



Forschungsbereich
Maschinenbau**I**nformatik
und **V**irtuelle
Produktentwicklung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Gerhard

3D Scanning –

Virtuelle Produktentwicklung eines 3D Scanners für
die TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0

Diplomarbeit

Marko Brumnik, BSc

Matrikel.-Nr.: 1025159

Danksagung

Zur Erstellung dieser Arbeit möchte ich ganz besonders Herrn Prof. Detlef Gerhard danken, der meine Arbeit durch seine fachliche und persönliche Unterstützung begleitet hat.

Ein außerordentlicher Dank gebührt meinen Freunden Marco, Raphael, Stefan und Michael, die mich durch ihren fachlichen Rat und Beistand beim Bau des Prototyps unterstützten.

Ebenfalls gilt mein Dank meiner Freundin Olja, die mir stets zur Seite stand und durch ihre aufmunternden und motivierenden Worte dabei half, herausfordernde Zeiten zu überwinden. Durch gemeinsame Diskussionen und Hinweise half sie mir oft, den roten Faden meiner Arbeit nicht aus den Augen zu verlieren.

*Mein letzter, aber genauso ehrlicher Dank gilt meiner ganzen Familie, allen voran meiner Mutter, die für mich während meiner gesamten Studienzzeit immer ein offenes Ohr hatte, mich, soweit es ihr möglich war, unterstützte und mir immer neue Kraft zum Weitermachen mit auf den Weg gab.
Iz vsega srca, HVALA!*

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung.....	3
1.2 Zielsetzung.....	5
1.3 Struktureller Aufbau der Arbeit.....	5
2 Funktionsweise.....	7
2.1 Einführung.....	7
2.2 Dreidimensionale Modellierung eines Objektes.....	10
3 Die 3D Scantechnologien.....	12
3.1 Zerstörungsfreie Kontaktverfahren.....	14
3.1.1 Koordinatenmessgeräte (CMM).....	14
3.2 Kontaktlose strahlendurchdringende Technologien.....	16
3.2.1 Industrielle Computertomographie (ICT).....	17
3.2.2 Digitale Volumetomographie.....	19
3.3 Kontaktlose strahlenreflektierende Technologien.....	20
3.3.1 Streifenprojektion.....	22
3.3.2 Photogrammetrie.....	26
3.3.3 Time-of-flight.....	29
4 Prozesskette.....	32
4.1 Punktwolke.....	32
4.2 Optimierung der Punktwolke.....	33
4.3 Rekonstruktion (Dreiecksvermaschung).....	33
4.4 Flächenrückführung.....	38
4.5 Volumenmodell.....	40
4.6 Der Slicer.....	40
5 Virtuelles Modell des 3D Scanners.....	42
5.1 Der 3D Drucker der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0.....	42
5.2 Definition der Kriterien und Auswahl.....	43
5.3 Mechanische Komponenten.....	46
5.4 Elektronikkomponenten.....	55

5.5	Das virtuelle Modell des 3D Scanners	58
6	Der Prototyp – Proof of Concept	59
6.1	Konstruktionsteile	59
6.2	Elektronikkomponenten	61
6.3	Der Digitalisierungsprozess	61
7	Fazit und Ausblick	64
7.1	Zusammenfassung	64
7.2	Kritische Betrachtungen	65
7.3	Empfehlungen für weitere Arbeiten	65
8	Anhänge	66
8.1	Quellcode für die HTML-Seite	66
8.2	Quellcode für das Skript	68
9	Abbildungsverzeichnis	69
10	Literaturverzeichnis	71

1 Einleitung

In diesem Kapitel werden, ausgehend von einem allgemeinen Ansatz, die historische Entwicklung der Industrialisierung und das wirtschaftliche Potenzial der anstehenden vierten industriellen Revolution beschrieben. Es wird erläutert, wie in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 versucht wird, die neun Kerntechnologien der Industrie 4.0 zusammenzuführen um intelligente industrielle Produktion zu erforschen. Der Fokus wird auf die additive Fertigung gelegt und dabei erklärt, dass 3D-CAD Datensätze als Input für die additive Fertigung die Basis darstellen und welche drei Arten es gibt, diese zu erhalten.

Technologische Erfindungen sind historisch gesehen seit jeher wichtig für das wirtschaftliche Wohlergehen auf mikro- sowie makroökonomischer Ebene. [1] Anders ausgedrückt kann man sagen, dass Innovationen der Motor der Wirtschaft sind. Angetrieben wird dieser Motor durch die erwartete Rentabilität einer erfinderischen Tätigkeit, welche das Tempo und die Richtung der industriellen Innovation bestimmt und die Bedingungen auf den relevanten Faktor- und Produktmärkten widerspiegelt. [2]

Mit der Erfindung der Dampfmaschine im Jahr 1712 durch Thomas Newcomen in England, begann der Prozess der Industrialisierung. [3] Geprägt durch ständige technologische Neu- und Weiterentwicklungen kam es seit damals zu drei industriellen Revolutionen. Die Einführung der Elektrizität als Antriebskraft zum Ende des 19. Jahrhunderts war der Startschuss für die 2. (industrielle) Revolution. Durch die Erfindung des integrierten Schaltkreises im Jahr 1958 durch den amerikanischen Ingenieur Jack Kilby wurde die Grundlage für die Entwicklung des Mikrochips gelegt und die dritte industrielle beziehungsweise digitale Revolution eingeleitet. [4] Durch den Mikrochip wurden Erfindungen wie der Computer, Handys und viele andere Geräte der Informations- und Kommunikationstechnik erst möglich.

Der Prozess der Industrialisierung ist nach wie vor im Gange und so kommt es, dass wir durch die stetige Digitalisierung vor der nächsten Revolution – der so genannten Industrie 4.0 stehen. Sie wird durch die Kombination von Cyber-Physischen Produktionssystemen, dem Internet der Dinge und dem Internet der Systeme definiert. [5]

Die Industrie 4.0 bringt aber auch einige Herausforderungen mit sich und es gibt noch einige offene Fragen zu beantworten. Vor allem in Bezug auf Datenschutz und dessen Umgang sowie den Ersatz der menschlichen Arbeitskraft aufgrund der Implementierung von intelligenten Fertigungssystemen sind oft diskutierte Themen. Der technologische Fortschritt und Wandel wird stets von Befürchtungen begleitet. Offensichtlich ist, dass der technologische Wandel die Arbeitsprozesse und -inhalte verändert. Bestimmte Tätigkeiten werden ersetzt, neue – die heute noch nicht existieren – entstehen.

Gewiss ist jedoch, dass die vierte industrielle Revolution kommt und sie ein enormes volkswirtschaftliches Potential beinhaltet. Bis zum Jahr 2025 lässt sich für Österreich, je nach Berechnungsmethode, eine zusätzliche Produktion von 47,4 Mrd. EUR bis 86,8 Mrd. EUR, bei einer zusätzlichen Wertschöpfung von 21,8 Mrd. EUR bis 38,1 Mrd. EUR, erreichen. [6] In Deutschland wird durch die Industrie 4.0 bis zum Jahr 2025 ein kumuliertes Wertschöpfungspotenzial von bis zu 78 Mrd. € erwartet. [7]

Um dieses Potenzial zu erreichen, werden der Industrie 4.0 neun Kerntechnologien zu Grunde gelegt, welche in Abbildung 1 dargestellt sind. [8] Jede einzelne von ihnen wird durch unterschiedliche Forschungseinrichtungen, Universitäten, Start-ups usw. erforscht, jedoch kombiniert zusammen ergeben sie die Industrie 4.0. Die lokale Implementierung dieser Technologien in einer Produktionsstätte führt zu sogenannten intelligenten Fabriken.

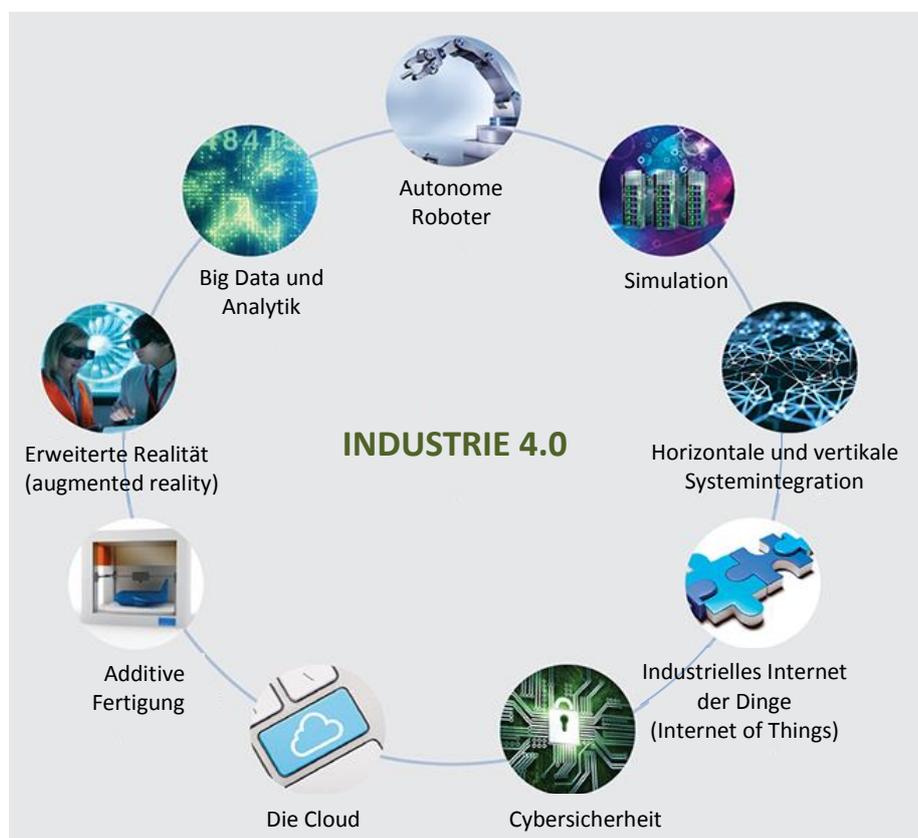


Abbildung 1: Die neun Kerntechnologien der Industrie 4.0 [8]

Die Zukunftsvision dabei ist es, dass sich in solchen Fabriken intelligente Maschinen auf Basis von gigantischen digitalen Datenmengen selbst steuern sollen. Dabei sollen sie ihren Bedarf an Produktionsmitteln selbst ermitteln und wissen, wann eine Wartung ansteht. Produkte sollen über ihren aktuellen Zustand Auskunft geben und Upgrades oder gar ihren baldigen Einsatz fordern können. Betriebsmittel sollen eigenständig Informationen austauschen und sich gegenseitig selbständig steuern.

Zudem soll die intelligente Fabrik auch mit betriebswirtschaftlichen Prozessen vernetzt sein. Dadurch können wirtschaftliche Kennzahlen und Ziele des Unternehmens anhand zur Verfügung stehender, digitaler Daten direkt im Produktionsprozess berücksichtigt werden.

In Österreich wird an der Technischen Universität Wien in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ erforscht, wie solch eine intelligente industrielle Produktion funktionieren kann. [9] Sie dient als Demonstrationsfabrik für intelligente Produktion sowie Cyber-Physische Produktionssysteme. Der Schwerpunkt liegt auf der Erforschung von neuen Konzepten und Lösungen für variantenreiche Serienproduktion im Bereich der diskreten Fertigungsindustrie, die typisch für viele österreichische Unternehmen ist.

1.1 Problemstellung

Die Industrie 4.0 hat, wie in Abbildung 1 gezeigt, neun Kerntechnologien. Eine davon ist die additive Fertigung. Der Begriff „additive Fertigung“ oder auch „3D Druck“ beinhalten jeden denkbaren Prozess der Anordnung von Material zur Herstellung maßstäblicher dreidimensionaler physischer Objekte unmittelbar aus einem 3D-CAD Datensatz (computer-aided design). [10] Die technische Realisierung basiert dabei auf dem Schichtbauprinzip, welches durch unterschiedliche Technologien umgesetzt werden kann. Die Bauteile entstehen Schicht für Schicht durch Auf- und Aneinanderfügen von Material, wodurch bauteilabhängige Werkzeuge wie Bohrer, Fräser etc. nicht benötigt und komplexe Geometrien mit relativ wenig Aufwand realisierbar werden.

Dabei ist es möglich, dass die Produktion und der Verbrauch am selben Ort stattfinden können, wodurch die Produktion dezentralisiert wird. Im Bereich der Ersatzteilerfertigung werden erste Überlegungen angestellt, um durch additive Fertigung direkt vor Ort ein entsprechendes Ersatzteil herzustellen. Die Lagerung beziehungsweise Bereitstellung von Werkzeugen für und von Ersatzteilen beim Hersteller kann somit komplett entfallen, was große Auswirkungen auf die Kapitalbindung eines Unternehmens hat. Zusätzlich werden Ersatzteile sehr billig, da sie nur noch als 3D-Datensatz archiviert werden müssen.

Ein weiterer Vorteil der additiven Fertigung ist, dass die Produktionskosten auch bei Kleinserien niedrig bleiben. So können als Beispiel in der Medizintechnik Kniegelenke für PatientInnen oder in der Metalltechnik Gusskerne für die Herstellung von Pkw-Zylinderköpfen kostengünstig hergestellt werden. Der Druck im Mikro- und Nanobereich ermöglicht des Weiteren den Betrieb von winzigen medizinischen Geräten. [11]

Additive Fertigung ermöglicht also die schnelle, flexible und kostengünstige Herstellung von Produkten direkt aus 3D-CAD-Datensätzen. Einen solchen Datensatz beziehungsweise ein virtuelles 3D Modell kann man grundsätzlich auf drei unterschiedliche Möglichkeiten erhalten: durch Runterladen von Modellplattformen, durch selbstkonstruierte Modelle oder durch den Scan von vorhandenen Objekten (siehe Abbildung 2).

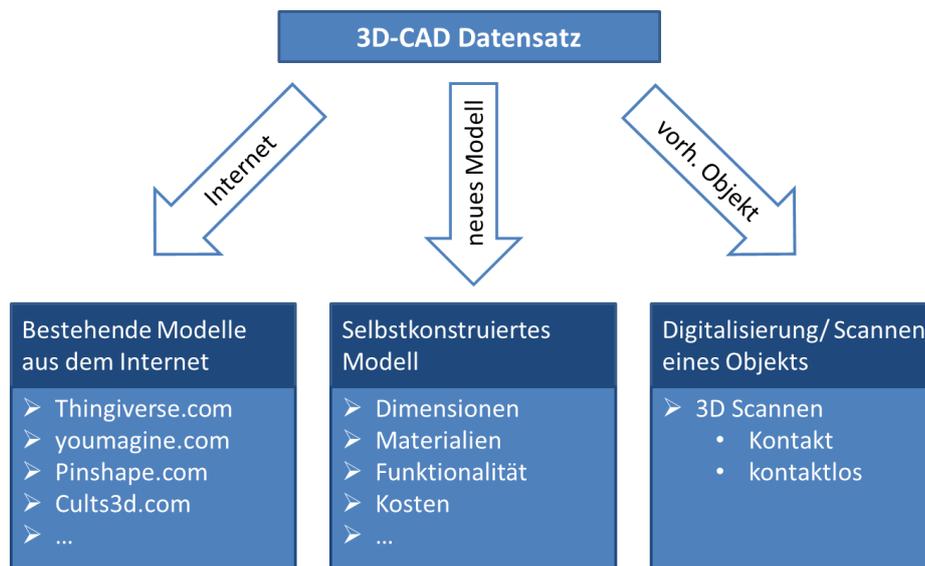


Abbildung 2: Drei Möglichkeiten einen 3D-CAD Datensatz zu erhalten

Die einfachste Methode ist der Gebrauch von Modellplattformen im Internet. Modelle können meist kostenfrei erworben und direkt heruntergeladen werden. Man benötigt zwar keine Kenntnisse über CAD Programme, man ist daher aber auch in der individuellen Gestaltung der Modelle sehr eingeschränkt, da die Form der Modelle nicht weiter manipuliert werden kann.

Beherrscht man ein CAD-Programm, kann man sich auch aufwendige und komplexe Modelle selber erzeugen. Der Vorteil ist, dass die Gestaltung von Dimensionen, Funktionen und damit einhergehend die Kosten der Modelle individuell angepasst werden können. In den meisten Fällen benötigt man aber eine Lizenz für solche Programme, die nötige Übung um Modelle zu konstruieren und technisches Grundverständnis über Geometrie, Materialkunde und Physik.

Die dritte Möglichkeit wird durch die Entwicklung von sogenannten 3D Scannern realisiert. Der 3D-Scan ist ein modernes Verfahren zur Erfassung der Form dreidimensionaler Objekte. Individuell gestaltete beziehungsweise vorhandene Objekte können dreidimensional eingescannt und aufbereitet werden und liefern mit Hilfe einer Software ein digitales 3D Modell. Basierend auf unterschiedlichen Technologien, ist es möglich in kurzer Zeit ein dreidimensionales Modell eines realen Objektes zu erhalten. Die Benutzung von 3D Scannern ist dabei intuitiv und bedarf keines großen technischen Verständnisses. Zusätzlich kann man mit Hilfe der Kenntnis von CAD-Programmen das digitale Modell weiter anpassen und individualisieren.

Diese Möglichkeit wird durch die Weiterentwicklung der Technologie immer zuverlässiger, genauer und schneller. Besonders in den Bereichen Design, Industrie und Medizin sind 3D-Scanner heutzutage kaum noch wegzudenken.

Die additive Fertigung ist ein wesentlicher Teil der Industrie 4.0 und die Erstellung von 3D-CAD Datensätzen ist die Grundlage hierfür. Dies ist mitunter auch einer jener Gründe, warum

in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 als erstes Beispielprodukt ein 3D Drucker produziert wird. Damit wird, wie zuvor beschrieben, der herstellende Teil der additiven Fertigung abgedeckt. Die Frage stellt sich nun, wie man an 3D-CAD Datensätze kommt. Um für die variantenreiche Serienproduktion ein weiteres Produkt anbieten zu können und für den Drucker eine direkte Lösung zur Erstellung von 3D-CAD Datensätzen anzubieten, wurde diese Diplomarbeit angefertigt.

1.2 Zielsetzung

Die additive Fertigung als eine der Kerntechnologien der Industrie 4.0 ist auf 3D-CAD Datensätze als Input angewiesen. Daher bietet es sich an, neben dem 3D Drucker als Beispielprodukt für die TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 einen 3D Scanner zu konstruieren.

Aus dieser Überlegung ergibt sich als Forschungsaufgabe dieser Arbeit die

Darstellung der allgemeinen Funktionsweise eines 3D Scanners mit dessen Hauptanwendungsgebiet in der Industrie, die Erläuterung der Prozesskette vom Entstehen der Scaninformation bis hin zum digitalen Datensatz als Input für den 3D Drucker mit der Beschreibung der Dateiformate und eine Beschreibung ausgewählter Scantechnologien mit Anwendungsbeispielen.

Ergebnis dieser Aufgabe soll es sein, eine ausreichende Grundlage für das weitere Vorgehen aufzustellen und dabei ein tiefgehendes technisches Grundverständnis zu erarbeiten. Dieses soll als Ausgangspunkt für die anschließende Forschungsfrage dienen, welche folgerichtig lautet:

Welche Scantechnologie bietet sich für die Konstruktion eines virtuellen Modells eines 3D Scanners auf Basis definierter Kriterien am besten an und wie kann so ein Modell unter der Voraussetzung konstruiert werden, dass es in das Rahmenprofil des 3D Druckers (Version 2.5) der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 reinpasst?

Um diese Forschungsfrage zu validieren, soll mit Hilfe eines realen Prototyps der Proof-of-Concept erfolgen. Zudem sollen die Hard- und Softwarekomponenten sowie der Digitalisierungsprozess beschrieben werden.

Ziel ist es einerseits die unterschiedlichen Scantechnologien gegenüberzustellen und Kriterien für die Auswahl der geeigneten Technologie zu definieren, sowie andererseits eine Basis für die spätere Realisierung des Produktes zu formulieren.

1.3 Struktureller Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in sieben Kapitel unterteilt.

Im **ersten Kapitel** wird versucht, über einen allgemeinen Ansatz eine kurze Einleitung in die Geschichte der Industrialisierung zu geben und dabei die Bedeutung der additiven Fertigung

zu zeigen. Dabei wird erklärt, dass 3D-CAD Datensätze als Input für die additive Fertigung entscheidend sind und welche Möglichkeit 3D Scanner bieten. Es wird die Problemstellung sowie Zielsetzung beschrieben.

In **Kapitel zwei** wird das Grundverständnis über die Funktionsweise von 3D Scannern erarbeitet. Dabei wird beschrieben, welche Daten durch einen 3D Scanner erfasst werden und wie diese Daten aufbereitet werden. Zudem wird gezeigt, in welchem Bereich der 3D Modellierung diese Technologie einzuordnen ist.

Um ein besseres Verständnis über die Scantechnologien zu erhalten, wird in **Kapitel drei** die historische Entwicklung vom ersten 3D Messgerät bis zu den aktuellen Technologien dargestellt. Es wird versucht unterschiedliche Scantechnologien zu klassifizieren und ausgewählte zu beschreiben. Anhand von Beispielen wird angeführt, in welchen Bereichen die jeweiligen 3D Scantechnologien Anwendung finden und welche physikalischen Prinzipien bei ihnen zu Grunde liegen.

Im **vierten Kapitel** wird die gesamte Prozesskette, von der Scaninformation bis hin zum 3D-CAD Datensatz untersucht. Es werden die unterschiedlichen Schritte beschrieben und die häufigsten Dateiformate erläutert. Die einzelnen Schritte, vom Scan bis zum Druck, werden dargestellt und es wird aufgezeigt, wann und welche Aktionen vom Anwender durchgeführt werden müssen.

In **Kapitel fünf** werden die in Kapitel vier beschriebenen Scantechnologien gegenüber gestellt und anhand von definierten Kriterien bewertet. Dabei wird jene Scantechnologie gefunden, welche für die Konstruktion eines virtuellen Modells eines 3D Scanners am geeignetsten ist. Neben der konstruktiven Umsetzung der mechanischen Konstruktion werden auch die Elektronikkomponenten beschrieben. Das Modell stellt ein virtuelles, potentiell zweites Produkt der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 dar.

Für den Proof-of-Concept wird in **Kapitel sechs** ein Prototyp vom virtuellen Modell abgeleitet. Der Prototyp selber wurde so gestaltet, dass er mit Hilfe des 3D Druckers gefertigt werden kann. Mit ihm wird der Digitalisierungsprozess durchgeführt und gezeigt, dass die gewählte 3D Scantechnologie für diesen Anwendungsfall funktioniert.

Kapitel sieben beschreibt die gewonnenen Erkenntnisse und gibt Empfehlungen für weitere Arbeiten abgeben.

2 Funktionsweise

In diesem Kapitel der Diplomarbeit wird die allgemeine Funktionsweise von 3D Scannern im Groben erläutert. Um diese Technologie im Datenerstellungsprozess besser einordnen zu können, wird nach der Beschreibung der Funktionsweise eine kurze Übersicht über den Prozess der 3D Modellierung gegeben, welche bei der Erzeugung von 3D-CAD Datensätzen als Input für die additive Fertigung zu Grunde liegt.

2.1 Einführung

Unter einem 3D-Scanner versteht man ein technisches System bestehend aus Hard- und Software, welches mithilfe eines Mediums Abstandsinformationen in X, Y, Z-Koordinaten von Punkten physisch realer Objekte sammelt und verwertet. Die gesammelten Informationen werden für die Erstellung von digitalen, dreidimensionalen Kopien des Originals genutzt. Zur Erfassung der Informationen können unterschiedliche Technologien eingesetzt und somit unterschiedliche Grade der Übereinstimmung von Original und Kopie erreicht werden. [12]

3D-Scanner sind also Messgeräte, die die Form und Textur von realen Objekten oder Umgebungen erfassen. Wie bei allen Messgeräten, gibt es auch hier unterschiedliche Baugrößen und Ausführungen. So können sie stationär in einer festen Position (z.B. in Produktionslinien zur Qualitätskontrolle), als mobile Systeme auf Stativen oder ähnlichen Stützen für Nah- und Mittelanwendungen beziehungsweise als luftgestützte Systeme für topografische Anwendungen ausgeführt werden. [13]

Mit Hilfe dieser Messgeräte können die unterschiedlichsten Gegenstände und Objekte gescannt und digitalisiert werden. Die Auswahl des geeignetsten Messgerätes hängt also davon ab was man scannen möchte.

