleifapparat Gehäuse / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0. | 38 |
| Abbildung 41: Holzschleifapparat 3D-Modell gerendert / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 38 |
| Abbildung 42: Retopologisierung am Beispiel Holzschleifapparat / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 39 |
| Abbildung 43: Sulzer Dampfmaschine, Modell aus Scandaten, stark reduziert, Screenshots: VR Dynamix, CC BY-SA 3.0..... | 40 |
| Abbildung 44: Sulzer Dampfmaschine, nachmodelliert, getrennt nach Bauteilen, Screenshots: VR Dynamix, CC BY-SA 3.0..... | 40 |
| Abbildung 45: Reduzierung der Polygonzahl in ZBrush / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 43 |
| Abbildung 46: Ausschnitt der generierten Normalentextur / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 43 |
| Abbildung 47: links: Darstellung ohne Normalentextur, rechts: gleiches Modell mit Normalentextur / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 44 |
| Abbildung 48: Darstellung mit Farbttextur, links: ohne Normalentextur, rechts: mit Normalentextur / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 44 |
| Abbildung 49: Vorbereitung der Animation in Blender / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 45 |
| Abbildung 50: Darstellung des Models im 3D-Viewer / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0 | 46 |
| Abbildung 51: Animation des Holzschleifapparats / Animation: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0 | 46 |
| Abbildung 52: 3D-Scan eines Diorama-Hintergrundes, Vergleich Artec Leo vs. Photogrammetrie / Foto: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0 | 48 |
| Abbildung 53: Scan-Ergebnis, links: Artec Leo, rechts: Photogrammetrie mit Agisoft Metashape Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 49 |
| Abbildung 54: 3D-Scan des Kopfes einer Doppelpedalharfe / Foto, Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... | 50 |

Abbildung 55: Erzeugung eines Drehkörpers in Rhino6 / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0 51

Abbildung 56: Ansicht nach Subtraktion des Drehkörpers vom Scanmodell in ZBrush / Screenshot: Deutsches Museum Digital, CC BY-SA 3.0..... 51