Hat man seine Wahl getroffen, wird mit einem 3D Scanner das Objekt „vermessen“ und mit den gesammelten Messdaten eine Punktwolke der Oberflächengeometrie des Objektes erzeugt. Hierzu müssen im ersten Schritt die einzelnen Punkte in einem Referenzsystem ausgerichtet beziehungsweise „registriert“ werden. Dadurch bekommt jeder einzelne Punkt über Koordinaten einen festen Platz in diesem System. Dies geschieht meistens bereits während des Scans, kann aber auch in der Nachbearbeitung geschehen. In Abbildung 3 ist eine Punktwolke eines berührungslos-dreidimensional gescannten Zahnrades dargestellt. In diesem Stadium der Digitalisierung handelt es sich nur um Punkte und noch um kein Volumenmodell, welchem physikalische Parameter zugewiesen werden können.

Insbesondere optische Technologien zeichnen sich durch eine kostengünstige Umsetzung, unkompliziertes Setup und geringe Invasivität aus. Zudem ist es auch möglich, neben den

Abstandsinformationen zu Geometrie und Textur ebenfalls Oberflächenfarbinformationen zu sammeln.

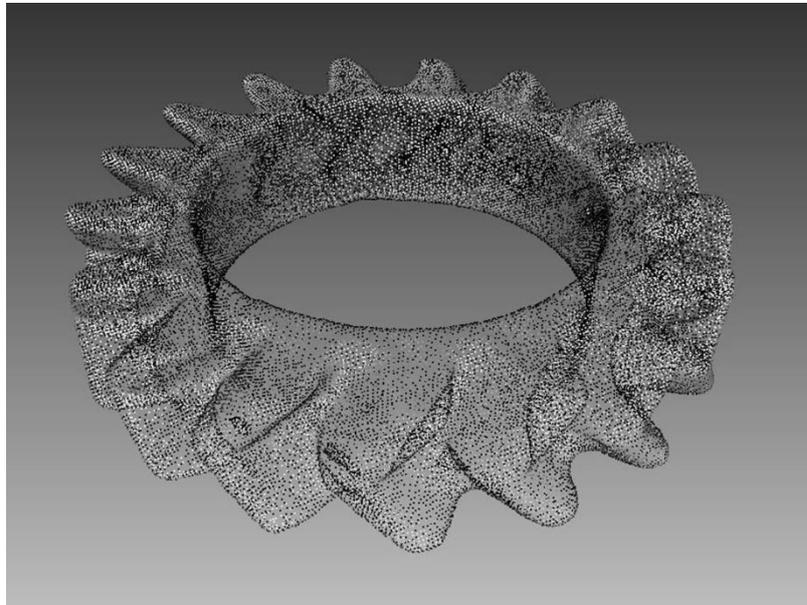


Abbildung 3: Punktwolke eines Zahnrades [14]

Die Anzahl der gemessenen Punkte beeinflusst die Genauigkeit des späteren Modells. Dies hat aber direkten Einfluss auf die Aufnahmedauer und somit auf die Kosten des Scans. Zusätzlich kommt es häufig vor, dass beim Scannen unerwünschte Punkte beziehungsweise bestimmte Bereiche der Oberfläche gar nicht aufgenommen werden. Spezielle Software unterstützt solche Bereiche zu bereinigen indem unerwünschte Punkte gelöscht beziehungsweise fehlende Punkte in die Wolke interpoliert werden. Durch diesen Schritt kann die Datenqualität vor der Rekonstruktion verbessert werden. [15]

Um aus diesen einzelnen Punkten ein dreidimensionales Modell zu erhalten werden in der Rekonstruktion die einzelnen Punkte durch dreieckige Polygone miteinander verknüpft, um folglich die digitale Form des realen Gegenstandes mit einem sogenannten „triangle mesh“ (Dreiecksnetz) beziehungsweise einem Polygonflächennetz zu extrapolieren. Dabei kann über die Anzahl der Dreiecke ebenfalls die Genauigkeit der Geometrie beeinflusst werden. Bei komplexen Objekten und einer gewünschten hohen Genauigkeit muss man jedoch die Rechenleistung der Hardware berücksichtigen. Abbildung 4 stellt das zuvor gescannte Zahnrad nach der Rekonstruktion dar. Die Punkte sind durch winzige Dreiecke miteinander verbunden und bilden die Grundlage für die finale Bearbeitung.

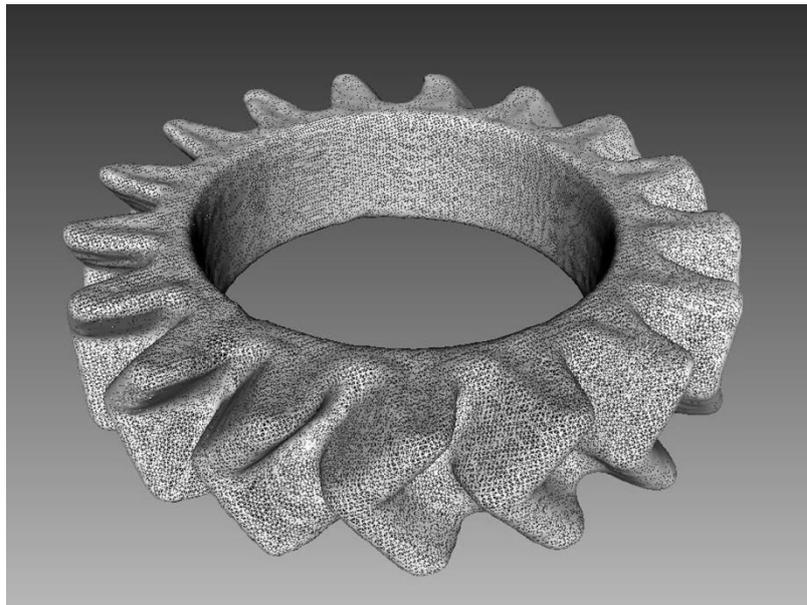


Abbildung 4: Rekonstruktion der Punktwolke des Zahnrades [14]

Die so gewonnenen „Scans“ werden im Allgemeinen wie in Abbildung 5 für zwei Hauptanwendungen verwendet. [16]

Für das Reverse Engineering beziehungsweise Rapid Prototyping werden die Abmessungen und die Dimensionen für ein geometrisches Objekt in NURBS-Oberflächen (Non-Uniform Rational B-Spline) konvertiert, welche als Input für 3D-CAD Programme dienen. In solchen Programmen werden aus diesen geometrischen Objekten virtuelle Modelle erstellt, welche erweitert, verändert beziehungsweise neu gestaltet werden können. Diese Vorgehensweise findet vor allem in frühen Phasen der Produktentwicklung statt, wo anhand von Prototypen die Designvorstellungen mit den technischen Anforderungen kombiniert und angepasst werden. Bei komplexen Geometrien der Modelle, werden die Prototypen nicht selten mittels 3D Druck gefertigt um ein physisches Abbild zu erhalten, welches für erste Tests hinsichtlich Design, Ergonomie, Handling, Packaging etc. verwendet werden kann. Hierzu wird das Dreiecksnetz als STL-Datei exportiert (STereoLithography beziehungsweise Standard Tessellation Language). [16]

Für einen schnellen Ist-Soll Vergleich im Sinne von CAI (computer-aided-inspection) kann ohne aufwändige Aufbereitung des Scans eine schnelle optische Kontrolle durchgeführt werden. Der technische Fortschritt in diesem Bereich ermöglicht aber auch eine Aufbereitung der Daten mit analytischen Werkzeugen. Durch die hohe Auflösung und Detailgenauigkeit des Scans können so kleinste Abweichungen erkannt und farblich gekennzeichnet werden. Als Teil der Qualitätskontrolle wird so der zeitliche Fortschritt der Fertigung digital dokumentiert und archiviert. [16]

Am Beispiel des Zahnrades erhält man somit auf der einen Seite ein Volumenmodell welches als 3D-CAD Datensatz weiter manipuliert und zum Beispiel als Teil in einer Baugruppe verbaut werden kann beziehungsweise auf der anderen Seite ein schnelles visuelles Objekt für einen Soll-Ist Vergleich für die Fertigungsinspektion.

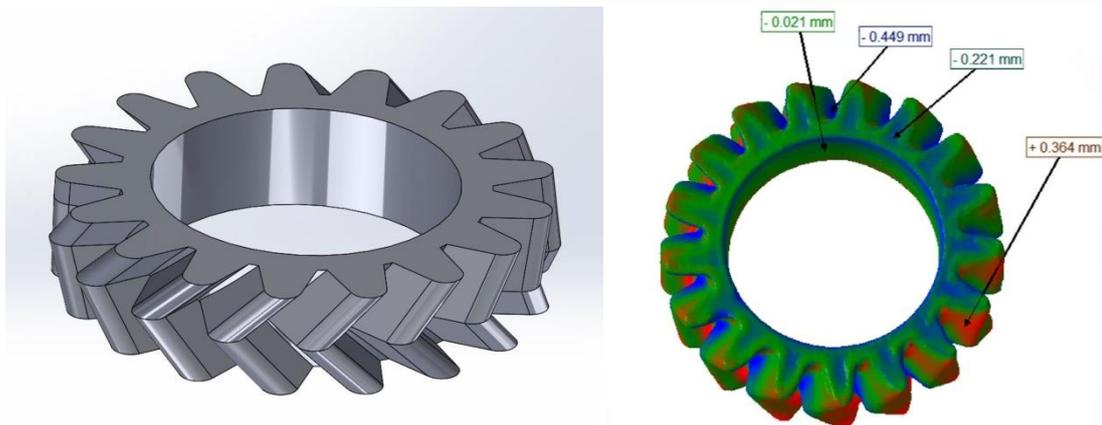


Abbildung 5: Hauptanwendungen des 3D Scans am Beispiel des Zahnrades [14]

An dieser Stelle soll noch erwähnt werden, dass der 3D Scan einen besonders hohen Stellenwert für das Archivieren und Dokumentieren im Bereich der Archäologie hat. Die Spannweite reicht von kleinen prähistorischen Funden bis hin zu ganzen Tempelanlagen. So wurde, um ein Beispiel zu nennen 2014 die Tempelanlage von Angkor Wat in Kambodscha mittels Laserscan, dem sogenannten LIDAR (Abkürzung für engl. light detection and ranging) digitalisiert. [17]

Ebenfalls hat der 3D Scan eine stark wachsende Bedeutung in der Unterhaltungsindustrie. So wird bei der Produktion von Filmen, Videospielen und weiteren Anwendungen immer häufiger auf ein dreidimensionales Erlebnis für den Kunden gesetzt.

Diese genannten Anwendungen werden in dieser Arbeit jedoch nicht weiter behandelt, da der Fokus auf der industriellen Applikation und somit auf den zuvor genannten zwei Hauptanwendungen beruht.

2.2 Dreidimensionale Modellierung eines Objektes

Die 3D-Modellierung im Allgemeinen wird in vielen Bereichen immer wichtiger. Dabei geht es darum, Objekte möglichst schnell und genau zu erfassen und aus ihnen CAD-Modelle zu erzeugen. Sie kann daher als der komplette Prozess gesehen werden, der von der Datenerfassung ausgeht und mit einem virtuellen 3D-Modell visuell interaktiv auf einem Computer endet. [16] Wie bereits erwähnt, werden dreidimensionale digitale Modelle unter anderem als Inputdaten für die additive Fertigung benötigt.

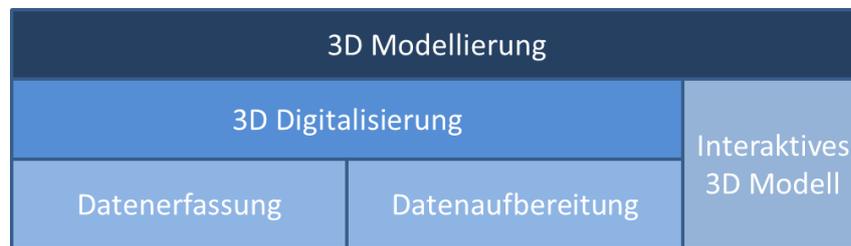


Abbildung 6: Prozess der 3D Modellierung

Oft ist die 3D-Modellierung nur als der Prozess der Umwandlung einer Messpunkt wolke in ein trianguliertes Netzwerk ("Mesh") oder texturierte Oberfläche gemeint, während es einen vollständigen und allgemeinen Prozess der Objektrekonstruktion beschreibt.

In Abbildung 6 wird die 3D Modellierung auf ihre Komponenten aufgeteilt. Im Wesentlichen besteht sie aus der 3D Digitalisierung und dem interaktiven dreidimensionalen Modell. Die 3D Digitalisierung kann weiter auf die zwei Bereiche Datenerfassung und Datenaufbereitung aufgefächert werden. Damit ist ersichtlich, dass die 3D Modellierung die Erfassung der Daten, deren Aufbereitung und das daraus abgeleitete dreidimensionale Modell beinhaltet.

Wie im vorigen Kapitel beschrieben, hilft ein 3D Scanner somit bei der Datenerfassung. Mit Hilfe von geeigneter Software können die ermittelten Daten (Punktwolke) aufbereitet werden und in ein interaktives 3D Modell überführt werden.

Digitale Modelle sind heutzutage überall präsent, ihr Einsatz und ihre Verbreitung werden durch das Internet sehr beliebt und können auf kostengünstigen Computern angezeigt werden. Obwohl es trivial scheint ein einfaches 3D-Modell zu erstellen, bedarf die Erzeugung eines präzisen und fotorealistischen Computermodells eines komplexen Objektes noch erheblichen Aufwands.

Zusätzlich beinhalten die Anforderungen für viele Anwendungen, einschließlich der digitalen Archivierung und Dokumentation, eine hohe geometrische Genauigkeit, die Modellierung der kompletten Details und immer öfter einen Fotorealismus der Ergebnisse sowie die Automatisierung, die Kosten, die Tragbarkeit und die Flexibilität der Modellierungstechnik. Daher ist die Auswahl der am besten geeigneten 3D-Modellierungstechnik, um alle Anforderungen für eine gegebene Anwendung zu erfüllen, nicht immer eine leichte Aufgabe. [18]

Die allgemeine Funktionsweise von 3D Scannern ist nun im groben erläutert. Es wurde ein Einblick in die 3D Modellierung gegeben und eine Zuordnung im Datenerstellungsprozess gemacht. Welche Möglichkeiten es nun gibt, Objekte dreidimensional einzuscannen, soll im folgenden Kapitel vorgestellt werden.

3 Die 3D Scantechnologien

Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung der Scantechnologie vom ersten Patent bis zum heutigen Stand der Technik. Eine grafische Übersicht hilft die Technologien grob einzuordnen. Ausgewählte Technologien werden genauer beschrieben und Anwendungen beziehungsweise Beispiele angeführt.

Die Entstehung der Scanning-Technologie kann auf das Jahr 1968 datiert werden, als das Patent für ein Messgerät der Firma Ferranti Ltd., eingereicht durch Harry Ogden veröffentlicht wurde. [19] Damals war das genaue Scannen von Objekten ein mühsamer Prozess mit vielen technologischen Herausforderungen unter Laborbedingungen. Erst durch die Einführung der computergestützten Datenverarbeitung wurde die Erstellung von genaueren und komplexeren Modellen ermöglicht. Im Jahr 1994 wurde der erste genaue und schnelle Scanner gebaut um kleine Objekte mit einem linearen Laserstrahl zu messen. [20] Seit damals hat sich einiges getan und so kommen neben dem Laser weitere Technologien zum Einsatz.

Um ein 3D-Scangerät zu bauen, können unterschiedliche Technologien verwendet werden. Im Laufe der Entwicklung haben sich eine Vielzahl an technologischen Möglichkeiten und Medien herauskristallisiert, wie man durch die Messung von Abständen die geometrische Form eines Objektes digital erfassen kann. Dabei ist jede Technologie durch seine eigene technische Einschränkung, seine Vorteile aber auch Kosten bestimmt.

Es gibt aber auch Einschränkungen hinsichtlich der zu scannenden Objekte. So haben vor allem optische Scan-Technologien nach wie vor Schwierigkeiten mit glänzenden, spiegelnden oder transparenten Oberflächen. [21] Manche Technologien bringen aber auch einzigartige Vorteile mit sich. So kann zum Beispiel die industrielle Computertomographie (ICT) dafür verwendet werden, um eine zerstörungsfreie und somit kostengünstige Inspektion vom Materialaufbau teurer Bauteilkomponenten durchzuführen und etwaige Problem- und Fehlstellen rechtzeitig zu finden.

3D Scanner der neuesten Generation zeigen im Vergleich zu den ersten, oft klobigen und aufwändigen Apparaturen hohe Genauigkeit, Portabilität, Benutzerfreundlichkeit und Integration mit 3D-Modellierungs-Software-Tools.

In Abbildung 7 wird eine Klassifikation der 3D Scanning Technologien dargestellt, die sich über die Jahrzehnte etabliert hat. [22] Dabei stellen die blauen Kästchen die Klassifikation und die orangenen Kästchen die Technologien dar. In der folgenden Abbildung sind aufgrund der Übersicht und des Platzes nur jene für diese Arbeit relevanten Technologien dargestellt.

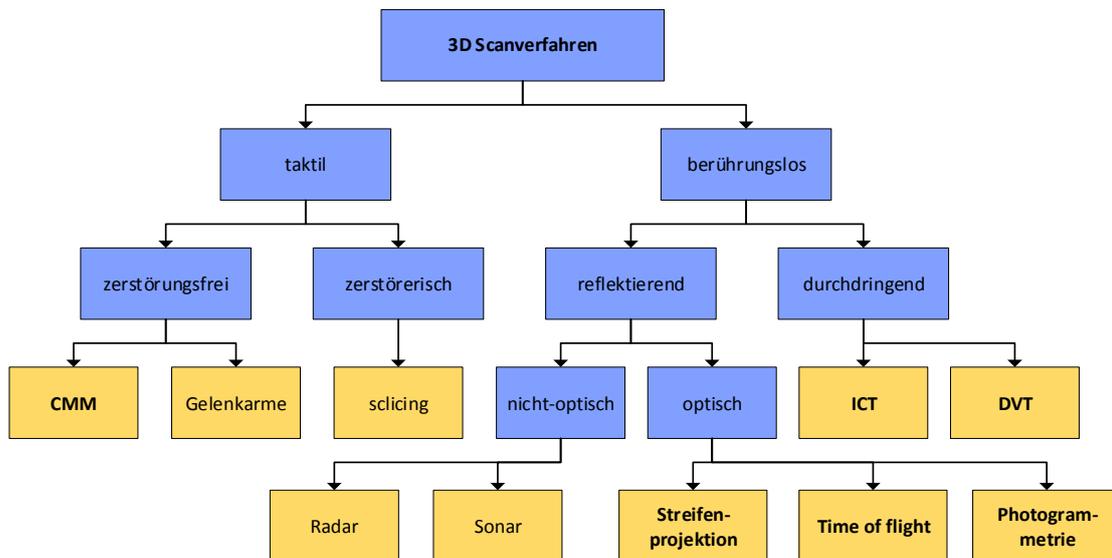


Abbildung 7: Einteilung der 3D Scantechnologien

Wie sich die Form eines Objektes digital erfassen lässt wird zunächst in zwei Hauptkategorien unterschieden. Dabei kann die Datenerfassung zum einen mittels Berührung des Objektes und zum anderen völlig berührungslos erfolgen. Es sei vorab angemerkt, dass heutzutage die kontaktlosen Technologien die am häufigsten verwendeten sind, da keine aufwändige Referenzkonstruktion benötigt wird. Vor allem die Herausforderungen bei der Erfassung von Freiformflächen beziehungsweise komplexen Strukturen bringen erhebliche Vorteile besonders bei der Scandauer für die kontaktlosen Anwendungen. Aber auch die Möglichkeit Informationen über die Farbe der einzelnen Scanpunkte der Objekte mit zu erfassen, hat die Weiterentwicklung der kontaktlosen 3D Scantechnologien in den letzten Jahren vorangetrieben.

Bei den Technologien, wo der Abstand mittels Kontakt gemessen wird, unterscheidet man ob bei der Messung das Objekt zerstört wird oder nicht. Da diese Verfahren meistens zur Inspektion von Fertigungsmaßen angewendet werden, wird eine Zerstörung des zu messendes Objektes eher selten durchgeführt. Die zerstörerischen taktilen 3D Scan-Technologien sollen aus diesem Grund hier auch nicht mehr Erwähnung finden und sind insbesondere aufgrund ihrer nahezu kaum noch auftretenden Verwendung nicht relevant für diese Arbeit.

Die kontaktlosen Scantechnologien haben eine höhere Relevanz und beinhalten die meisten Verfahren für die dreidimensionale virtuelle Rekonstruktion eines realen Objektes. Sie werden in erster Linie dadurch unterschieden ob eine bestimmte elektromagnetische Strahlung – Licht, Laser, Röntgen, usw. – von den zu digitalisierenden Objekten reflektiert wird oder diese Strahlung durch das Objekt hindurch geht. Dabei spielt die Frequenz, Wellenlänge und Form der Strahlung eine entscheidende Rolle. Diese Faktoren bestimmen den Energieinhalt der Strahlen und geben somit Auskunft, ob sie für den menschlichen Organismus gesundheitsschädigend sein können. Ist dies der Fall müssen entsprechende Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden was sich direkt auf die Kosten auswirkt.

Wird die Strahlung vom Objekt reflektiert, so kann eine weitere Unterscheidung getroffen werden. Dabei wird in Betracht gezogen, ob diese Strahlen vom menschlichen Auge optisch erfasst werden können oder ob eine spezielle Detektionstechnik benötigt wird. Diese Kriterien spielen eine Rolle bei den Kosten sowie dem Aufwand einer Messung.

In Abbildung 7 sind aus platzgründen nicht alle Technologien (orange Kästchen) angeführt. Es soll aber ein Eindruck darüber vermittelt werden, dass es aus technischer Sicht einige Möglichkeiten gibt wie ein reales Objekte in ein virtuelles Modell überführt werden kann. Grundsätzlich hat jede Technologie seine Vor- und Nachteile. Unterschiedliche Anforderungen wie eine hohe geometrische Genauigkeit, schnelle Scangeschwindigkeit, ein Fotorealismus der Ergebnisse sowie die Automatisierung, die Kosten, die Tragbarkeit und die Flexibilität der 3D Scanner spielen für unterschiedliche Anwendungen eine unterschiedliche Rolle. Daher ist die Auswahl der am besten geeigneten 3D-Scantechnologie, welche alle Anforderungen für eine bestimmte Anwendung erfüllt, nicht immer eine leichte Aufgabe.

In den folgenden Unterkapiteln sollen nun Scantechnologien genauer beleuchtet werden, die nach der persönlichen Einschätzung des Autors einen besonderen Stellenwert in der Industrie haben. Zusätzlich bilden sie jene Grundlage, aus welcher die Scantechnologie für das virtuelle Modell des 3D Scanners gewählt werden soll.

3.1 Zerstörungsfreie Kontaktverfahren

Diese Technologien beruhen auf dem Prinzip, dass ein koordinatengeführter Berührungssensor das zu erfassende Objekt an unterschiedlichen Punkten anfährt. Bei der Berührung des Sensors ermittelt die Software die Koordinaten des Punktes und speichert sie im Bezugssystem ab. Der Scan wird umso genauer, umso mehr Punkte man registriert. Diese Art der Datenerfassung ist zeitlich sehr intensiv und beschränkt sich nur auf feste und stabile Objekte. Dies ist ein wesentlicher Nachteil gegenüber den kontaktlosen 3D Scannern, die in kürzester Zeit das gesamte Objekt mit einer Vielzahl an Datenpunkten erfassen können. Für einfachere und vor allem hochpräzise Messaufgaben werden sie aber nach wie vor eingesetzt.

3.1.1 Koordinatenmessgeräte (CMM)

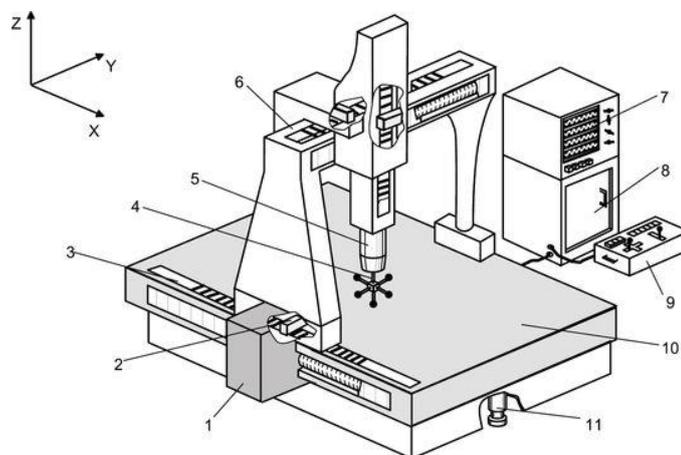
Im Jahr 1968 wurde durch die Veröffentlichung eines US Patents über das Koordinatenmessgerät der Firma Ferranti Ltd. der Grundstein für die Entwicklung aller 3D Scantechnologien gelegt. [19] Durch die Weiterentwicklung des ersten Gerätes haben sich bis heute die Bauart und vor allem die Anwendung stark geändert.

Koordinatenmessgeräte oder CMMs (coordinate measuring machine) werden heutzutage in erster Linie für die Inspektion von Bauteilen eingesetzt. Das Gerät kann je nach Ausführung manuell Verfahren oder über CNC-Positionierung gesteuert werden. Dadurch können das Messkopfsystem (Tastkopf) und das Messobjekt in ihrer räumlichen Lage relativ zu einander bewegt werden. Der Taster hat typischerweise eine kleine Kugel mit definiertem Durchmesser

am Ende einer kleinen Welle. Wenn das Koordinatenmessgerät den Kontakt der Tasterspitze erfasst, wird ein Messwert im XYZ-Raum aufgenommen. Hierin besteht aber auch gleichzeitig einer der Nachteile von CMMs, sie müssen das Objekt berühren. Daraus resultiert, dass nur feste und stabile Objekte gemessen werden können bei denen der Kontakt nicht zu Deformationen und somit zu Messungenauigkeiten beziehungsweise sogar zu Beschädigungen führt. [23]

Einzelne Sensormesspunkte können aufgrund der bekannten Positionen der Positioniereinheit in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert und miteinander verknüpft werden. Dadurch entsteht ein digitales Abbild des realen Objekts welches als Informationshintergrund rein die Positionen der Messpunkte beinhaltet. Da die Detailgenauigkeit des virtuellen Modells von der Anzahl der Messpunkte abhängt, ist die Erfassung dieser sehr zeitintensiv.

Die häufigste Bauart von Koordinatenmessgeräten sind Portalgeräte wo die orthogonalen Führungen ein kartesisches Koordinatensystem mit den Achsen X, Y und Z aufspannen. Durch die Erweiterung eines zusätzlichen Drehtisches oder einer Dreh-Schwenk-Einrichtung für das Messkopfsystem können auch ungünstig gelegene Messelemente angetastet werden. Die veränderte Position des Werkstücks wird bei der Berechnung und Transformation der gemessenen Koordinatenwerte in das Referenzkoordinatensystem berücksichtigt. [23]



1 - Antrieb für X-Achse; 2 - Ablesesystem für X-Achse; 3 - Maßverkörperung für X-Achse; 4 - Taster; 5 - 3D-Tastkopf; 6 - Lagerung für Y-Achse; 7 - Anzeige; 8 - Steuer- und Anpasselektronik; 9 - Steuerpult; 10 - Werkstückaufnahme; 11 - Gerätebasis

Abbildung 8: prinzipieller Aufbau eines Portalkoordinatenmessgerätes [24]

Um die Teile auf wenige Mikrometer sehr genau zu messen, werden die Koordinatenmessgeräte typischerweise in einem speziellen Messraum eingesetzt. Dieser besitzt üblicherweise einen verstärkten Boden, eine kontrollierte Relativefeuchtigkeit und Raumtemperatur sowie eine Isolation gegenüber Vibrationen und anderen äußeren Kräften. Darüber hinaus haben die meisten Geräte eine große Granit-Tischoberfläche, die perfekt eben ist und eine definiert maximale Oberflächenrauigkeit besitzt. Die zu messenden Teile werden auf dem Granit-

Tisch befestigt, so dass sie während des Messvorgangs nicht verschoben oder bewegt werden können.

Bei den manuell verfahrenen Ausführungen sind die Führungen oft pneumatisch gelagert, sodass sich etwaige Vibrationen aufgrund von Reibungseinflüssen minimieren. [23]

3.2 Kontaktlose strahlendurchdringende Technologien

Bei den kontaktlosen strahlendurchdringenden Technologien hat sich vor allem die Röntgenstrahlung durchgesetzt. Sie ist dadurch charakterisiert, dass sie Objekte durchstrahlt und so für weitverbreitete bildgebende Verfahren eingesetzt wird. Die Röntgenstrahlung wird in einer speziellen Röntgenröhre erzeugt. Obwohl über die Jahre technische Verbesserungen an der Röhre durchgeführt wurden, hat sich am ursprünglichen Prinzip nichts geändert.

Abbildung 9 zeigt den schematischen Aufbau einer Röntgenröhre. In den meisten Fällen ist sie aus Glas mit Hochvakuum. Die Kathode (negativer Pol) besteht aus Metall und wird elektrisch beheizt wodurch Elektronen aus dem Metall austreten. Durch die angelegte Hochspannung werden sie in Richtung auf die Anode (positiver Pol) beschleunigt. Durch die Bombardierung der Anode durch die schnellen Elektronen wird die kinetische Energie in drei verschiedene Energien umgewandelt: Wärmeenergie, Sekundärstrahlung und Bremsstrahlung. Die Bremsstrahlung ist die eigentliche und wichtige Röntgenstrahlung. Sie entsteht durch die Abbremsung der schnellen Elektronen des Strahls an der Anode und wird meist normal zur Bewegungsrichtung der Elektronen abgestrahlt. [25]

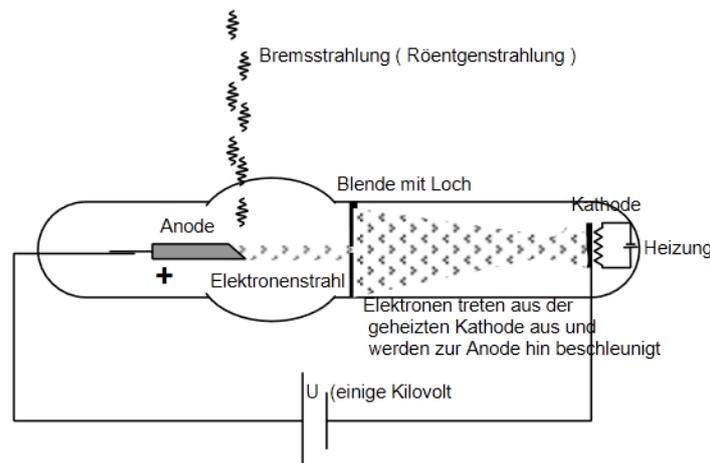


Abbildung 9: Schematische Darstellung einer Röntgenröhre [26]

Um die Richtung der Strahlen eindeutig zu bestimmen, wird die Röntgenröhre hinter einer Abdeckung mit definierter Blende befestigt. Das zu scannende Objekt wird nun mit diesen Strahlen beschossen und abhängig von der Materialdichte wird mehr oder weniger Strahlung durchgelassen. Die Intensität der durchgedrungenen Strahlen wird mittels Detektor aufgenommen und liefert ein zweidimensionales Bild. Bei der Computertomographie wird durch

rechnerbasierte Auswertung einer Vielzahl, aus verschiedenen Richtungen aufgenommenen Röntgenaufnahmen eines Objektes Schnittbilder erzeugt welche zu einem dreidimensionalen Modell zusammengefasst werden. [27]

3.2.1 Industrielle Computertomographie (ICT)

Die industrielle Computertomographie arbeitet auf der gleichen Basis wie die medizinische CT. Sie unterscheidet sich aber in Hinblick auf die Ausführung und die Anforderungen deutlich von ihr. Bei der industriellen CT werden Objekte von unterschiedlichen Größen und unterschiedlichen Zusammensetzungen untersucht. Dabei werden auch Gegenstände mit homogenen und inhomogenen Massenverteilungen gescannt. Sogar weiche Materialien wie zum Beispiel Elastomere oder Gummiteile können messtechnisch genau erfasst werden. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Baugrößen der Aufnahmesysteme mit unterschiedlicher Detailerkennbarkeit. [28]

Wird ein Bauteil fertiggestellt, kann es in der ICT-Anlage gescannt werden. Die gemessenen Daten werden über die Software in ein dreidimensionales Volumenmodell umgewandelt welches als CAD Modell verwendet werden kann. In der seriennahen Produktion werden die 3D Modelle oft mit den Konstruktionsdaten verglichen um etwaige Abweichungen zu prüfen. [28]

Ein großer Vorteil der ICT-Analyse besteht darin, dass die komplette Innen- und Außengeometrie eines Objektes in allen Details dargestellt werden kann. Durch die Erfassung und Vermessung des unzerstörten Objekts können mit der ICT auch Volumen von Lufteinschlüssen, Bohrungen oder Flüssigkeiten erfasst beziehungsweise genau lokalisiert werden. [28]

Des Weiteren können mit den gewonnenen Daten über das Reverse Engineering eine Finite Elemente Berechnung am „realen“ Bauteil durchgeführt werden. Damit lassen sich bereits vor dem Gebrauch Aussagen über Schwachstellen tätigen. Dies war bisher nur an den konstruktiven und frei von prozessbedingten Fehlern erstellten CAD-Daten möglich. [29]

Es gibt unterschiedliche Methoden wie man das ICT durchführen kann. Eine sehr oft verwendete ist die dreidimensionale CT. Durch allseitiges Durchstrahlen eines Objektes kann das gesamte Volumen untersucht werden. Die Röntgenquelle sendet hierbei einen Strahl aus, welcher durch einen Flachbilddetektor erfasst wird, Abbildung 10 zeigt den schematischen Aufbau dieser Methode. Durch die erzeugten Schichtaufnahmen wird ein Schnittbild berechnet.

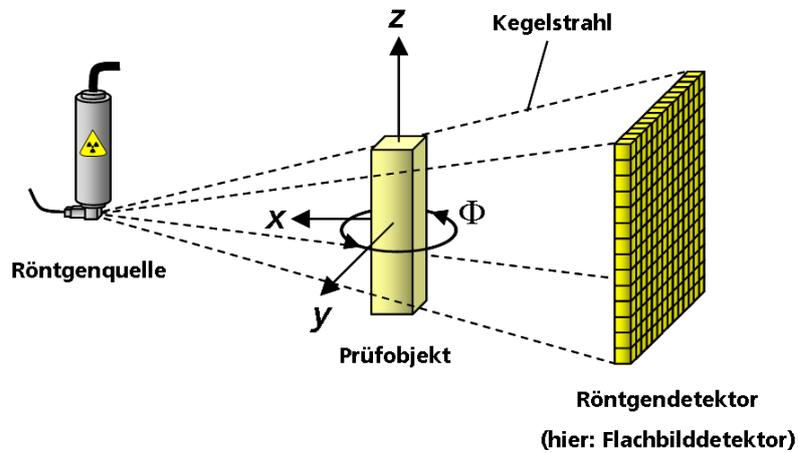


Abbildung 10: Schematischer Aufbau der 3D-ICT [30]

Die 3D-ICT zeichnet sich vor allem durch kurze Messzeiten aus. Sie ist aber technisch aufwändig und daher teuer. Zusätzlich kann es aufgrund der Streustrahlung unter Umständen zu einer Verringerung der Datenqualität kommen. [31]

Abbildung 11 zeigt ein aufbereitetes Bild eines 3D-ICT Scans. Durch die Auswertungssoftware sind Einschlüsse und Materialfehler leicht zu lokalisieren und farblich hervorzuheben.

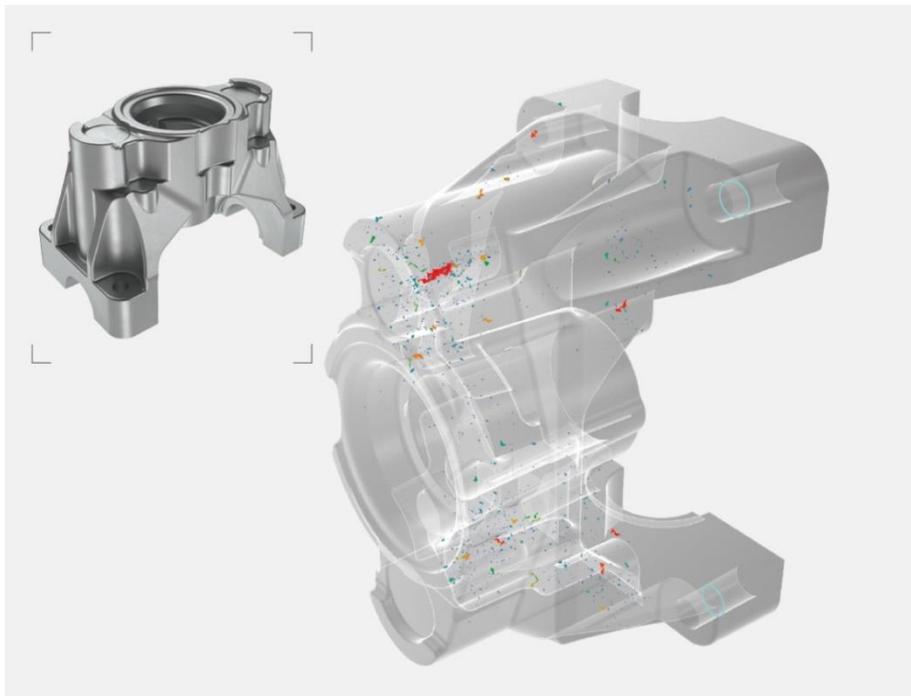


Abbildung 11: Dreidimensionales ICT-Bild eines Leichtmetallbauteils [32]

Neben der dreidimensionalen ICT gibt es noch die zweidimensionale und Helix-ICT sowie die Laminographie. Das Grundprinzip ist das gleiche, sie werden aber bei unterschiedlichen Objektgrößen und Scananforderungen eingesetzt.

3.2.2 Digitale Volumentomographie

In der Industrie kommt diese Technologie als kontaktloses strahlungsdurchdringendes 3D Scanverfahren zwar eher selten zum Einsatz, sie soll an dieser Stelle aber dennoch kurz Erwähnung finden, da sie heutzutage vor allem in der modernen Zahnheilkunde nicht mehr weg zu denken ist.

Diese Technologie funktioniert ähnlich wie die ICT. Zum Unterschied wird aber mittels vieler Querschnittsbilder eine Pixelwolke aufgenommen anhand welcher das dreidimensionale Bild erzeugt wird. Die Unterschiede zur ICT sind:

- Das Röntgenstrahlbündel ist kegelförmig. Es ist nur ein Durchgang notwendig, um alle benötigten Schichten für die Errechnung der dreidimensionalen Darstellung zu erfassen.
- Die Aufnahme besteht aus einer Pixelwolke mit definierten Rauminhalt – daher spricht man oft von Voxel anstatt von Pixel
- Die Darstellung ist detailreicher
- weniger Röntgenstrahlung ist nötig

[33]

Durch den Einsatz der digitalen Volumentomographie kann die individuelle Anatomie des Patienten detailliert in ein virtuelles dreidimensionales Modell überführt werden. Der Scan erfolgt in einer sehr kurzen Zeitspanne und liefert ein detailliertes Bild des Kiefers. [34]

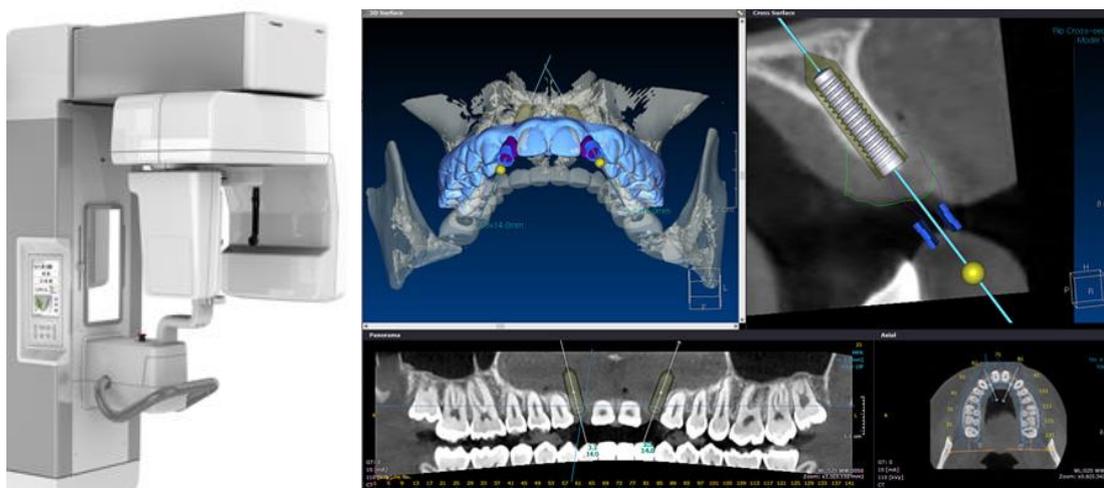


Abbildung 12: DVT Gerät und 3D Darstellung nach dem Scan [35]

Wie in Abbildung 12 ersichtlich, ist die Aufnahmequalität sehr hoch. Mit Hilfe des Modells kann vom Arzt eine bessere Diagnose gestellt und zum Beispiel die Prothetik in der Implantologie vorab am Computer geplant, angepasst und konstruiert werden. [34]

3.3 Kontaktlose strahlenreflektierende Technologien

Optische 3D-Scanner teilen sich mehrere Merkmale mit Kameras. Wie die meisten Kameras haben sie ein kegelähnliches Sichtfeld und wie Kameras können sie nur Informationen über Oberflächen sammeln, die nicht verdeckt sind. Der wesentliche Unterschied zu herkömmlichen Kameras besteht aber darin, dass eine Kamera nur Farbinformationen von Oberflächen in ihrem Sichtfeld sammelt, ein 3D-Scanner auf Basis kontaktloser strahlenreflektierender Technologie jedoch zusätzlich Abstandsinformationen. Das von einem optischen 3D-Scanner erzeugte "Bild" beschreibt daher den Abstand zu einer Oberfläche an jedem Punkt des Bildes. Dadurch kann die dreidimensionale Position jedes Punktes im Bild identifiziert werden. Wenn an jedem Punkt zusätzlich Farbinformationen gesammelt werden, können auch die Farben auf der Oberfläche des Motivs bestimmt werden.

Im Allgemeinen führt eine einzige Aufnahme zu keinem vollständigen virtuellen Modell des Gegenstandes. Mehrere Aufnahmen aus verschiedenen Richtungen sind in der Regel erforderlich, um Informationen über alle Seiten des Gegenstandes zu erhalten. Diese Scans müssen in ein gemeinsames Referenzsystem gebracht werden welches üblicherweise als Ausrichtung oder Registrierung bezeichnet wird um dann zu einem kompletten virtuellen Modell zusammengeführt zu werden.

Triangulation

Viele kontaktlose strahlenreflektierende Technologien beruhen auf dem Prinzip der Triangulation. Dabei unterscheidet man zwischen passiver und aktiver Triangulation. Die aktive Triangulation mit strukturierter Beleuchtung ist die am häufigsten verwendete Methode zur 3D-Oberflächenerfassung. [36] Um die Basis für ein besseres Verständnis der in diesem Unterkapitel vorgestellten Scan-Technologien zu schaffen, soll dieses Prinzip nun näher erläutert werden.

Um die Koordinaten eines Punktes im Raum zu bestimmen, kann der sogenannte räumliche Vorwärtsschnitt angewendet werden. Hierzu müssen die allgemeine Position und Orientierung der Kamera und der Beleuchtungseinheit im Raum bekannt sein. [37]

In Abbildung 13 ist eine schematische Skizze der Messanordnung dargestellt. Zu erkennen ist der zu erfassende Punkt P mit den gesuchten Koordinaten X, Y, Z. Der Punkt A stellt die Position der Kamera und der Punkt B die Position der Beleuchtungseinheit dar.

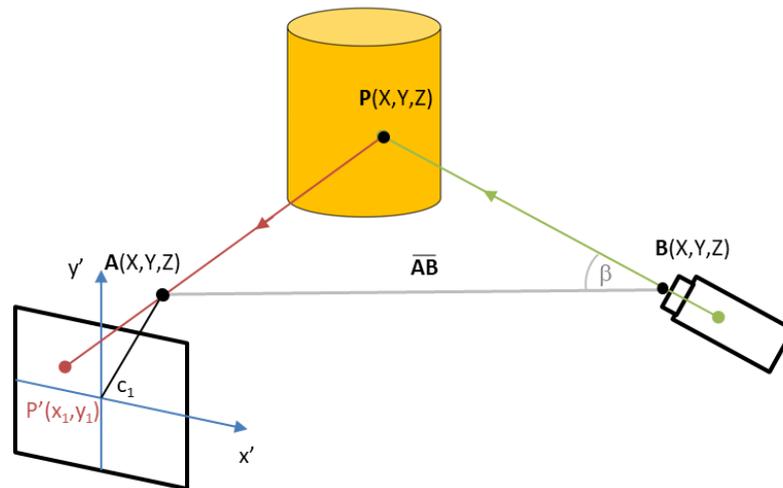


Abbildung 13: Schematische Skizze zum Prinzip der aktiven Triangulation

Die Beleuchtungseinheit projiziert einen definierten Lichtpunkt auf das Objekt welches von einer sogenannten CCD Kamera erfasst wird. Der erfasste Punkt P' kann in der Bildebene der Kamera gemessen werden wodurch man dessen Koordinaten (x_1, y_1) kennt. Anhand dieser Koordinaten sowie der Kenntnis der Distanz AB und des Winkels des Lichtstrahls kann der Abstand zum Messpunkt einfach berechnet werden.

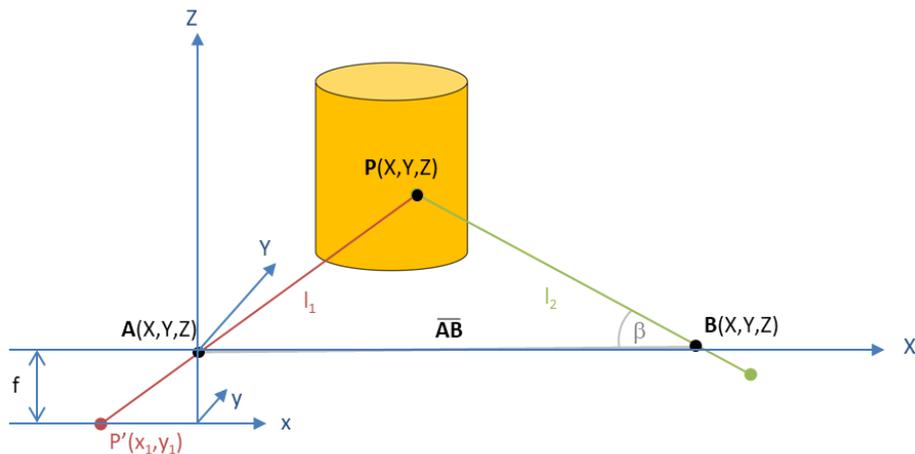


Abbildung 14: Prinzipdarstellung zur Berechnung der Koordinaten des Punktes P

Über einen trigonometrischen Ansatz erhält man für den Punkt P die folgenden drei Koordinaten:

$$X = \frac{\overline{AB} \tan \beta}{x_1 \tan \beta + f} * x_1 \quad Y = \frac{\overline{AB} \tan \beta}{y_1 \tan \beta + f} * y_1 \quad Z = \frac{\overline{AB} \tan \beta}{x_1 \tan \beta + f} * f$$

Die Abstände l_1 (AP) und l_2 (BP) ergeben sich mit Hilfe vom Pythagoras zu

$$l_1 = \sqrt{\left(\frac{\overline{AB} \tan \beta}{x_1 \tan \beta + f} * x_1\right)^2 + \left(\frac{\overline{AB} \tan \beta}{y_1 \tan \beta + f} * y_1\right)^2}$$

$$l_2 = \sqrt{\left(\overline{AB} - \frac{\overline{AB} \tan \beta}{x_1 \tan \beta + f} * x_1\right)^2 + \left(\frac{\overline{AB} \tan \beta}{y_1 \tan \beta + f} * y_1\right)^2}$$

wodurch der Abstand des Punktes zur Kamera beziehungsweise zur Beleuchtungseinheit eindeutig bestimmt ist.

Für den 3D Scan werden so viele Messpunkte wie möglich in das gemeinsames Referenzsystem X, Y, Z gebracht und die Punktwolke des Objektes erzeugt.

3.3.1 Streifenprojektion

Bei der Streifenprojektion wirft ein digitaler Licht-Projektor ein Muster aus hellen und dunklen Streifen auf das Objekt, welches mit einer CCD-Kamera nach dem Prinzip des aktiven Triangulationsverfahrens aufgezeichnet wird. Um am Ende eine hohe Auflösung zu erreichen besteht die Anforderung an den Projektor darin, dass man die Intensität eines jeden einzelnen Bildpunktes individuell anpassen und steuern kann. Texas Instruments hat hierzu die sogenannte DLP Technik (digital light processing) entwickelt und als Marke registriert. [38] Bei dieser Technik wird ein digitales Bild auf einen Lichtstrahl aufmoduliert. Dabei wird über eine rechteckige Anordnung von beweglichen Mikrosiegeln der Lichtstrahl in Bildpunkte zerlegt und dann pixelweise entweder in den Projektionsweg hinein oder aus dem Projektionsweg hinaus reflektiert.

Dies wird durch eine Kamera aufgenommen, die den namensgebenden CCD-Sensor (charge-coupled device) verbaut hat, welcher auf dem inneren Photoeffekt beruht und das aufgenommene Licht und dessen Intensität in ein elektrisches Signal umwandelt.

Hierzu wird die Kamera unter einem definierten Winkel zur Projektionsachse geneigt angebracht (Abbildung 15). Um Zeit zu sparen werden für kommerzielle Zwecke in der Regel oft auch zwei Kameras benutzt.

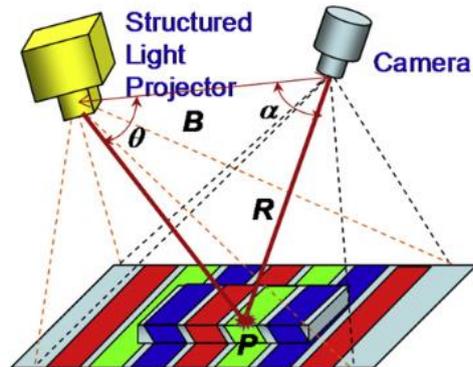


Abbildung 15: Schematischer Aufbau der Streifenprojektion [12]

Für die Zuordnung zwischen einzelnen Punkten des Messobjekts und den Raumkoordinaten müssen die hell-dunkel strukturierten Lichtstreifen jedoch kodiert werden. Die einfachste Methode ist die Verwendung von sogenannten Gray-Codes die in Abbildung 16 dargestellt ist. Die von Frank Gray 1953 patentierten Codes beruhen auf dem Prinzip der Verwendung von n-stelligen Binärcodes. [39] Dabei werden Streifenmuster zeitlich nacheinander projiziert die sich in der Breite jeweils halbieren. Der aufeinanderfolgende Code unterscheidet sich so vom vorhergehenden nur um ein Bit, was den Vorteil hat, dass Dekodierfehler stark reduziert werden. Vor allem bei geneigten Bereichen der Objekte bringt dies eine Robustheit bei der Aufnahme. Der Lichtstreifen wird sodann als Koordinate im Projektor gekennzeichnet, was im einfachsten Fall zur Digitalisierung ausreicht.

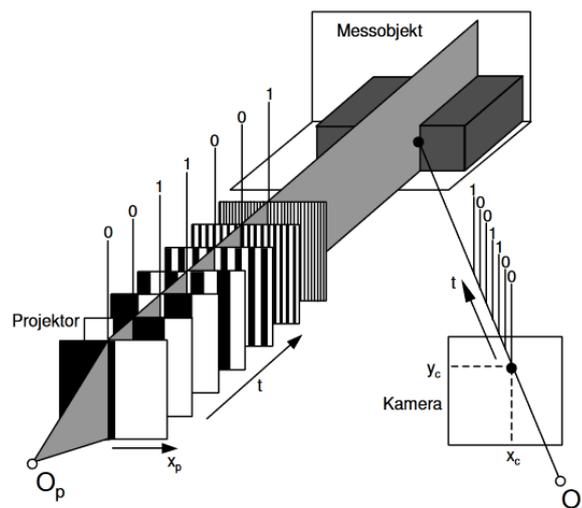


Abbildung 16: Schematische Darstellung der räumlich-zeitlichen Gray-Kodierung [40]

Will man jedoch eine höhere Auflösung beziehungsweise Genauigkeit erreichen, realisiert man die Codierung durch die Überlagerung eines Cosinus-förmigen Intensitätsprofils nach

dem Prinzip des Phasenschiebeverfahrens aus der Interferometrie (siehe Abbildung 17 [43]). [41] Man erhält dann die Bildaufzeichnung einer gefalteten („wrapped“) Phasenkarte, die sich mit Hilfe geeigneter Algorithmen beim „Phase-Unwrapping“ wiederum in die Topographie zurückrechnen lässt.

Physikalisch betrachtet ist dies möglich, da die Kamera auf jeden Fall ein gekrümmtes Streifenmuster erkennt und nicht zwischen einem wellen-optischen beziehungsweise geometrisch-optischen Ursprung unterscheidet.

Als Ansatz für die Berechnung wird daher die allgemeine Grundgleichung der Intensitätsverteilung aus der Wellenoptik herangezogen.

$$I(x, y) = I_0(x, y)[1 + V(x, y) \cos \phi(x, y)] \quad [12]$$

$I_0(x, y)$ beschreibt hierbei die Hintergrundintensität bei der Aufnahme. Bei heller Umgebung ist sie hoch und somit für eine gute Aufnahme nicht optimal. Daher werden Messungen nahezu immer in abgedunkelten Räumen durchgeführt. $V(x, y)$ beschreibt die Amplitude der Welle und somit den Kontrast der Aufnahme. Um eine optimale Digitalisierung zu erreichen wird eine gut ausgebildete Amplitude benötigt um einen guten Kontrast zu gewährleisten.

Für die Umrechnung der gefalteten Phasenkarte in die Topographie benötigt man die Information welche im Phasenwinkel $\cos \phi(x, y)$ steckt. [42]

Mathematisch gesehen handelt es sich um ein Gleichungssystem mit drei Unbekannten. Um dieses zu lösen, bildet man ein überbestimmtes Gleichungssystem mit vier Gleichungen. Dies wird dadurch realisiert, dass man vier Wellen projiziert welche um 90° Phasenverschoben werden. [42]

$$I_1(x, y) = I_0(x, y)[1 + V(x, y) \cos \phi(x, y)]$$

$$I_2(x, y) = I_0(x, y)[1 + V(x, y) \cos \phi(x, y) + 90^\circ]$$

$$I_3(x, y) = I_0(x, y)[1 + V(x, y) \cos \phi(x, y) + 180^\circ]$$

$$I_4(x, y) = I_0(x, y)[1 + V(x, y) \cos \phi(x, y) + 270^\circ]$$

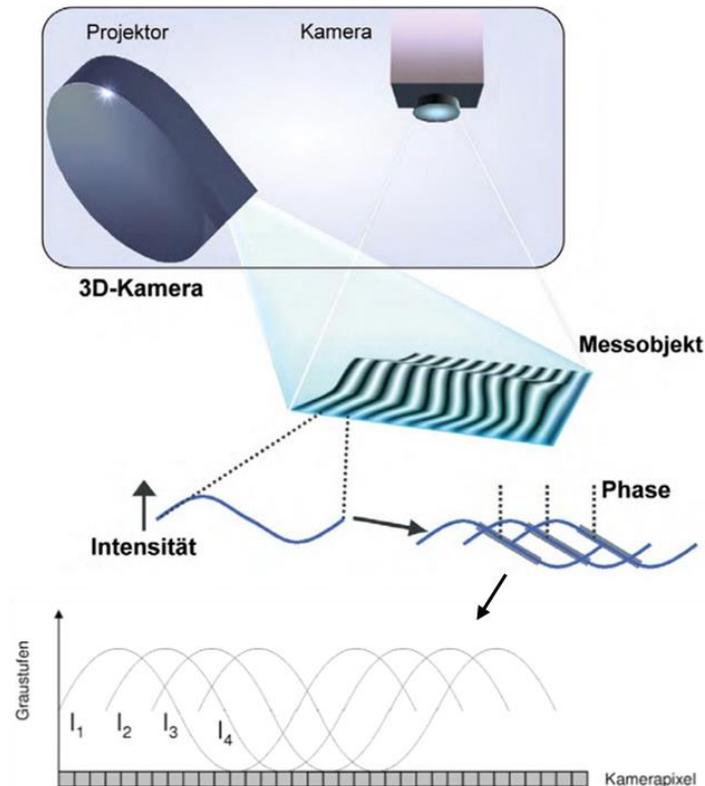


Abbildung 17: Cosinus-förmiges Intensitätsprofil nach dem Phasenschiebeverfahren

Dabei können die Amplituden eingestellt und die Intensitäten gemessen werden. Dies erlaubt eine Umrechnung auf die Phasen- beziehungsweise Profilhöheninformation im jeweiligen Bildpunkt durch Anwendung der folgenden Umrechnungsformel. [42]

$$\tan \Phi = - \frac{I_2(x, y) - I_4(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}$$

Hierdurch enthalten jegliche Änderungen in der Streifendichte und in der Streifenform dann die Informationen über die 3D-Gestalt des untersuchten Objektes. Um ein detailgetreues Ergebnis zu bekommen ist die Berechnung der Koordinaten äußerst wichtig was eine präzise Kalibrierung nötig macht.

Streifenprojektionsverfahren werden vermehrt in der Industrie beim Reverse Engineering angewendet. In der Automobil- und Flugzeugindustrie werden sie vor allem zur Formkontrolle von Werkstücken und Werkzeugen eingesetzt, da diese Technologie eine hohe Leistungsfähigkeit, hohe Zuverlässigkeit und sehr hohe Aufnahmegeschwindigkeit besitzt.

Abbildung 18 stellt die 3D Digitalisierung einer Büste mittels Streifenprojektion dar. Dabei sind in den ersten beiden Bildern die unterschiedlichen Streifenbreiten beim Scanvorgang erkennbar. Das Bild rechts zeigt das 3D Modell nach der Rekonstruktion der Messpunktwolke.

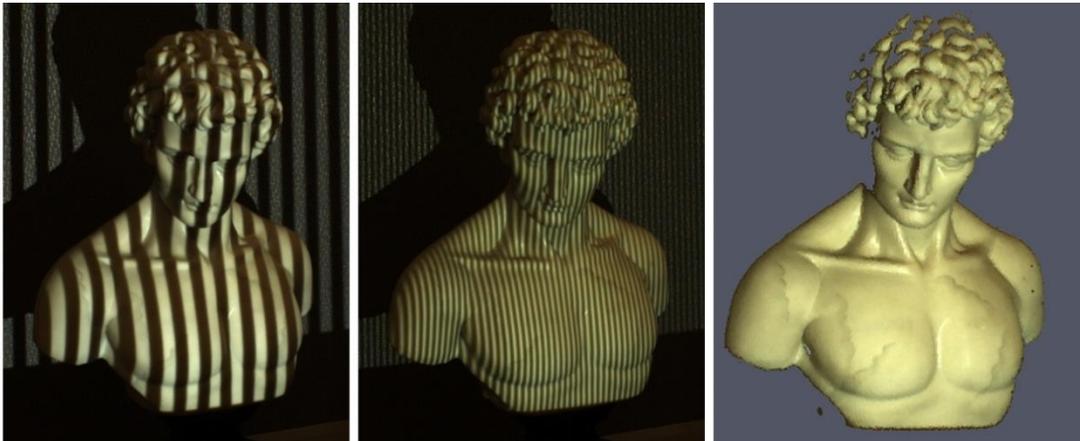


Abbildung 18: 3D Digitalisierung mittels Streifenprojektion [43]

3.3.2 Photogrammetrie

Photogrammetrie ist der Prozess der Erstellung eines digitalen dreidimensionalen Modells auf Basis mehrerer Fotos des ursprünglichen realen Objekts mit Hilfe einer Spezialkamera. Mathematische Grundlage für photogrammetrische Anwendungen ist das Prinzip der Zentralprojektion in Kombination mit (passiver) Triangulation. Passiv, da kein Licht-Projektor sondern das Umgebungslicht verwendet wird. [37]

Die Zentralprojektion kann mit Hilfe einer Lochkamera am einfachsten erläutert werden. Dabei soll in Abbildung 19 auf der linken Seite die graue Box eine Lochkamera darstellen. Das Projektionszentrum O stellt ein idealerweise unendlich kleines Loch dar, durch welches alle einfallenden Strahlen zentral hindurchgehen. Dadurch ergibt sich, dass der Objektpunkt P , Projektionszentrum O und Bildpunkt P' alle auf einer Geraden liegen. [37]

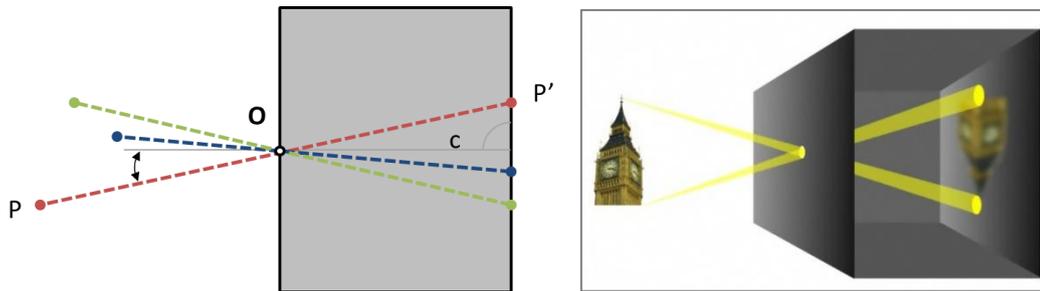


Abbildung 19: links: Prinzipskizze einer Lochkamera; rechts: Funktionsbeispiel [44]

Hierdurch erhält man eine zweidimensionale Abbildung eines dreidimensionalen Objekts. Der Bildpunkt P' kann durch Spezialkameras in der Projektionsebene durch x' - und y' -Koordinaten bestimmt werden. Der wichtigste Parameter dieser internen Orientierung ist dabei der Hauptabstand c , welcher den Abstand zwischen Projektionszentrum und Projektionsebene definiert.

Die entscheidendste Eigenschaft bei der Auflösung von Bilddetails sowie der photogrammetrischen Messgenauigkeit ist der Bildmaßstab beziehungsweise die Bildskala. Der Fotoskalierungsfaktor m definiert die Beziehung zwischen der Objektentfernung h und dem Hauptabstand c . [37]

$$m = \frac{h}{c}$$

Er ist deshalb so wichtig, da jeder Messfehler im Bild im Objektraum mit dem Skalierungsfaktor multipliziert wird. In der Regel wird ein Durchschnittswert angegeben, da die Bildskala bei komplexen Objekten variiert. [45]

Um einen dreidimensionalen Effekt zu erzielen fehlt jedoch die Information über den Abstand des Punktes P zum Projektionszentrum O . Diesen erhält man bei der Photogrammetrie durch mindestens eine zweite Aufnahme des gleichen Punktes aus einer unterschiedlichen Perspektive. [45]

Wenn man mindestens zwei Aufnahmen aus einer unterschiedlichen Perspektive von einem Objektpunkt hat, kann man durch Anwendung der Triangulation die Koordinaten des Punktes im Objektraum berechnen. Abbildung 20 zeigt eine schematische Skizze dieses Vorganges, bei welchem durch Rekonstruktion von Strahlenbündeln Form und Position eines Objektes bestimmt werden. Die Raumrichtung der Strahlenbündel werden durch den Bildpunkt P' zusammen mit dem entsprechenden perspektivischen Zentrum O' ab mindestens zwei Aufnahmen definiert. [45]

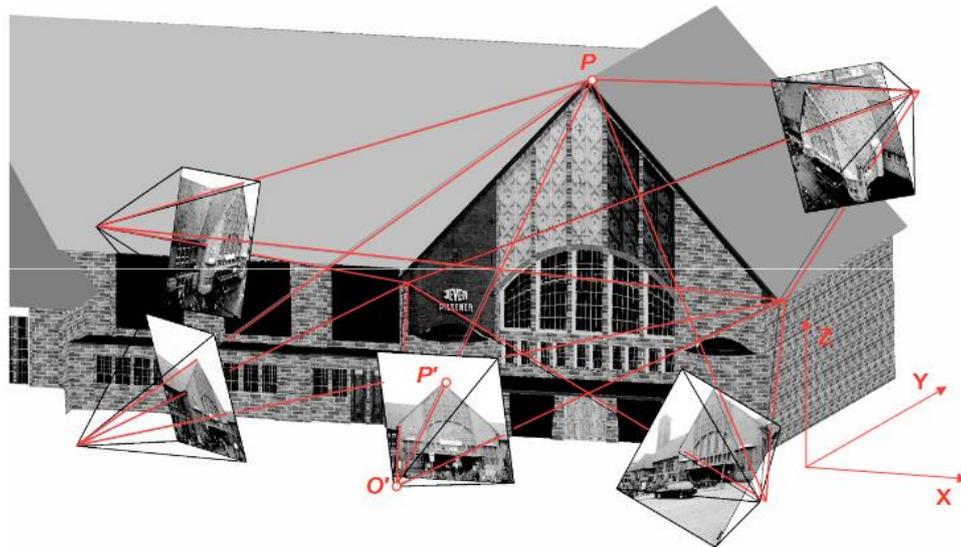


Abbildung 20: Schematische Skizze zum Prinzip der Photogrammetrie [45]

Sofern die Bildpunktkoordinaten des Punktes P' innerhalb der Kamera und die globalen Koordinaten der Kamera im Objektraum bekannt sind, kann jeder Bildstrahl im 3D-Objektraum (X, Y, Z) definiert werden. Die Länge des Richtungsvektors des Bildstrahls ist aber anfangs unbekannt. D.h., dass jeder Objektpunkt, der auf der Linie dieses Vektors liegt, denselben Bildpunkt erzeugt. Erst aus dem Schnittpunkt von mindestens zwei korrespondierenden (homologen), räumlich getrennten Bildstrahlen, kann ein Objektpunkt in drei Dimensionen lokalisiert und mittels Triangulation berechnet werden. [45]

Jede Aufnahme erzeugt ein räumliches Strahlenbündel, welches durch die abgebildeten Punkte und das Projektionszentrum definiert ist. Durch das Schneiden aller Strahlenbündel von mehreren Aufnahmen, wird ein dichtes Netzwerk an Punkten erzeugt. Durch die Berechnung der dreidimensionalen Koordinaten von diesen Punkten in einem gemeinsamen Referenzsystem kann wiederum eine sogenannte Messpunktwolke erzeugt werden, welche die Grundlage für ein 3D Modell darstellt. [45]



Abbildung 21: 3D Digitalisierung mit Hilfe von Photogrammetrie [46]

In Abbildung 21 wird die Digitalisierung einer antiken Skulptur dargestellt. Das entscheidende an dieser Abbildung ist die Darstellung der Position der einzelnen Aufnahmen. Neben der hohen Anzahl an Aufnahmen ist zusätzlich das jeweilige Projektionszentrum angedeutet.

3.3.3 Time-of-flight

Das Grundprinzip der time-of-flight Technologie, kurz TOF, basiert darauf, dass man Distanzen mittels gepulsten Lichts bestimmen kann, wenn es gelingt jene Zeit zu messen die ein Lichtimpuls für die Strecke von der Quelle zum Empfänger benötigt. Da die Geschwindigkeit des Lichts mit $c = 3 * 10^8 \frac{m}{s}$ sehr genau bekannt ist, kann man diese indirekte Abstandsmessung anwenden. [47]

In der praktischen Umsetzung werden Lichtquelle und Empfänger sehr nah zueinander angebracht. Dadurch erhält man eine kompakte Bauweise und man vermeidet Schatteneffekte. Das Grundprinzip eines TOF-Entfernungsmesssystems ist in Abbildung 22 dargestellt. [47]

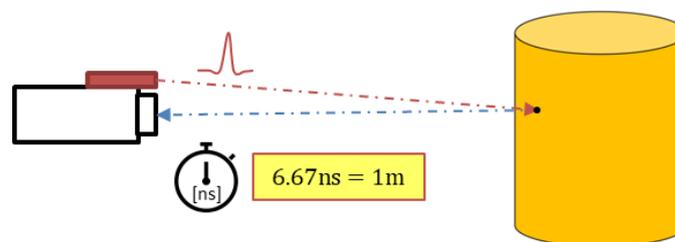


Abbildung 22: Grundprinzip eines TOF-Entfernungsmesssystems

Eine Quelle sendet einen Lichtimpuls aus und startet eine hochpräzise Stoppuhr im Empfänger. Der Lichtimpuls bewegt sich zum Objekt, von welchem er reflektiert wird. Sobald der Lichtimpuls im Empfänger ankommt, wird die Zeitmessung gestoppt. Unter Berücksichtigung, dass der Lichtimpuls die Distanz zweimal zurückgelegt hat, ergibt sich für eine fiktiv gemessene Zeit von 6.67 Nanosekunden eine Distanz von einem Meter. [47]

Eine wesentliche Eigenschaft dieses Aufbaus ist die Tatsache, dass Lichtquelle und Empfänger synchron betrieben werden. Der wesentlichste Vorteil der time-of-flight Technologie im Vergleich zur Triangulation besteht darin, dass die Messung keine ungewollten Dekodierfehler beinhaltet, da Beleuchtungs- und Detektierichtung nahezu kollinear sind und es so zu so gut wie keinen Schatteneffekten kommt. [47]

Es wird aber auch der entscheidende Nachteil mit der hochpräzisen Zeitmessung deutlich. Um eine Entfernungsauflösung von einem Millimeter zu realisieren ist eine Zeitmessgenauigkeit von etwas weniger als sieben Pikosekunden ($1 \text{ ps} = 1 * 10^{-12} \text{ s}$) erforderlich. [47]

Der Betrieb mit gepulstem Licht ist die am häufigsten angewendete Methode zum Betrieb eines TOF-Systems, da die „Flugzeit“ direkt gemessen werden kann. Bei großen Messdistanzen kommt dabei meistens ein Lasersystem zum Einsatz. Der Vorteil ist, dass man mit einem Laser die Möglichkeit hat eine hohe Energiemenge in sehr kurzer Zeit zu übertragen. Der Nachteil und gleichzeitig das limitierende Kriterium für die Anwendung von TOF-Lasermessungen ist die optische Leistung des Lichtimpulses und somit die Sicherheit für das menschliche Auge. [47]

Für kurze Distanzen werden daher meistens alternativ Infrarot-LEDs verwendet. In der Industrie wird diese Technologie meistens beim Kollisionsschutz bei der Roboterautomatisation beziehungsweise Roboter-Mensch-Kollaboration angewandt und sorgt für das sogenannte maschinelle Sehen (machine-vision). [48]

Bei der time-of-flight Technologie besteht die Anforderung an den Empfänger darin, eine hohe Dynamik und Bandbreite zu bieten. Die große Herausforderung ist es nämlich, die Ankunftszeit des zurückgestreuten Lichtimpulses genau zu erfassen, da die optische Dämpfung zu einer Dispersion des Lichtimpulses führt und die Steigung des empfangenen Impulses abflacht, was eine Messungenauigkeiten zur Folge hat. [47]

TOF-Scanner können viel größere Entfernungen messen als Geräte, die auf dem Triangulationsprinzip arbeiten und haben zudem auch jenen Vorteil, dass sie in Echtzeit die Ergebnisse anzeigen können. Auf kurze Distanz ist ihre Genauigkeit aber vergleichsweise viel niedriger und bewegt sich im Bereich von einigen Millimetern. [47]

Eine Anwendung dieser Technologie kommt vermehrt beim dreidimensionalen Scan der Hände für die Gestensteuerung vor. Gestensteuerung kann in vielen Bereichen eingesetzt werden, so z. B. bei der Steuerung von Computerspielen, in der Medizin bei der sterilen zur Verfügung-Stellung von Patienteninformationen oder in der Produktion bei der Roboter-Mensch Kommunikation. Für letzteres scannen TOF-Kameras den Arbeitsbereich in Echtzeit und erkennen die Position und Geste der Hände. [49]



Abbildung 23: Mensch-Roboter Kommunikation mit Hilfe von TOF Kameras [50]

Wie in Abbildung 23 zu sehen, können durch die 3D Erfassung und mit Hilfe von Computersoftware, Roboter die aufgenommenen Gesten in Bewegungen umwandeln.

3D Scanner bestehen aus einer Hardware- und einer Software-Komponente. In diesem Kapitel wurden unterschiedliche Technologien der Hardware-Komponente vorgestellt und deren physikalisches und mathematisches Grundprinzip erläutert. Zusätzlich wurden jeweils Anwendungsgebiete aus der Industrie aufgezeigt.

Um das Verständnis über die Funktionsweise von 3D Scannern weiter zu vertiefen, soll im folgenden Kapitel auf die Prozesskette eingegangen werden, welche beschreibt, wie man von den gescannten Messpunkten zu einem virtuellen Modell und weiter zu Input-Daten für einen 3D Drucker gelangt.

4 Prozesskette

In diesem Kapitel wird die digitale Prozesskette erläutert, welche nach dem Scanvorgang mit der Punktwolke beginnt und beim G-Code für den 3D Druck endet. Es sollen alle markanten Prozessglieder beschrieben und der mathematisch-technisch zu Grunde liegende Ablauf erläutert werden. Zusätzlich soll auf die involvierten Dateiformate eingegangen werden.

4.1 Punktwolke

Es gibt unterschiedliche Technologien zur Erfassung von Daten durch 3D Scanner welche in Kapitel 3 näher erläutert worden sind. Unabhängig von der zu Grunde liegenden Technologie handelt es sich beim 3D Scannen um den Fachbereich der Messtechnik. Das bedeutet, dass versucht wird, die Form und Textur sowie manchmal auch die Farbinformation der Fläche eines Objektes anhand von unzähligen Messpunkten zu erfassen.

Vor allem die berührungslosen Scantechnologien benötigen für einen 360°-Scan des Objekts mehrere Aufnahmen. Dabei geschieht es, dass sich die Aufnahmen natürlich überschneiden und bestimmte, gleiche Messpunkte öfters erfasst werden. Um eine Verzerrung der Aufnahme zu vermeiden und sicherzustellen, dass die Punktwolke nicht aus mehrfach gleichen Punkten besteht, wird sehr häufig der sogenannte ICP-Algorithmus (Iterative Closest Point) angewandt. [51]

Der Algorithmus beginnt mit zwei Punktwolken beziehungsweise zwei Aufnahmen und einer anfänglichen Schätzung für ihre relative Starrkörpertransformation. Die Transformation, welche aus Rotation und Translation besteht wird solange durchgeführt, bis sich die zwei Punktwolken möglichst gut decken. Dazu wird für jeden Punkt aus der einen Punktwolke der jeweils nächste Punkt (closest point) aus der anderen Punktwolke bestimmt. Durch die Bildung der Summe der Quadrate der Abstände über alle Punktpaare, kann man ein Vergleichsmaß über die Übereinstimmung der Punkte berechnen. Der Algorithmus führt die Transformation solange iterativ durch, bis das Vergleichsmaß minimiert und somit die Übereinstimmung der Punkte optimiert ist. Sobald dies geschehen ist, werden die Punkte in einem gemeinsamen Referenz-Koordinatensystem verankert. Dadurch wird es möglich aus mehreren aufgenommenen Punktwolken eine Gesamtpunktwolke zu erzeugen. [52]

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, besteht ein 3D Scanner aus einer Hard- und einer Softwarekomponente. Die Ermittlung der Messpunkte und deren Verankerung im Referenz-Koordinatensystem geschehen bei modernen Geräten in einem Schritt während des Scanvorgangs. Man erhält eine Punktwolke wie sie bereits in Abbildung 3 am Beispiel eines Zahnrades dargestellt wurde und aus mehreren Millionen Einzelpunkten bestehen kann.

In dieser Phase der Prozesskette verfügen die einzelnen Punkte meistens nur Informationen über deren Koordinaten im Referenzsystem. Abhängig von der verwendeten Scantechnologie besteht die Möglichkeit, während der Erfassung der Einzelpunkte entsprechende Farbinformationen mit aufzunehmen und anschließend auszugeben. Die erreichbare Qualität ist jedoch nicht mit einer hochwertigen Fotografie vergleichbar.

Das Ausgabeformat ist in den meisten Fällen das textbasierte ASCII-Format (American Standard Code for Information Interchange). Grund dafür ist, dass ASCII einer der wichtigsten Codierungen für Zeichen ist und als Standard für viele Anwendungsbereiche gilt. Durch die Verwendung dieses Formats wird sichergestellt, dass die Messpunktkoordinaten der Punktwolke von sämtlichen, im Prozess folgenden Programmen „gelesen“ werden können.

4.2 Optimierung der Punktwolke

Abhängig von der verwendeten Scantechnologie kann es auf der einen Seite zu Ausreißern kommen. Diese werden meistens durch Berechnungsfehler beziehungsweise eine Ungenauigkeit des Vergleichsmaßes des ICP-Algorithmus eingebaut. Denn eine Punktwolke, die aus vielen Einzelscans besteht, weist in der Regel eine inhomogene Punktdichte auf. Bereiche, wo sich die Scans überlagern sind dann wesentlich dichter als Randbereiche.

Auf der anderen Seite kann es beim Scan zu Messrauschen kommen. Dabei werden aufgrund von Messfehlern Punkte registriert, die z.B. gar nicht Teil der Objektoberfläche sind. Es kann aber auch vorkommen, dass Punkte beziehungsweise bestimmte Bereiche der Oberfläche gar nicht aufgenommen werden. Bei optischen Scantechnologien kann dies zum Beispiel durch Reflexionen aufgrund glatter Oberflächen entstehen welches den Hauptnachteil dieser Technologien darstellt. Abhilfe leisten hier in den häufigsten Fällen Anti-Glanz-Sprays.

Zusätzlich kann es vorkommen, dass die Punktwolke als Gesamte bereinigt werden muss. Dies ist nötig, wenn die Punktdichte verhältnismäßig (lokal) zu hoch ist. Ist dies der Fall, kann es in der anschließenden Rekonstruktion dadurch an dünnen Stellen zu Löchern oder aber zu Überlappungen von Flächen kommen. Ist die Punktdichte im Gegensatz zu niedrig, müssen lediglich weitere Scans angefertigt werden.

Durch den Einsatz von spezieller Software können solche Bereiche bereinigt werden indem unerwünschte Punkte gelöscht beziehungsweise fehlende Punkte in die Wolke interpoliert werden. Dies hilft die Datenqualität vor der Rekonstruktion zu verbessern.

4.3 Rekonstruktion (Dreiecksvermaschung)

Wenn die Punktwolke bereinigt wurde und die Koordinaten im ASCII-Format vorliegen, werden die Punkte durch Dreiecke verbunden. Dieser Vorgang wird Rekonstruktion beziehungsweise Dreiecksvermaschung genannt. Abbildung 24 zeigt den Schritt von der Punktwolke über die Rekonstruktion zum Flächenmodell.

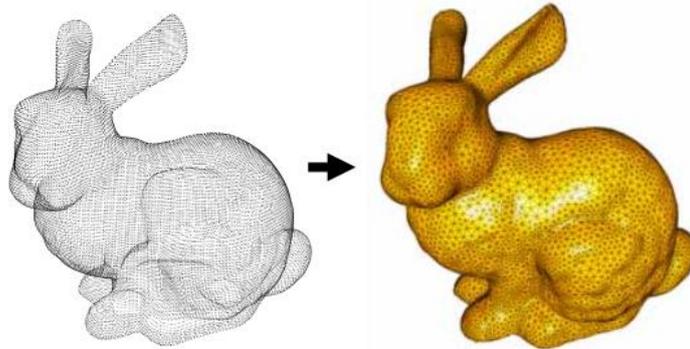


Abbildung 24: von der Punktwolke zum Flächenmodell [53]

Es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Methoden und mathematischen Konzepten für diesen Vorgang. Folgend sollen zwei Methoden vorgestellt werden, die häufig Anwendung finden.

Delaunay-Triangulation

Sie ist eine Methode zur Erstellung eines Dreiecknetzes aus einem Satz von Punkten. Für dieses Verfahren wurden mehrere Algorithmen entwickelt wobei die Laufzeit der Berechnung als Unterscheidungsmerkmal gilt. Das Grundprinzip ist das Gleiche und basiert darauf, dass drei Punkte gesucht werden, welche die Umkreisbedingung erfüllen. Diese besagt, dass innerhalb eines Umkreises durch drei Punkte kein weiterer Punkt liegt (siehe Abbildung 25).

[54]

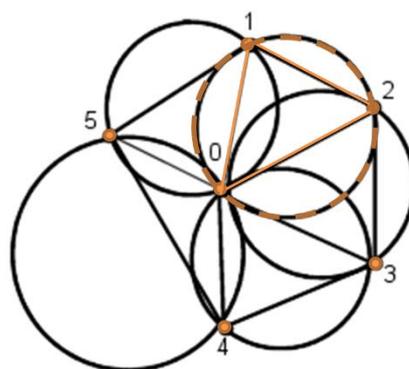


Abbildung 25: Prinzip der Delaunay-Triangulation [55]

Für die dreidimensionale Vernetzung wird anstatt der Umkreisbedingung die analoge Umkugelbedingung verwendet, welche dann aus jeweils vier Punkten einen Tetraeder erzeugt. Das Resultat ist ein Netzwerk aus Dreiecken und noch keine Fläche.

Die Delaunay-Triangulation liefert also ein Netzwerk aus nahezu gleichschenkeligen Dreiecken, die beliebig große Punktmengen einheitlich vernetzen, welche sich nicht überlappen und dessen Eckpunkte (auch Vertices genannt) eindeutig bestimmt sind.

Um eine Fläche aus dem Dreiecksnetzwerk zu generieren, wird anschließend an die Delaunay-Triangulation sehr häufig das Voronoi-Diagramm erzeugt. Das Voronoi-Diagramm besteht aus Zellen beziehungsweise Regionen welche genau ein Zentrum – in diesem Fall genau einen Vertex/ Eckpunkt des Dreiecks – besitzen. Die Grenze einer Zelle beziehungsweise Region wird durch eine Linie gebildet, welche zu zwei Zentren den gleichen Abstand besitzt. [56]

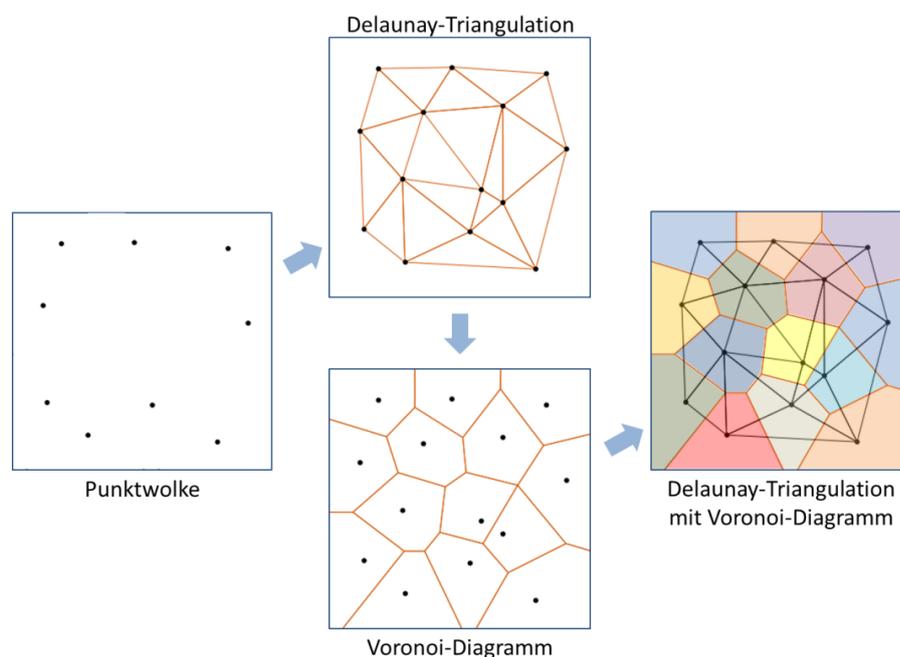


Abbildung 26: Rekonstruktion der Punktwolke zu einem Flächenmodell [57]

In Abbildung 26 sind die Prozessschritte grafisch dargestellt. Man kann sehr gut erkennen, wie man von der Punktwolke über die Delaunay-Triangulation ein Dreiecksnetz erhält. Mit dem Voronoi-Diagramm werden die Zellen beziehungsweise Regionen bestimmt, welche schlussendlich zu einem Polygonflächenmodell führt. Ist eine höhere Genauigkeit (höhere Anzahl an Dreiecken/ Zellen beziehungsweise Regionen) des Modells gewünscht, können lokal oder global die Dreiecke über die Vertices der Voronoi-Zellen mittels erneuter Triangulation erweitert werden.

Auf eine mathematische Beschreibung des komplexen Algorithmus der Triangulation sowie des Diagramms wird in an dieser Stelle der Arbeit verzichtet.

Smart Growing Cells (SGC)

Dies ist eine Methode, die von künstlichen neuronalen Netzen abgeleitet wurde. Künstliche Neuronale Netze (KNN) sind mathematische Modelle die im Bereich der Künstlichen Intelligenz den sogenannten KI-Methoden zugeordnet werden. Das Ziel ist es Vorgänge im Zentralnervensystem von höheren Lebewesen sowie die biologische Informationsverarbeitung und somit die menschliche Intelligenz zu simulieren. Das mathematische Modell basiert daher auf Berechnungseinheiten („Neuronen“) die untereinander verbunden sind. Durch bestimmte Aufgaben wird das Verhalten der einzelnen Neuronen und deren Interaktion miteinander simuliert, wodurch Informationen extrahiert und ein überwachter Lernprozess gestartet wird. [58]

Die Vorteile durch das neurale Netz sind die Lernfähigkeit, Robustheit (geringes Fehlerrauschen), Fehlertoleranz (durch die Netzstruktur können Ausfälle einzelner Neuronen kompensiert werden), Generalisierung (Verknüpfungen innerhalb des Neuronenverbandes werden durch entsprechendes Training so verändert, dass Entscheidungsregeln angepasst werden), hoher Performance (Verarbeitung unendlichen Samplermengen) und qualitativ hochwertiges Ergebnis. [59]

Für die Generierung von SGCs wird ein künstliches neuronales Netzwerk programmiert, welchem durch Beispiele und Trainingsaufgaben beigebracht wird, Punkte einer Punktwolke miteinander zu verknüpfen. Ein solches Training wird in Abbildung 27 dargestellt. Ausgangssituation ist eine Punktwolke aus zwei nicht miteinander verknüpften Objekten. In der ersten Lernphase erzeugt das KNN Vertices welche miteinander verbunden werden. Die Positionierung dieser Vertices ist beim ersten Training noch komplett von der Punktwolke getrennt. [59]

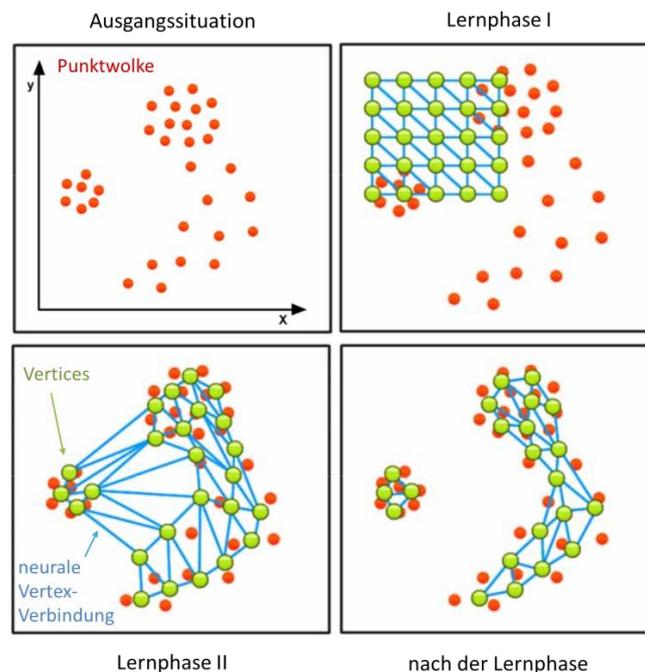


Abbildung 27: Generierung von Smart Growing Cells [53]

Erst durch mehrere „Trainingseinheiten“ wird das KNN leistungsfähiger und lernt die Punktwolke zu erkennen. In der zweiten Lernphase passen sich die Vertices an die Punkte an und rücken näher. Schritt für Schritt wird die gescannte Objektpunktwolke besser und besser in ein virtuelles Polygonflächenmodell umgewandelt (siehe Abbildung 28). [59]

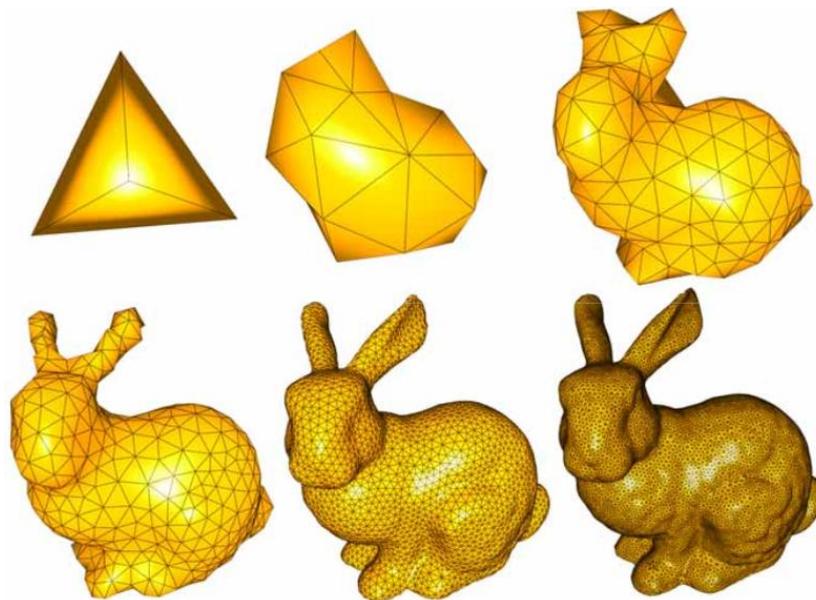
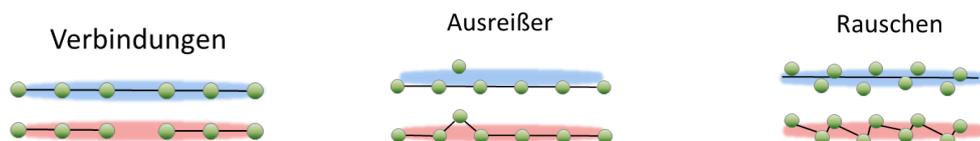


Abbildung 28: Smart Growing Cells am Beispiel eines Hasen [53]

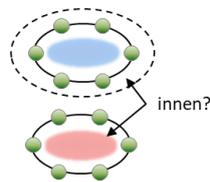
Ist die Lernphase abgeschlossen entsteht eine Dreiecksvermaschung der Punktwolke in kurzer Zeit mit sehr hoher Genauigkeit. Die Oberflächenrekonstruktion mit SGC ermöglicht eine krümmungsabhängige Dreiecksdichte und eine gesonderte Behandlung von Kanten. [53]

Mit beiden vorgestellten Methoden werden Polygonflächenmodelle aus Punktwolken erzeugt. Die Umwandlung geschieht zwar auf unterschiedliche Weise, jedoch sind Input (Punktwolke) und Output (Polygonflächenmodell) bei diesem Schritt gleich.

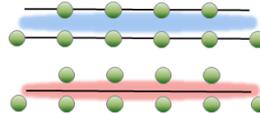
Obwohl beide vorgestellte Methoden qualitativ hochwertige Ergebnisse liefern, treten bei der ersten, aufgrund der statischen Berechnung immer wieder typische Probleme auf:



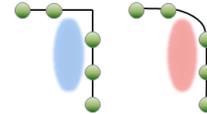
Oberflächentorsion



dünne Struktur



Eigenschaft



Es werden manchmal Verbindungen erzeugt oder ausgelassen, welche nachbearbeitet werden müssen. Werden Ausreißer übersehen, werden diese in der Flächenerzeugung mitberücksichtigt. Dies führt zu Verzerrungen des Objektes und müssen im Anschluss händisch korrigiert werden. Wie bereits erwähnt, werden durch das Messrauschen Punkte verwendet, die gar nicht Teil des Objektes sind. Auch dies führt zu Problemen bei der Genauigkeit der Rekonstruktion. Vor allem bei Ecken und Kanten kommt es häufig zu Fehlinterpretationen. So kommt es häufig vor, dass der Algorithmus die Eigenschaft einer Kante oder Ecke nicht korrekt erkennt und z.B. Rundungen einbaut. Solche Berechnungsfehler können auch zu dünnen Strukturen führen, wo Verbindungsinformationen verloren gehen können. Der markanteste Fehler ist aber die sogenannte Oberflächentorsion. Bei der Erzeugung der Flächensegmente wird immer auch ein Normalvektor zugeordnet. Durch Vorzeichenfehler kommt es vor, dass bestimmte Flächensegmente umgedreht und somit zu Löchern werden. [53]

Da die genannten Fehler häufig auftreten, bietet die unterstützende Software Schnelllösungen an. Punkte und Vertexverbindungen können gelöscht oder hinzugefügt, Eigenschaften definiert und Normalvektoren gedreht beziehungsweise Löcher gefüllt werden. In der Nachbearbeitung ist es möglich die Oberflächen zu glätten indem wieder die Anzahl der Dreiecke (lokal) erhöht wird. [53]

Ausgegeben wird das Flächenmodell meistens im STL- oder OBJ-Dateiformat. Da auf das STL-Dateiformat in Kapitel 4.5 eingegangen wird, soll an dieser Stelle das OBJ-Dateiformat kurz beschrieben werden.

Das OBJ-Dateiformat wurde von Wavefront Technologies für das Advanced Visualizer Package entwickelt. Im Gegenzug zu STL-Dateien können mittels OBJ auch Informationen über Farben, Texturen und Materialien angegeben werden. Diese werden mit Hilfe einer MTL-Datei (Materialbibliothek) an die OBJ-Datei angeheftet. Das OBJ-Dateiformat benutzt das ASCII-Format mit einer einfachen Syntax. Die wichtigsten Abschnitte der OBJ-Dateien enthalten Scheitellinien (Typ V), Texturkoordinaten (Typ VP), Normalkoordinaten (Typ VN) und Flächen (Typ F). [60]

4.4 Flächenrückführung

Um die Modelle für den nächsten Schritt in der Prozesskette vorzubereiten, wird aus dem Polygonflächenmodell ein Flächenmodell erzeugt. Dadurch wird die Modelloberfläche in Freiformflächen umgewandelt und so eine glatte Oberfläche erzeugt. Um Flächenabschnitte

einzuteilen, werden hierzu durch Kontrollpunkte geschwungene Kurven eingeführt, welche eine bestimmte Gewichtung zugeteilt bekommen. Durch die Gewichtung erhalten die einzelnen Kontrollpunkte unterschiedlich starken Einfluss auf den Kurvenverlauf. Basierend auf dem Fachgebiet des Schiffbaus wurde eine mathematische Methode entwickelt um sogenannte B-Splines zu erzeugen. [61] In Erweiterung mit den Bézierkurven¹ (parametrisch modellierte Kurven) wurden die B-Splines zu sogenannten NURBS (Non Uniform Rational B-Splines) verallgemeinert. Damit ist es möglich geschwungene Kurven und Flächen mathematisch zu beschreiben die durch vier Eigenschaften (Grad, Kontrollpunkte, Knoten und Bewertungsregel) definiert sind. [62]

Die Flächenrückführung durch NURBS wie in Abbildung 29 dargestellt, dient als Ausgangspunkt für die weitere Modellierung des dreidimensionalen virtuellen Objekts.

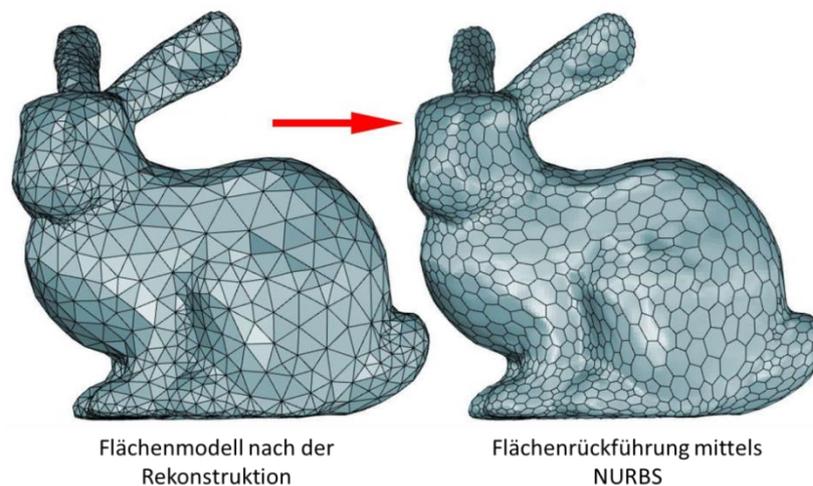


Abbildung 29: Flächenrückführung mittels NURBS [63]

An dieser Stelle wird das Modell im namensgebenden Format gespeichert. NURBS ist eine rechnerinterne, mathematisch korrekte Beschreibung von Kurven und Flächen und kann als solches gespeichert werden.

Ein weiteres verwendbares Dateiformat wäre STEP oder STL. Ersteres kann zusätzliche Informationen wie z.B. Materialeigenschaften oder Toleranzen speichern. Da es in diesem Stadium der Prozesskette solche Informationen noch nicht gibt, reicht als Alternative oft STL auch aus. Das STL-Dateiformat wird beim Export des Volumenmodells im folgenden Unterkapitel beschrieben.

¹ <http://www.mathepedia.de/Bezierkurven.html>, abgerufen am, 8.6.2018

4.5 Volumenmodell

Nachdem das gescannte Objekt nun als NURBS-Modell im IGES-Dateiformat vorliegt, kann daraus mit Hilfe von CAD-Programmen ein Volumenmodell generiert werden. Dazu ist es ganz wichtig, dass das NURBS-Modell „wasserdicht“ ist. Das bedeutet, dass die Flächenstücke alle geschlossen, unterbrechungsfrei und miteinander verbunden sein müssen. [64]

Das Volumenmodell kann nun weiter angepasst werden. Der Prozess der 3D Modellierung endet auf jeden Fall mit einem interaktiven virtuellen Modell des zuvor gescannten Objekts.

Um dieses virtuelle Modell dreidimensional auszudrucken und so eine Kopie des Originalobjektes zu erhalten, wird das Volumenmodell in das STL-Format (nicht eindeutig bestimmt: STereoLithography, Standard Tessellation Language, Surface Tessellation Language) exportiert. [65]

Hierzu werden Punkte an der Oberfläche des Volumenmodells berechnet was eine Rückführung des Modells in eine Punktwolke bewirkt. Das STL-Format erzeugt aus der Punktwolke durch die Anwendung von den namensgebenden Tesselations-Algorithmen ein Dreiecknetz. Jedes Dreieck in diesem Netz besitzt einen Normalvektor welcher den Innen- beziehungsweise Außenraum definiert. Im Gegensatz zum im vorherigen Kapitel vorgestellten Polygonflächenmodell, kann das STL-Format zusätzlich die Volumeninformation speichern. Diese genügt um ein Volumen zu erzeugen, jedoch repräsentiert es kein reines Oberflächen- oder Volumenmodell mehr. [66] Außerdem kommen die meisten Softwareprogramme, 3D-Drucker und andere Maschinen ohne Schwierigkeiten mit diesem Dateityp zurecht.

Das STL-Format wurde vor circa 30 Jahren entwickelt um CAD Daten für die Nutzung für die ersten Stereolithographie-3D-Drucker zu ermöglichen. Der 3D Druck hat sich aber technologisch in dieser Zeitspanne stark weiterentwickelt weshalb das STL Format nicht mehr den aktuellen Anforderungen gerecht werden kann. Vor ungefähr fünf Jahren wurde unter der Federführung von Microsoft das 3MF (3D Manufacturing Format) Dateiformat entwickelt. Mit 3MF können einzelne Objekte referenziert oder verschoben werden, ohne das Mesh zu ändern. Zusätzlich kann man auch Farb-/ Material-/ und andere Informationen zu transportieren, was zurzeit mit STL nicht möglich ist. [60]

4.6 Der Slicer

Der 3D Drucker druckt ein Modell Schicht für Schicht, wofür die STL-Datei in einzelne Layer zerlegt beziehungsweise aufbereitet werden muss. Ein sogenannter Slicer ist eine Software, welche genau diese Aufgabe übernimmt. Diese Software wird meistens beim Kauf eines 3D Druckers mitgeliefert, kann aber auch als Freeware aus dem Internet heruntergeladen werden.

Slicer bieten oftmals die Möglichkeiten den Druck genauer zu konfigurieren. Über Einstellungen lassen sich diverse Parameter bestimmen, wovon die Wichtigsten mitunter Layerhöhe (Düsendurchmesser des Druckers), Druckgeschwindigkeit und Temperatur am Extruderkopf

sind. Abhängig vom 3D Drucker kann die Software auch Stützstrukturen für Überhänge etc. berechnen. Zudem werden die Druckdauer und die benötigte Materialmenge ermittelt.

Ausgegeben wird die Datei als G-Code (manchmal auch DIN-Code genannt). Der G-Code ist ein Maschinencode der aus einer Liste von Befehlen besteht, welcher mit dem Buchstaben G beginnt und von einer Zahl gefolgt wird (z.B. G41: Werkzeugbahnkorrektur in Vorschubrichtung links). Über diese Befehle können die Achsen an bestimmte Positionen bewegt und Maschinenkonfigurationen übertragen werden. [67]

Mit Abschluss dieses Kapitels ist nun die theoretische Grundlage erarbeitet, auf Basis welcher ein virtueller Prototyp eines 3D Scanners für die Fertigung in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 dimensioniert und konstruiert werden kann. Die Aufgabe ist es nun, die geeignetste Scan-Technologie für den vorgegebenen Anwendungsfall zu finden.

5 Virtuelles Modell des 3D Scanners

In diesem Kapitel wird anfangs kurz der 3D Drucker vorgestellt um die Kriterien zur Auswahl der geeignetsten Scan-Technologie besser definieren zu können. Die Kriterien bilden die Grundlage um die im vorherigen Kapitel vorgestellten Technologien qualitativ gegenüber stellen zu können und die geeignetste für den Anwendungsfall zu bestimmen. Nach den Kriterien wird auf die Konstruktion des 3D Scanners eingegangen und das virtuelle Modell erläutert. Neben den mechanischen Komponenten wird ebenfalls genauer auf die verwendeten Elektronikkomponenten eingegangen.

5.1 Der 3D Drucker der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0

An der TU Wien wurde am Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik im Jahr 2015 unter der Leitung von Herrn Prof. Gerhard im Forschungsbereich Maschinenbauinformatik und Virtuelle Produktentwicklung der Auftrag zur Dimensionierung, Konstruktion und Bau eines 3D Druckers für die Produktion in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4 in Auftrag gegeben. Hierzu wurden Studenten mit herausragender Studienleistung rekrutiert um den Drucker auf Basis der „Fused Deposition Modeling“ – Technologie zu realisieren. Bei der FDM-Technologie wird das Filament – ein Kunststoffdraht – durch einen Extruder über den Schmelzpunkt erhitzt und mit Hilfe eines Motors durch eine Düse auf das Druckbett gedrückt. Abbildung 30 stellt die Version 2.5 des Druckers dar. Nicht zu sehen sind die Riemen, die Verkabelung sowie das Filament.

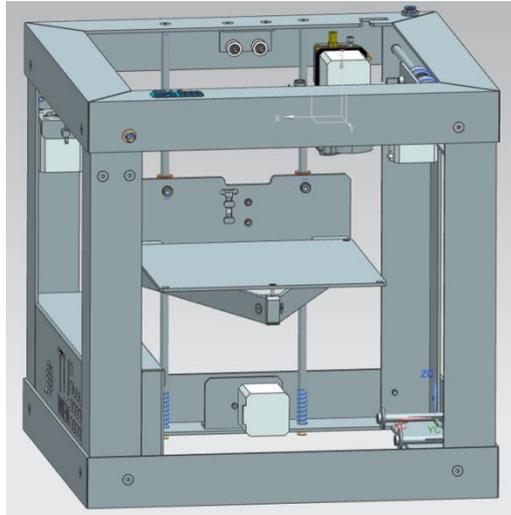


Abbildung 30: der 3D Drucker der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0

Die Rahmenkonstruktion sowie die Elektronikbox sollen weiterhin erhalten werden. Dadurch ergibt sich eine konstruktive Vorgabe, welche bei der Wahl einer geeigneten Scantechnologie mitberücksichtigt werden muss.

5.2 Definition der Kriterien und Auswahl

Um eine Auswahl über die geeignete Scan-Technologie zu fällen, müssen vorab Kriterien definiert werden um eine qualitative Entscheidung treffen zu können.

Um die folgenden Kriterien quantifizieren zu können, wird eine Werteskala von 1 bis 10 eingeführt. Dabei bedeutet 1...niedrig/ schlecht, 5...mittel/ gut und 10...hoch/ sehr gut. Alle anderen Werte dazwischen, helfen für die Feinunterscheidung.

Scangenaugigkeit

Das Hauptkriterium beim 3D Scan ist die Genauigkeit der Aufnahme gemessen in Längeneinheiten. Dabei muss die Genauigkeit mindestens dem Durchmesser der Düse des 3D Druckers entsprechen, welche die minimale Layerhöhe beim Drucken bestimmt.

Der Wert 10 entspricht hier einer sehr hohen Genauigkeit mit Werten im Mikrometer-Bereich.

Scangeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit, wie schnell Messpunkte von einem Objekt im Referenzkoordinatensystem platziert werden, ist ein wichtiges Kriterium. Eine schnelle Scangeschwindigkeit ist wichtig um den gesamten Digitalisierungsprozess kurz zu halten.

Der Wert 10 entspricht hier einer sehr hohen Scangeschwindigkeit im Bereich der Echtzeitaufnahme.

Abstand von der Scaneinheit zum Objekt

Jede Scantechnologie hat unterschiedliche Mindest- und Maximalabstände zum Messobjekt um eine zufriedenstellende Genauigkeit der Aufnahme zu gewährleisten. Während manche Technologien auf Flugzeugen montiert werden um ganze Landstriche zu scannen, sind andere Technologien für den Mikrometerbereich ausgelegt.

Der Wert 10 entspricht hier einem Abstand (Abstandsbereich), welcher durch die konstruktive Vorgabe realisiert werden kann.

Objektgröße

Jede Scantechnologie kann unterschiedlich große Objekte scannen. Während manche Technologien in der Lage sind ganze Landstriche aufzunehmen, können andere nur sehr kleine Objekte scannen. Die zu Objektgröße ist hier primär und kann einen Bereich von ein paar Millimetern bis zu mehreren Zentimetern betragen.

Der Wert 10 wird für Technologien vergeben, welche für Objekte im konstruktiven Rahmen zufriedenstellende 3D Erfassung gewährleisten können.

Baugröße der Scaneinheit

Aufgrund der Vorgabe, dass die 3D Scan-Einheit in der Rahmenkonstruktion des 3D Druckers Platz finden soll, ist dies ein limitierendes Kriterium, da der Abstand vom Objekt-Bauraum und Rahmen konstruktiv begrenzt ist.

Der Wert 10 entspricht hier einem Abstand (Abstandsbereich), welcher durch die konstruktive Vorgabe realisiert werden kann.

Gegenüberstellung

Abbildung 31 zeigt die Gegenüberstellung der Scantechnologien anhand der beschriebenen Kriterien.

Um die Kriterien auch gegeneinander besser abzugrenzen, wurde eine Gewichtung eingeführt. Dabei kommt der Scangeschwindigkeit und der Scangenauigkeit eine wesentlich höhere Bedeutung zu als den restlichen Kriterien.

	Scangenaugigkeit	Scangeschwindigkeit	Abstand von der Scaneinheit zum Objekt	Objektgröße	Baugröße der Scaneinheit	Gesamt
	30%	30%	15%	15%	10%	100%
Koordinatenmessgerät	10	1	1	9	1	4,9
Industrielle Computertomographie	9	9	5	9	1	7,6
Digitale Volumentomographie	9	9	5	9	3	7,8
Streifenprojektion	8	8	8	10	9	8,4
Photogrammetrie	9	7	10	10	10	8,8
Time-of-flight	6	10	9	9	8	8,3

Abbildung 31: Gegenüberstellung und Bewertung der Scantechnologien

Koordinatenmessgerät: Die Scangenaugigkeit ist sehr hoch, da es aufgrund des geführten Messarms zu keinen Streuungen bei der Messung kommen kann. Zusätzlich kann die Verwendung von unterschiedlichen Tast-Kugeln die Genauigkeit erhöhen. Die Scangeschwindigkeit ist jedoch extrem langsam, da jeder Messpunkt einzeln aufgenommen wird. Dies macht einen vollumfänglichen Scan in einer akzeptablen Zeit nicht realistisch. Objekte in dem geforderten Bereich können problemlos aufgenommen werden. Die Baugröße des Koordinatenmessgeräts und die vorgegebene Rahmenkonstruktion ergeben keine sinnvolle Kombination.

Industrielle Computertomographie: Die Genauigkeit bei dieser Technologie ist sehr gut. Es kann lediglich bei der Erzeugung beziehungsweise bei der Erfassung der Strahlung zu Ungenauigkeiten kommen. Die Geschwindigkeit der zu erfassenden Messpunkte ist ziemlich hoch und kann meist mit einem 360°-Scan abgeschlossen werden. Objekte von wenigen Millimetern bis mehreren Metern sind scan-bar und nur von der Baugröße der ICTs abhängig. ICTs bestehen meist aus mehreren komplexen Baugruppen und aufgrund der Verwendung von Röntgenstrahlung sind zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen zu treffen.

Digitale Volumentomographie: Sie hat nahezu die gleiche Bewertung wie die zuvor beschriebene ICT. Alleine bei der Baugröße kann aufgrund der unterschiedlichen Art der Röntgenstrahlen-Detektion ein etwas höherer Wert vergeben werden. Aber auch hierfür werden zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen benötigt.

Streifenprojektion: Die Streifenprojektion ist ein optisches Verfahren und die Genauigkeit hängt von der Auflösung der Kamera ab. Unter optimalen Bedingungen kann die Scangeschwindigkeit so hoch sein, dass die Objektoberfläche in nahezu Echtzeit gescannt und dreidimensional dargestellt werden kann. Jedoch sinkt die Scangeschwindigkeit zunehmend mit der Abweichung von diesen optimalen Bedingungen. Diese Technologie benötigt einen Mindestabstand von einigen Zentimetern zum zu scannenden Objekt. Dies führt beim vorgege-

benen Bauraum zu Abschlägen bei der Bewertung. Aufgrund der unterschiedlichen Streifen, welche projiziert werden, können aber Objekte im geforderten Größenbereich problemlos gescannt werden. Die Technologie kommt mit einem Projektor und mindestens einer Kamera aus, welche in Modulbauweise kompakt ausgeführt werden können.

Photogrammetrie: Die Scangenaugigkeit hängt bei dieser Technologie nur von der Auflösung der verwendeten Kamera ab. Die Scandauer ergibt sich dadurch, wie lange man benötigt eine bestimmte Anzahl an (HD-)Aufnahmen zu erstellen. Diese lässt sich durch den Einsatz mehrerer Kameras erhöhen. Der Abstand zum Objekt ist nur dadurch vorgegeben, dass das zu scannende Objekt als Ganzes abgelichtet ist. Daher ist es mit dieser Technologie möglich, sämtliche Objektgrößen zu scannen. Die Baugröße der Photogrammetrie-Scantechnologie bezieht sich auf die Größe der verwendeten Kamer. Wird ein reines Kameramodul verwendet, kann sich die Baugröße auf einige Millimeter reduzieren.

Time-of-flight: Aufgrund von Messungenauigkeiten bei der zeitlichen Erfassung der „Flugzeit“ des Lichts, ist bei dieser Technologie die Scangenaugigkeit nicht so hoch wie bei anderen optischen Scanverfahren. Die Erfassung der Objekte geschieht aber in Echtzeit weshalb diese Technologie gerne für die Machine-Vision eingesetzt wird. Ein Mindestabstand von der Kamera zum Objekt ist hier nötig und es gilt, dass die Genauigkeit mit dem Abstand zunimmt. Das Erfassen von Objekten im geforderten Größenbereich ist ohne weitere Herausforderungen realisierbar. TOF-Kameras gibt es in kompakten Baugrößen, jedoch ist zu bedenken, dass sie im vorgegebenen Rahmen nicht so einfach untergebracht werden können.

Fazit und Auswahl

Unter Berücksichtigung der geforderten Anwendung und definierten Kriterien, stellt sich die Photogrammetrie als geeignetste Scan-Technologie als Basis der Konstruktion eines Prototyps heraus. Die zentrale Hardwarekomponente ist die Kamera, welche als Haupteigenschaften eine kompakte Bauweise, hohe Auflösung und einen Autofokus haben muss. Wird eine Videofunktion unterstützt, soll der fps-Wert (frames per second) berücksichtigt werden.

Aus Sicht der Software, kann hier auf eine Vielzahl an open-source Programmen zurückgegriffen werden. Dies macht eine Implementierung leichter, da man sich nur um die Schnittstellen kümmern muss.

5.3 Mechanische Komponenten

Der Ausgangspunkt für die Konstruktion stellte die reduzierte Version des vorhandenen 3D Druckers dar. Hierzu wurden das Druckbett, der Extruderschlitten mit Extruderkopf, die Führungsstangen und die Antriebe entfernt. Übrig geblieben ist wie in Abbildung 32 zu sehen der Rahmen mit Elektronikbox.

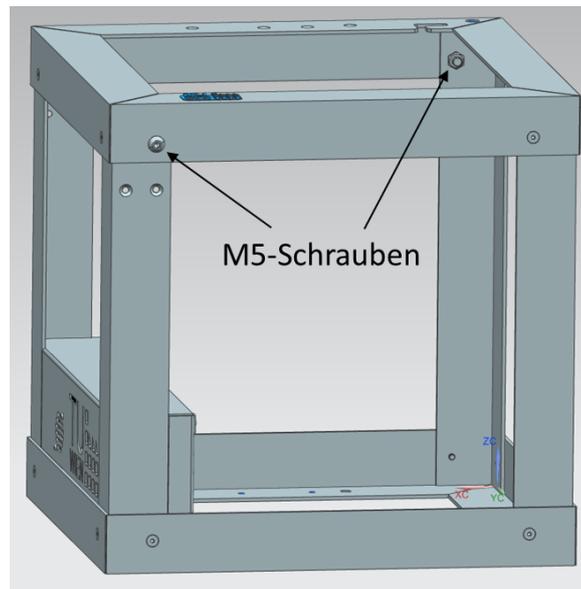


Abbildung 32: Ausgangspunkt für den 3D Scanner

Da die Führungsstangen für den Extruderschleiten entfernt wurden, mussten zwei M5 Schrauben eingesetzt werden um den Rahmen zu stabilisieren.

Bei der Photogrammetrie wird eine hohe Anzahl an Fotos aus unterschiedlichen Perspektiven benötigt. Um diese zu erhalten, hat man grundsätzlich zwei Möglichkeiten, a) man bewegt die Kamera und das Objekt ist ruhend oder b) das Objekt wird bewegt und die Kamera ruht.

Beide Möglichkeiten sind konstruktiv umsetzbar, es stellt sich jedoch die Frage was einen Unterschied ausmacht? Die Mechanik lehrt uns, dass es bei der gedämpften Bewegung (Reibung) von massebehafteten Objekten immer zu Schwingungen kommt. Solche Schwingungen können, wenn sie zu groß werden Einfluss auf die Aufnahme der Fotos haben und diese verzerren. Um dies zu verhindern wäre es möglich auf ein Abklingen der Schwingung zu warten und dann erst die Aufnahme auszulösen. Dies wirkt sich aber auf die Scandauer aus, welche kurz gehalten werden sollte.

Ein weiterer Nachteil, der bei der konstruktiven Planung erkannt wurde ist die Tatsache, dass bei sich drehender Kamera die dazugehörige Verkabelung sich ebenfalls dreht. Wären mehrere Umdrehungen zur Erstellung der Fotos nötig, könnte man im einfachsten Fall nur die Drehrichtung nach 360° umkehren um ein Aufwickeln zu vermeiden.

Wesentlich leichter wird es, wenn man die Kamera fix montiert und sich das Objekt bewegt. Zwar führen hier die bewegten Massen ebenfalls zu Schwingungen, diese sind aber leichter zu beherrschen, da man die Konstruktion der Drehplattform robuster auslegen kann. Ein weiterer Vorteil ist, dass man die gesamte Technik unter dem Objekt verbauen kann was mehr Platz für die Scanobjekte schafft und optisch besser aussieht.

Für die Konstruktion des virtuellen 3D Scanners wurde daher diese Möglichkeit gewählt.

Aluminium U-Profil

Wie in Abbildung 33 zu sehen, wurde ein U-Profil (50 x 50 x 50 x 3 Millimeter) aus Aluminium als Basis-Stützelement gewählt, auf welchem die gesamte Drehplattform aufgebaut werden soll. Die Gesamtlänge beträgt 394 Millimeter was genau den inneren Abstand zwischen den Rahmen-Winkelprofilen ausmacht.

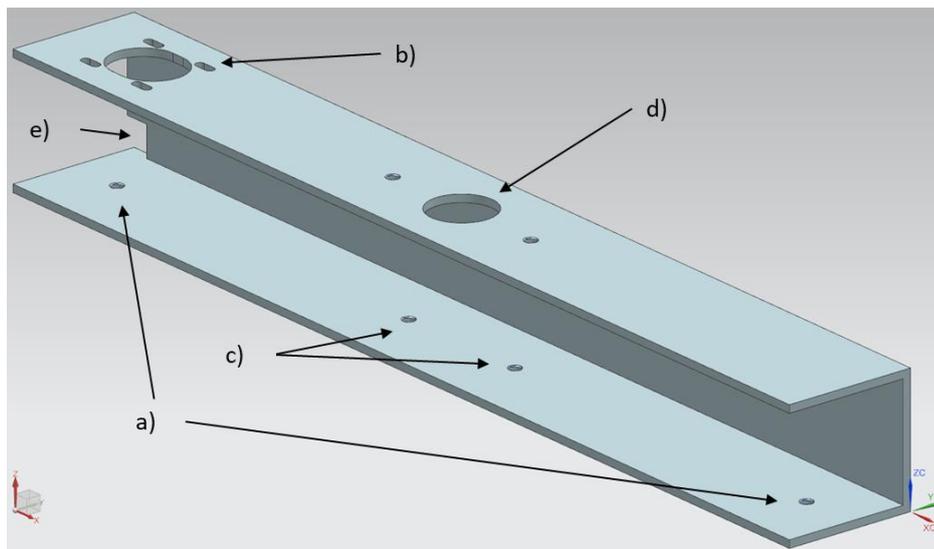


Abbildung 33: Aluminium U-Profil nach der Bearbeitung

Das U-Profil wird mit zwei M5 Senkschrauben von unten an die Rahmenkonstruktion befestigt, wozu zwei Gewindebohrungen (a) gefertigt werden müssen. Im Gegensatz hierzu, müssen auch zwei Löcher mit Senkkopf in den Winkelprofilen der Rahmenkonstruktion gebohrt werden. Der Antrieb der Drehplattform erfolgt über einen Schrittmotor. Um ihn am U-Profil montieren zu können, wurde eine Ausnehmung und vier Langlöcher für die Montageschrauben ausgefräst (b). Durch diese längliche Ausführung der Löcher entsteht die Möglichkeit, dass man den Riemen bei Bedarf um 5 Millimeter nach spannen kann.

Für die Montage der Lagerhalterung, müssen weitere M5 Gewindebohrungen bei (c) und (d) angebracht werden. Bei (d) wird zusätzlich ein zweites, größeres Loch gefertigt um später den Antriebsschaft der Drehplatte durchzuführen.

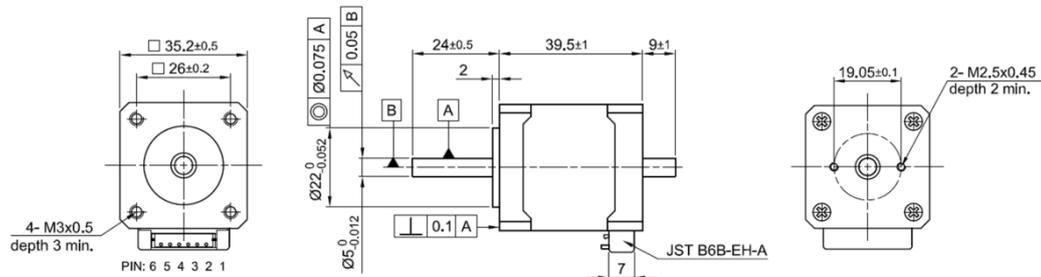
Schlussendlich muss noch bei (e) Material vom U-Profil herausgefräst werden um genügend Platz für die Kabelführung der Kamera zu schaffen, da das U-Profil direkt am Winkelprofil des Rahmens ansteht.

Mit diesen Bearbeitungsschritten, ist das U-Profil fertig für den Einbau.

Schrittmotor

Wie bereits beim 3D Drucker wurde auch hier ein Nema Schrittmotor gewählt, jedoch die kleinere Ausführung mit 35 Millimeter. Grund dafür ist, dass dieser Motor einerseits kompakter

ist und andererseits noch immer genügend Leistung für den Antrieb hat. Ein Auszug aus dem Datenblatt ist in Abbildung 34 dargestellt. Der Schrittmotor wurde gewählt, da man über ihn die Drehplatte und somit das zu scannende Objekt um eine exakte Anzahl an Schritten/ Graden drehen kann.



SPECIFICATION	CONNECTION	BIPOLAR SERIES
VOLTAGE (VDC)		3.0
AMPS/PHASE		1.2
RESISTANCE/PHASE (Ohms)@25°C		2.5±10%
INDUCTANCE/PHASE (mH) @1KHz		2.9±20%
HOLDING TORQUE (Nm) [lb-in]		0.18 [1.593]
DETENT TORQUE (Nm) [lb-in]		TBD
STEP ANGLE (°)		1.8
ACCURACY (NON-ACCUM)		±5%
ROTOR INERTIA (Kg-m²) [lb-in²]		2x10 ⁻⁶ [0.0068]
WEIGHT (Kg) [lb]		0.18 [0.4]
TEMPERATURE RISE: MAX.80°C (MOTOR STANDSTILL; FOR 2 PHASE ENERGIZED)		
AMBIENT TEMPERATURE -10°~ 50°C [14°F ~ 122°F]		
INSULATION RESISTANCE 100 MOhm (UNDER NORMAL TEMPERATURE AND HUMIDITY)		
INSULATION CLASS B 130° [266°F]		
DIELECTRIC STRENGTH 500VAC FOR 1 MIN. (BETWEEN THE MOTOR COILS AND THE MOTOR CASE)		
AMBIENT HUMIDITY MAX. 85% (NO CONDENSATION)		

Abbildung 34: Datenblatt des Schrittmotors (Auszug) [68]

Am Motorschaft wird ein sogenannter Pulley, ein Rad mit Rillen montiert um den Riemen anzutreiben. Dieser wird mit Hilfe einer M2 Madenschraube mit Innensechskant befestigt.

Dreheinheit

Die Dreheinheit besteht aus einer Drehplatte, dem Antriebsschaft, einem Pulley und zwei Befestigungsschrauben wie sie in Abbildung 35 dargestellt sind.

Die Drehplatte ist aufgrund ihrer Größe das markanteste Teil des 3D Scanners. Sie wird ebenfalls aus Aluminium gefertigt und hat einen Durchmesser von 250 Millimetern bei einer Stärke von 3 Millimeter. Durch diese Stärke ist die Platte robust genug um sich nicht unter dem Gewicht des zu scannenden Objekts zu verbiegen. Wie in Abbildung 35 zu sehen, hat

die Drehplatte zwei angesenkte Bohrungen in der Mitte. Über sie wird der Antriebsschaft montiert.

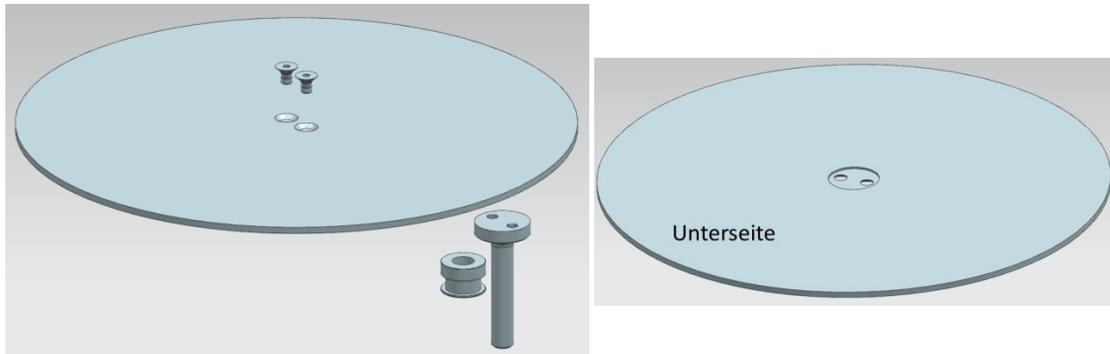


Abbildung 35: Dreheinheit mit ihren Komponenten

Auf der Unterseite der Drehplatte wurde eine Ausnehmung für die Montage des Antriebsschafts vorgesehen. Damit soll sichergestellt werden, dass der Schaft und die Drehplatte konzentrisch montiert werden.

Die Form des Antriebsschafts wurde so konstruiert, dass die Montage dieser Baugruppe nur über das Eigengewicht erfolgt und die Zentrierung beziehungsweise Lagerung selber über den Durchmesser des Schaftkopfs am Innendurchmesser des Axiallager und des Schafts am Schräglager erfolgt. Grafisch ist dies in Abbildung 36 zu erkennen.

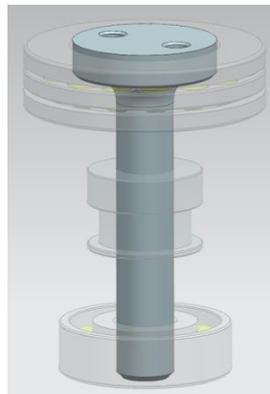


Abbildung 36: Antriebsschaft mit Pulley, Axial-Rillenkugel- und Schräglager

Des Weiteren erkennt man auch den Pulley für den Rientrieb, welcher zwischen den Lagern am Schaft montiert wird. Dieser ist vom Durchmesser größer als jener beim Schrittmotor, da der Schaftdurchmesser an dieser Stelle 10 Millimeter beträgt. Für den Antrieb selber bedeutet dies eine Übersetzung im Verhältnis von circa 1:1,45.

Lager und Lagerschalen

Für die Aufnahme der Kräfte und zur reibungsarmen Übertragung der Drehmomente werden zwei Lager verwendet. Dabei war die Überlegung, dass das obere Lager die Kräfte in axialer Richtung (Gewichtskraft der Dreheinheit plus des zu scannenden Objekts) aufnehmen soll. Zudem soll es einen größeren Durchmesser besitzen, um ein Kippen bei dezentraler Position des Objektschwerpunkts weitestgehend zu vermeiden.

Um solch einem Kippmoment zusätzlich entgegen zu halten und um den Schaft in radialer Richtung gegen die Trumkräfte des Riemens zu stützen, wurde ein weiteres Lager auf der unteren Seite des Antriebsschafts vorgesehen.

Unter Berücksichtigung der Kräfte, Drehmomente und der geometrischen Gegebenheiten, wurde für die obere Lagerung vom Hersteller SKF ein Axial-Rillenkugellager mit der Bezeichnung 51105 gewählt. Die Abmessungen sind in der folgenden Abbildung 37 dargestellt.

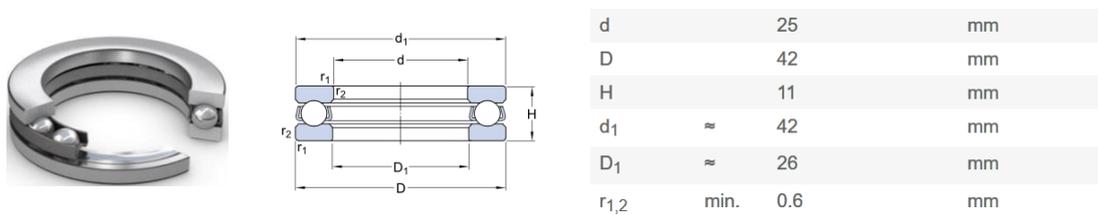


Abbildung 37: Axial-Rillenkugellager, einseitig wirkend (SKF) [69]

Die Wahl für die Lagerung des unteren Endes des Antriebsschafts fiel auf ein Schrägkugellager mit der Bezeichnung 7200 BEP, ebenfalls vom Hersteller SKF. Die Maße sind in Abbildung 38 dargestellt.

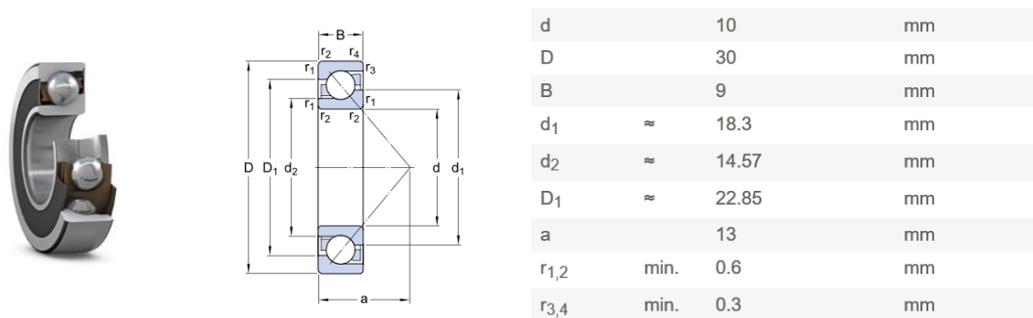


Abbildung 38: Schrägkugellager, einreihig (SKF) [70]

Das Suffix BEP bei der Bezeichnung des Radialkugellagers gibt Auskunft, dass der Kontaktwinkel der Kugeln 40° beträgt, das innere Design optimiert ist und der Käfig aus glasfaserverstärktem PA66 besteht welcher die Kugeln zentriert. [71]

Damit die Lager am U-Profil befestigt werden können, sind Lagerschalen notwendig wie sie in Abbildung 39 dargestellt sind.

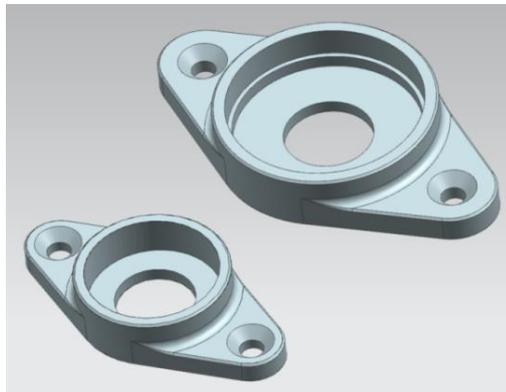


Abbildung 39: Lagerschalen fürs Schrägkugellager (li.) und Axial-Rillenkugellager (re.)

Konstruktiv sind sie so ausgeführt, dass der jeweilig untere Lagerring eindeutig positioniert werden kann. Die Schalen sind aus Aluminium gefräst und gewährleisten einen stabilen Sitz der gewählten Lager. Befestigt werden beide Lagerschalen über jeweils zwei M5 Senkschrauben am U-Profil.

Riemen

Wie bereits beim 3D Drucker, werden auch hier die Zahnriemen von der Type GT2 mit einer Breite von 6 Millimetern verwendet. Der wesentliche Unterschied besteht aber darin, dass beim 3D Scanner ein geschlossener Riemen zum Einsatz kommt. Für den Riemen gibt es vom Hersteller vorgegebene Riemenlängen, weshalb der Abstand zwischen Motorachse und Drehachse der Scheibe berechnet werden muss. Hierzu wird die angenäherte Formel zur Berechnung der Riemenlänge L angewandt

$$L \approx \frac{(d_g+d_k)\pi}{2} + 2A + \frac{(d_g-d_k)^2}{4A} \quad [72]$$

und entsprechend auf den Achsabstand A umgeformt:

$$A \approx \frac{L}{4} - \frac{(d_g+d_k)\pi}{8} + \sqrt{\left(\frac{L}{4} - \frac{(d_g+d_k)\pi}{8}\right)^2 - \frac{(d_g-d_k)^2}{8}}$$

Die Durchmesser d_g und d_k sind jeweils die Durchmesser der Pulleys im Bereich der Riemenführung. Bei den gewählten Pulleys ist dieser Durchmesser ident, da sich nur der Durchmesser der Innenbohrung ändert.



$$d_i = 14\text{mm}$$

Abbildung 40: Pulley – effektiver Durchmesser

Es wurden nun die konstruktiven Überlegungen für das Aluminium U-Profil, den Schrittmotor, die Dreheinheit sowie die Lager und Lagerschalen näher dargestellt. Alle zusammen werden zu einer Baugruppe zusammengefügt wodurch sie im Produktionsprozess als ein Modul betrachtet werden können. Bei der Montage hilft dies zudem, einen höheren Automatisierungsgrad und dadurch eine geringere Durchlaufzeit zu erreichen.

In Abbildung 41 ist diese Baugruppe als ein Montage-Modul zu sehen. Zur besseren Sichtbarkeit, wurde die Drehplatte mit den zwei Montageschrauben transparent dargestellt.

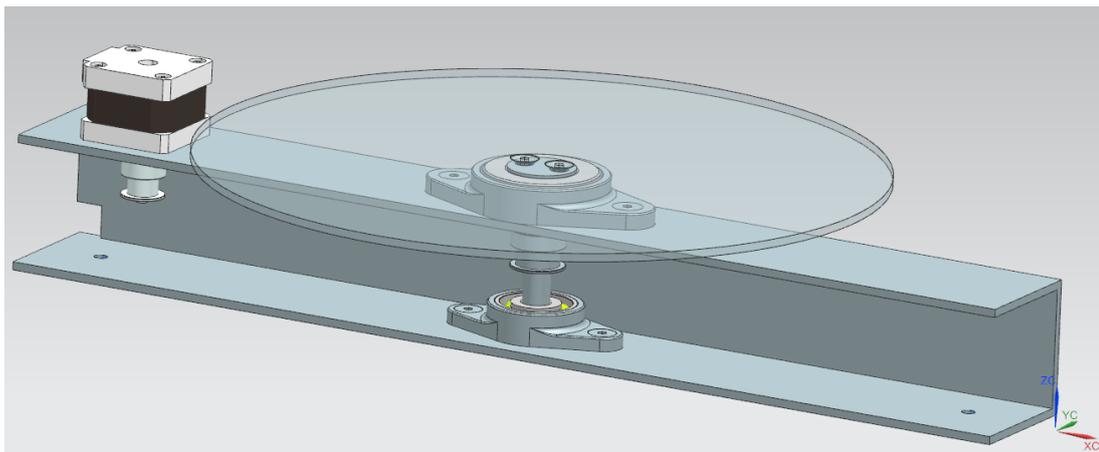


Abbildung 41: Drehmodul als eigenständige Baugruppe

Kameramodul

Das zweite zentrale Element des 3D Scanners mit der Photogrammetrie als Basis-Scan-Technologie ist das Kameramodul. Da die gesamte Qualität des Scans von ihr abhängt, wurde viel Zeit investiert um hier eine gute Auswahl zu treffen.

Da die Baugröße ebenfalls ein wichtiges Kriterium war, wurde von Anfang an nach Kameramodulen gesucht welche ohne Gehäuse erworben werden können. Zudem wurde überlegt, dass eine Verwendung von mehreren Kameras die Scandauer verkürzt, da bei einer 360°-Drehung des Objekts viel mehr Aufnahmen aus mehreren Perspektiven aufgenommen werden können. Zusätzlich dient eine zweite Perspektive einem besseren Digitalisierungsergebnis.

Die Raspberry Pi, welche beim 3D Drucker zum Einsatz kommt, soll auch beim 3D Scanner verwendet werden. Da sie aber nur einen CSI Camera Connector besitzt, war ein weiteres Auswahlkriterium für die Kamera, dass sie über USB angeschlossen werden können soll.

Die Wahl traf schließlich auf ein Kameramodul mit dem SONY IMX179 Sensor, wie es in Abbildung 42 zu sehen ist. Neben der Abbildung sind die wesentlichen technischen Eigenschaften aufgelistet.



Maße(L x B x H)	38 x 38 x 32mm
Sensor	CMOS
Bildauflösung	8,0 Megapixel
Bildrate	15 fps (bei USB 2.0)
max. Auflösung	3264 x 2448
Fokus	Autofokus
Betrachtungswinkel	75°
Stromversorgung	5 VDC
Anschluss	USB

Abbildung 42: SONY IMX179 Kameramodul

Die Begründung für die Wahl liegt vor allem in der hohen Bildauflösung in Kombination mit der Autofokus-Funktion. Dadurch wird gewährleistet, dass die Aufnahmen mit sehr hoher Qualität aufgenommen werden können und dadurch ein hoher Detailierungsgrad verfügbar ist. Zudem können unterschiedlich große Objekte stets scharf aufgenommen werden.

Aufgrund des Betrachtungswinkels von 75° ist es möglich, dass zwei Kameras verbaut werden können. Dies hat den Vorteil, dass doppelt so viele Aufnahmen in derselben Zeit aufgenommen werden können und dadurch die Software für die spätere Auswertung mehr Inputdaten hat.

Zur Montage der Kameras werden Halteprismen gefräst, die in Abbildung 43 zusammen mit dem Kameramodul dargestellt sind. Dabei ist zu erkennen, dass die seitlichen Stege zwischen linker und rechter Darstellung unterschiedliche Winkel besitzen. Grund dafür ist, dass das Modul auf der linken Seite weiter oben im Rahmen montiert wird als jenes auf der rechten Seite.

Das Kameramodul wird über M2 Zylinderkopfschrauben an den Stegen des Halteprismas angeschraubt wodurch sich ihr Neigungswinkel im 3D Scanner absolut einstellt. Die Prismen besitzen darüber hinaus genügend Platz für den Anschluss und die Führung der Verkabelung.

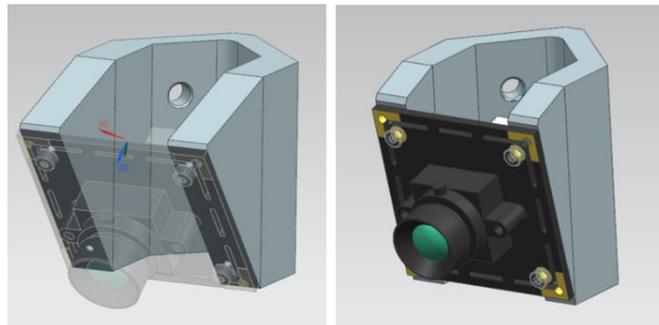


Abbildung 43: Kameramodule mit Halteprismen

Die Halteprismen wurden mit M5 Gewindebohrungen versehen worüber sie am Rahmen mit Senkschrauben montiert werden können. Durch ihre Position im Rahmen sind auch die absoluten Aufnahmeperspektiven definiert. Durch sie ergibt sich das maximal zu scannende Lichtprofil, welches aufgrund der gewählten Konstruktion in diesem Fall ein Zylinder ist. Er hat einen Durchmesser sowie eine Höhe von 200 Millimetern. Dies entspricht einem Volumen von 62.832 cm^3 beziehungsweise circa 2,25 Ein-Kilogramm Filamentrollen mit 1,75 Millimeter PLA (Polylactid).

5.4 Elektronikkomponenten

Die Anforderungen an die Elektronik sind beim 3D Scanner im Vergleich zum Drucker viel geringer. Wie erwähnt, fallen Komponenten wie das Druckbett, der Extruderschlitten mit Extruderkopf sowie alle Endschalter weg. In Abbildung 44 ist der Aufbau der Elektronikkomponenten für den Scanner dargestellt.

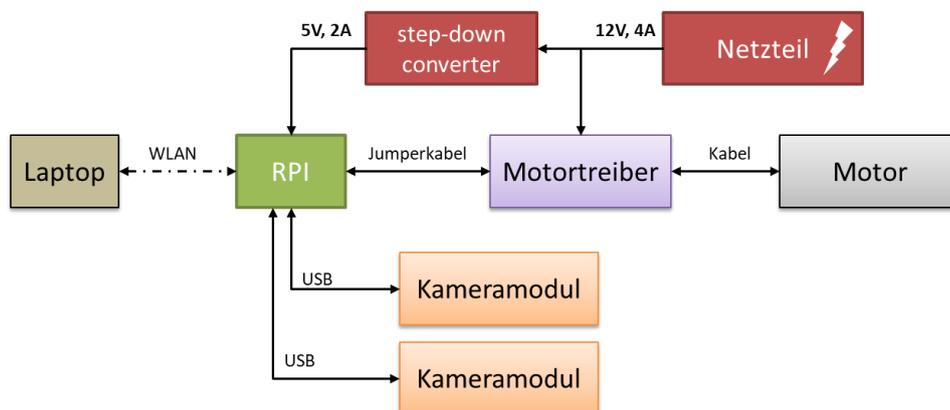


Abbildung 44: Aufbau der Elektronikkomponenten

Die zentrale Einheit bildet die Raspberry Pi (RPI). Über die USB-Anschlüsse werden die zwei Kameramodule verbunden. Der Motor wird über einen Motortreiber ebenfalls direkt an die

GPIO-Pins (General Purpose Input/Output) der RPI angeschlossen. Die Stromzufuhr erfolgt über ein Netzteil und einen step-down converter. Die RPI und somit der 3D Scanner kommuniziert über WLAN mit einem Laptop und kann über ihn angesteuert werden.

Raspberry Pi

Wie beim Drucker wird hier die aktuellste Version, die Raspberry Pi 3 Model B verwendet, welche das Kernstück der Elektronik des 3D Scanners bildet. Als Betriebssystem wird Raspbian, eine Linux-Distribution installiert, über welche die gesamte Kommunikation der einzelnen Komponenten erfolgt.

Um sich mit der Raspberry Pi und somit dem 3D Scanner über WLAN verbinden zu können, wird die Raspberry Pi als WLAN-Hotspot eingestellt. Dadurch ist es möglich sich mit dem Laptop immer verbinden zu können. Auf der Raspberry Pi wird lokal das selbst programmierte Skript gespeichert. Dieses ist dazu notwendig, um die Kameramodule für die Aufnahmen und den Motor für das weiterdrehen anzusteuern sowie die Aufnahmen selber lokal zu speichern und in eine .zip-Datei umzuwandeln.

Für die Kommunikation mit den Kameramodulen, wird hierzu das „fswebcam“-Paket installiert (via `sudo apt-get install fswebcam`). Eine Anleitung hierzu ist im Internet zu finden.² Eine Anleitung für das Set-up des Motors sowie ein entsprechender Code konnten ebenfalls im Internet gefunden werden. Für den Code galt es, ihn für diese Anwendung anzupassen.³

Netzteil und step-down converter

Die Elektronikkomponenten des 3D Scanners benötigen in Summe viel weniger elektrische Leistung als der 3D Drucker. Aus diesem Grund kann auf ein vergleichbar kleineres Netzteil zurückgegriffen werden. Die größte Leistung wird für den Motor benötigt weshalb dieser als Grundlage für die Dimensionierung des Netzteils herangezogen wird. Basierend auf dem Motordatenblatt (siehe Abbildung 34) wird ein MeanWell RS-50-12 Netzteil verwendet.

Um die Raspberry Pi mit demselben Netzteil zu speisen, wird ein step-down converter benötigt. Dieser konvertiert den Strom und die Spannung auf ein Niveau, mit welchem die Raspberry Pi betrieben werden kann.

In Abbildung 45 sind das Netzteil und der step-down converter dargestellt.

² <https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/webcams/>

³ <https://www.rototron.info/raspberry-pi-stepper-motor-tutorial/>



MODEL	RS-50-12
DC VOLTAGE	12V
RATED CURRENT	4.2A
CURRENT RANGE	0 ~ 4.2A
RATED POWER	50.4W
RIPPLE & NOISE (max.)	Note.2 120mVp-p
VOLTAGE ADJ. RANGE	10.8 ~ 13.2V
VOLTAGE TOLERANCE	Note.3 ±1.0%
LINE REGULATION	Note.4 ±0.5%
LOAD REGULATION	Note.5 ±0.5%

Eingangsspannung	3 – 40 VDC
Ausgangsspannung	1.25 – 35 VDC

Abbildung 45: li. Netzteil, re. step-down converter

Motortreiber

Da nur ein Motor für die Drehbewegung der Scheibe benötigt wird und sonst keine weiteren Komponenten verbaut werden, wird der Minitronics durch einen Motortreiber der Type DRV8825 ersetzt. Durch diesen Tausch wird es möglich, den Motor direkt über die Raspberry Pi anzusteuern ohne über die Software des Minitronics kommunizieren zu müssen. Dies reduziert die Anzahl an Schnittstellen, erleichtert das Programmieren und reduziert die Kosten.

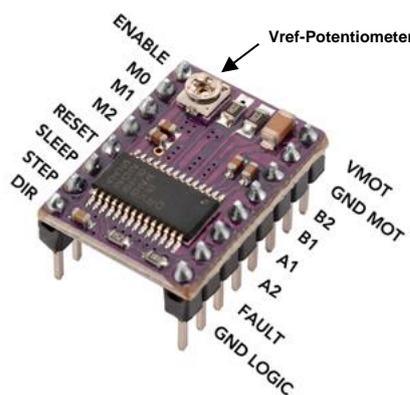


Abbildung 46: Motortreiber DVR8825 mit Bezeichnung der Anschlüsse

Bevor der Motor an den Motortreiber angeschlossen wird, muss zuvor die maximale Stromabgabe eingestellt werden. Dies ist nötig, damit der Motor sowie der Motortreiber nicht beschädigt werden. Die abzugebende Stromstärke kann über das Vref-Potentiometer am

DVR8825 eingestellt werden. Es gilt, dass der abgegebene Strom zwei Mal der gemessenen Vref-Spannung (gemessen zwischen Vref Potentiometer und GND) entspricht.

Bezüglich der Beschreibung der Verkabelung zwischen Raspberry Pi, dem Motortreiber, dem Motor und dem Netzteil sowie des selbst programmierten Skripts für die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten und dem Laptop, wird auf Kapitel 6 verwiesen.

5.5 Das virtuelle Modell des 3D Scanners

Wenn alle Teile und Baugruppen im Rahmen montiert und verbaut werden, ist das virtuelle Modell des 3D Scanners fertig. Bereits auf den ersten Blick kann man in Abbildung 47 erkennen, dass die Komplexität und Anzahl der verbauten Komponenten im Vergleich zum 3D Scanner deutlich geringer ist.

Abbildung 47 zeigt zwei Ansichten des Modells. Auf der linken Seite sind die Sichtkegel der zwei Kameramodule sowie das Lichtprofil des maximalen Objektvolumens dargestellt. Auf der rechten Seite ist der 3D Scanner in der Ausgangsposition für die Aufnahme zu erkennen. Die gesamte Elektronik ist in der Elektronikbox verbaut und hier nicht explizit dargestellt.

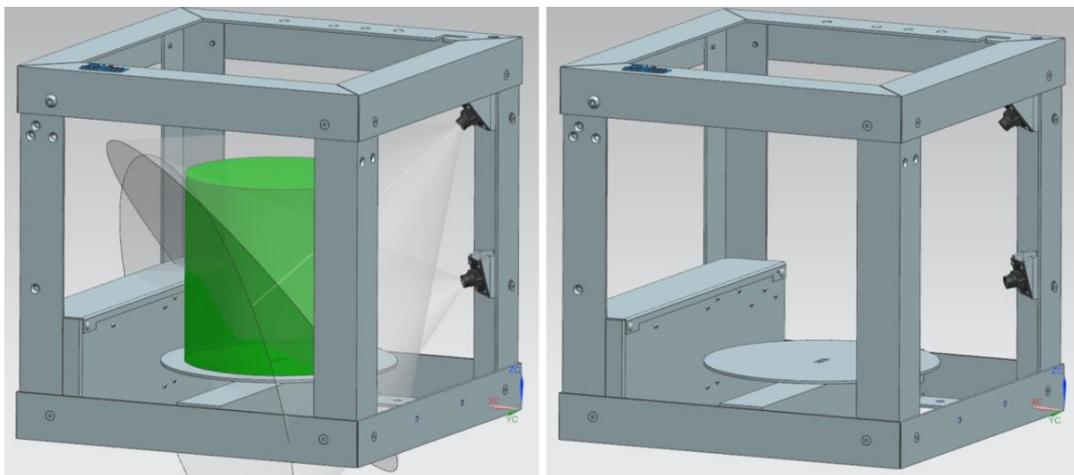


Abbildung 47: Das virtuelle Modell des 3D Scanners

6 Der Prototyp – Proof of Concept

Für den Proof-of-Concept und um den Digitalisierungsprozess zu validieren, wurde aus dem Modell des 3D Scanners ein Prototyp abgeleitet. Um ihn auf kurzer Zeitachse mit geringen Fertigungskosten zu bauen, wurden die wesentlichen Teile umkonstruiert und mittels 3D Druckverfahren hergestellt.

6.1 Konstruktionsteile

Wie in Abbildung 48 zu sehen, wurde die Gestalt des 3D Scanners stark reduziert und für den 3D Druck optimiert, ohne dabei die konstruktiven Hauptabstände der Kameramodule zum Mittelpunkt der Drehscheibe zu verändern. Aufgrund des begrenzten Bauraums des 3D Druckers, musste das individualisierte U-Profil dreiteilig und die Drehscheibe mit geringerem Durchmesser hergestellt werden. Da der Pulley am Antriebsschaft der Drehscheibe nicht entsprechend gefertigt, sondern zugekauft wurde, musste der Schaft umdimensioniert und zweiteilig ausgeführt werden.

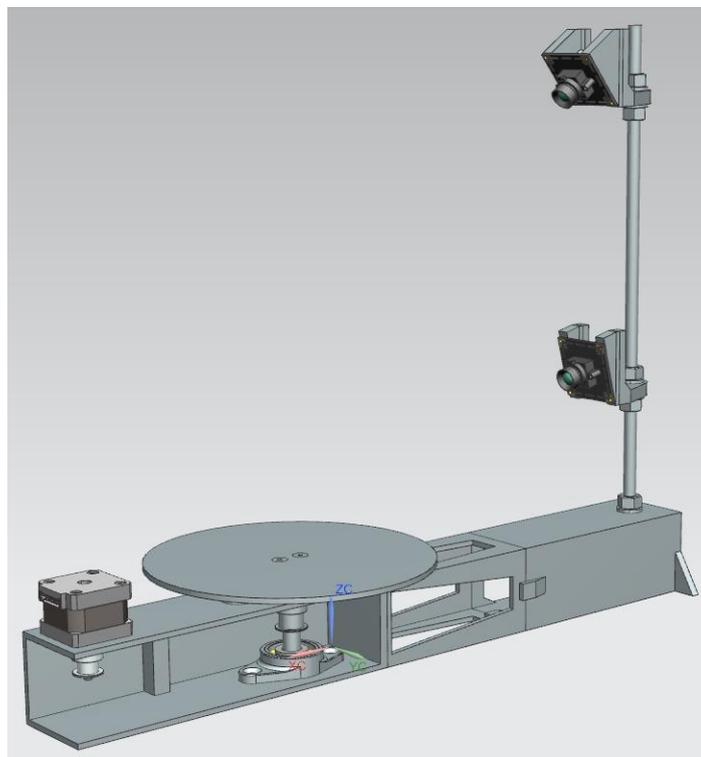


Abbildung 48: Der Prototyp des 3D Scanners

Der Abstand des Motors zur Drehachse wurde ebenfalls verkürzt. Dies hat Einfluss auf die Dimension des Riemens, welcher nun eine Länge von 308 Millimeter besitzt.

In Summe besteht der Prototyp aus 16 Druckteilen, welche mit dem 3D Drucker (Version 2.5) der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 hergestellt wurden. Die Haltevorrichtungen für die zwei Kameramodule wurden an einer M8 Gewindestange montiert. Aus konstruktiver Sicht erfüllt der Prototyp sämtliche Anforderungen für den Proof-of-Concept.

6.2 Elektronikkomponenten

Die Verwendung und Zusammenstellung der Elektronikkomponenten wurde für den Prototyp fast gänzlich wie in Abbildung 44 übernommen. Da aber darauf verzichtet wurde, sämtliche Komponenten in der Elektronikbox unter zu bringen, wurden aus Sicherheitsgründen zwei separate, geschlossene Netzteile verwendet.

Die Raspberry Pi wird mit einem handelsüblichen Micro-USB-Ladegerät (5V Ausgangsspannung) versorgt. Für den Motortreiber und somit für den Motor selber wird mehr Leistung benötigt. Hier wurde ein 12V Netzteil mit 2A verwendet. Da der DVR8825 anfällig für Spannungsspitzen ist, muss ein (mindestens) $47\mu\text{F}$ (Mikrofarad) Elektrolytkondensator zwischen dem Netzteilanschluss verbaut werden.

Die schematische Verkabelung des Motortreibers, der Raspberry Pi, dem Motor und des Netzteils ist in Abbildung 49 dargestellt. Auf den Anschluss des Netzteils und der Kameramodule an der Raspberry Pi wurde in dieser Darstellung aufgrund der einfachen Art und Weise verzichtet.

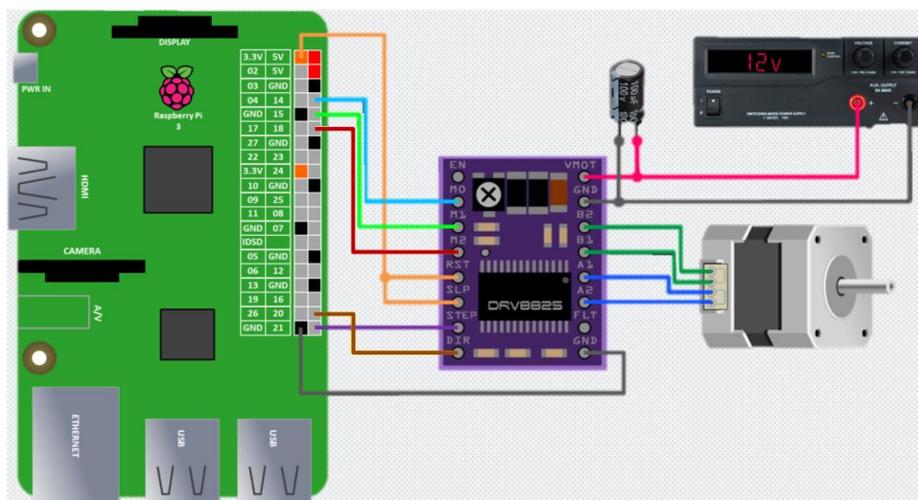


Abbildung 49: schematische Darstellung der Verkabelung

Die Verkabelung mit dem Motortreiber wurde der Einfachheit auf einem Steckbrett realisiert.

6.3 Der Digitalisierungsprozess

Für die Photogrammetrie gibt es einige Programme, welche aus dem Internet gratis heruntergeladen werden können. Sie werden zwar weniger, da die Hersteller die Bedeutung dieser Technologie erkannt haben und sogenannte Pro-Versionen zum Kauf beziehungsweise gegen eine monatliche oder jährliche Lizenz anbieten. So gut wie jedes Programm deckt dabei mehrere Schritte der im Kapitel 4 beschriebenen Prozesskette ab. Als Eingabe wird jedoch immer eine bestimmte Anzahl an Aufnahmen benötigt.

Für das virtuelle Modell des 3D Scanners sowie des Prototyps soll an dieser Stelle ein möglicher Digitalisierungsprozess mit ausgewählten Programmen beschrieben werden welcher auch die niedrige Rechenleistung der Raspberry Pi berücksichtigt und vom Einschalten des Scanners bis zum Datensatz für das 3D Drucken reichen soll. Ein zusätzliches Kriterium ist, dass die Programme als Freeware erhältlich sind. In Abbildung 50 ist der Digitalisierungsprozess mit den ausgewählten Programmen dargestellt.

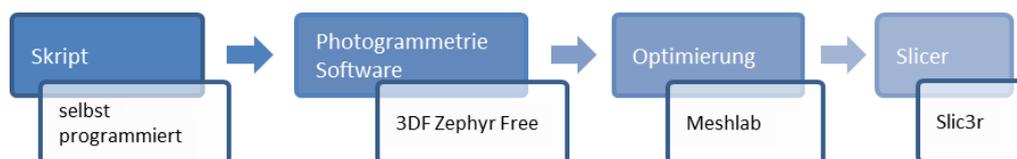


Abbildung 50: Programme für den Digitalisierungsprozess

Nachdem man sich mit dem Prototypen beziehungsweise mit der Raspberry Pi über WLAN verbunden hat, erfolgt die Kommunikation über eine HTML-Seite wie sie in Abbildung 51 zu sehen ist. Über diese Seite kann man zwei REST-Endpunkte ansteuern. Sie haben den Zweck einerseits den Scanprozess zu starten und somit das Skript auszuführen sowie andererseits die fertige .zip-Datei von der Raspberry Pi auf den Laptop herunterzuladen.

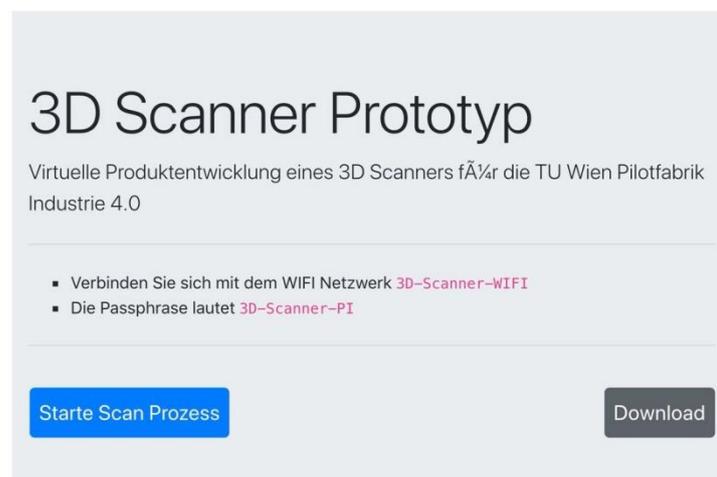


Abbildung 51: HTML-Seite zur Kommunikation mit der Raspberry Pi

Der Quellcode für die Seite sowie für das Skript können im Anhang in Kapitel 8.1 beziehungsweise in Kapitel 8.2 gefunden werden.

Das Ergebnis nach dem Ausführen des Skripts sind 50 Aufnahmen aus zwei Perspektiven und 360°. Über den zweiten Endpunkt können die Bilder in einen bestimmten Ordner entpackt und für den nächsten Schritt gespeichert werden.

3DF Zephyr Free

3DF Zephyr Free ist eine kostenlose Photogrammetrie-Software welche für den Einstieg sehr gute Basisfunktionen mit sich bringt. Vor allem eine optimierte Benutzeroberfläche und dadurch einfache Handhabung sprechen für dieses Programm. Bei Bedarf bietet der Hersteller eine kostenpflichtige Lite- beziehungsweise Pro-Version an.

Die wesentliche Einschränkung der Gratisversion liegt in der begrenzten Anzahl von 50 Aufnahmen die verarbeitet werden können. Hieraus ergibt sich auch der 14,4° Drehintervall, bei welchem jeweils eine Aufnahme pro Kameramodul aufgenommen wird. In Summe ergeben sich somit 50 Aufnahmen bei 360°. Für einfache Objekte mit dem vorgegebenen konstruktiven Maximalvolumen ergibt sich daraus eine zufriedenstellende Anzahl für den 3D Scan.

Um das 3D Modell zu erstellen, müssen nun die Aufnahmen (entweder JPG oder alle Arten von nativen RAW-Formaten) aus dem gewählten Zielordner in das Programm geladen werden. Danach kann direkt gewählt werden, wie das Fotoset verarbeitet werden soll. Die voreingestellten Möglichkeiten sind: Luftbild, Nahbereich, menschlicher Körper und Urban. Für den 3D Scanner sollte stets „Nahbereich“ gewählt werden.

Abhängig von der Leistung des Laptops, der gewünschten Qualität des 3D Scans und dem angestrebten Ergebnis (Punktwolke, Flächenmodell) kann die Berechnungszeit von einigen Minuten bis zu mehreren Stunden dauern. Da man bei der Gratisversion dieses Programms beim darauffolgenden Editieren eingeschränkt ist, wird an dieser Stelle empfohlen lediglich die Punktwolke zu erstellen und diese im OBJ-Dateiformat zu speichern.

MeshLab

Da die Photogrammetrie-Software in ihren Funktionen aufgrund der Gratisversion eingeschränkt ist, kommt für das Editieren das Gratisprogramm MeshLab zum Einsatz.

MeshLab ist ein freies plattformunabhängiges Programm mit zahlreichen Algorithmen zur Verarbeitung von Punktwolken und dreidimensionalen Geometrien. Mit einer Reihe von Werkzeugen können Punktwolken und/oder Dreiecksnetze bearbeitet, bereinigt, geprüft und gerendert werden. Dies hilft die häufig auftretenden Fehler bei der Konvertierung der Punktwolke in ein Flächenmodell zu bearbeiten und zu beheben.

Mit diesem Programm wird also aus der Punktwolke ein Flächenmodell erzeugt welches nach abgeschlossener Optimierung im STL Format abgespeichert werden kann um die Datei für den 3D Druck vorzubereiten.

Slic3r

Das gescannte Objekt liegt nun als Flächenmodell im STL-Dateiformat vor. Dieses wird mit Slic3r geöffnet, welches einen G-Code auf Basis der voreingestellten 3D Druck-Parameter generiert. Diese Parameter können voreingestellt werden, wodurch die Bedienung dieses Programms sehr einfach und kurzzeitig ist. Ein Vorteil von Slic3r ist auch die Möglichkeit das Flächenmodell für den 3D Druck zu skalieren. Damit können gescannte Objekte in unterschiedlichen Größen dupliziert werden.

Der beschriebene Digitalisierungsprozess auf Basis der vorgestellten Softwarelösungen stellt eine kostenfreie Möglichkeiten dar, um vom 3D Scan auf Basis der Photogrammetrie über eine Punktwolke zu einem Flächenmodell und weiter zum G-Code für den 3D Drucker zu gelangen. Kostenpflichtige Programme haben meist eine höhere Funktionalität wodurch sich der Einsatz an unterschiedlichen Programmen reduziert.

7 Fazit und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Die vierte industrielle Revolution, auch Industrie 4.0 bietet ein enormes wirtschaftliches Potential für Österreich. Als eines der Kerntechnologien dieser Revolution wurde die additive Fertigung identifiziert. Mit ihr ergeben sich einige neue Möglichkeiten aber auch Herausforderungen der modernen Fertigung. Dabei spielen 3D CAD Daten als Input eine wichtige Rolle. In dieser Arbeit wurde aus diesem Grund das 3D Scannen als eine Möglichkeit der Generierung von 3D-CAD-Daten untersucht. Es wurde die allgemeine Funktionsweise beschrieben und die Hauptanwendungen in der Industrie identifiziert.

Da ein 3D Scanner aus einer Hardware- und einer Softwarekomponente besteht, wurde ein genauer Blick auf die Prozesskette gelegt. Es wurde beschrieben wie der Prozess, beginnend mit der Punktwolke bis hin zum digitalen Datensatz als Input für den 3D Drucker abläuft. Zusätzlich zum Prozess wurden auch die am häufigsten verwendet Dateiformate erläutert und deren Besonderheiten beschrieben.

Für die Aufnahme der Punktwolke wurde eine Übersicht an Scan-Technologien gegeben und eine Auswahl davon im Detail beschrieben. Es wurde versucht die physikalisch mathematischen Grundlagen auszuarbeiten und zu erläutern. Durch Anwendungsbeispiele wurde ihr praktischer Einsatz gezeigt.

Um die geeignetste Scan-Technologien für den Einsatz in einem potentiellen 3D Scanner für die TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 zu finden, wurden fünf Kriterien definiert. Mit deren Hilfe konnten die Technologien gegenüber gestellt und bewertet werden. Dabei wurde erkannt, dass die Photogrammetrie als Basis für das virtuelle Modell des 3D Scanners in Frage kommt.

Im praktischen Teil dieser Arbeit wurde ein virtuelles Modell eines 3D Scanners konstruiert. Dabei wurden sämtliche Teile und der konstruktive Gedanke genau beschrieben. Für den Proof-of-Concept wurde ein Prototyp vom Modell abgeleitet, gebaut und getestet. Mit Hilfe von kostenfreien Programmen wurde der Digitalisierungsprozess vorgestellt, mit welchen die nötigen Schritte von den Aufnahmen des Objekts bis hin zum G-Code für den 3D Drucker durchgeführt werden können.

7.2 Kritische Betrachtungen

Der 3D Scan ist eine komplexe Technologie, bei welcher sehr viele Parameter für ein optimales Ergebnis berücksichtigt werden müssen. Vor allem die optischen Scanverfahren benötigen ein Umfeld, welches genau auf die Aufnahme abgestimmt werden muss.

Die Photogrammetrie beruht auf der Triangulation von Bildpunkten mehrerer Aufnahmen. Um hier ein zufriedenstellendes Ergebnis zu erhalten, müssen neben einer sehr guten Kamera auch die Parameter der Fotoaufnahme genau eingestellt werden. Um gute und somit verwendbare Aufnahmen zu erhalten, muss ein besonderes Augenmerk auf die Grundlagen der Fotografie gelegt werden. So sind Schärfentiefe, Belichtungszeit, ISO-Empfindlichkeit und so weiter wesentlich.

Dies waren auch die Hauptherausforderungen des Prototyps. Kleinste Abweichungen vom Optimum führten sofort zu unbrauchbaren Aufnahmen. Durch technische Maßnahmen ist es aber möglich, diese besser Beherrschbar zu machen. Zusätzlich bietet aber auch das Skript noch weiteres Potential eine Optimierung der Aufnahmen zu erreichen.

7.3 Empfehlungen für weitere Arbeiten

Die Aufnahmen sind der Ausgangspunkt für den Digitalisierungsprozess. Aus diesem Grund ist deren Qualität entscheidend. Eine erste Empfehlung wäre es daher, Parameter für optimale Aufnahmen zu finden und zu definieren. Diese könnten tabellarisch zusammengeführt und im Skript vor der Aufnahme mittels Auswahlmöglichkeit eingestellt werden.

In einer weiteren Arbeit könnte der Fokus auf die Software gelegt werden. Der Digitalisierungsprozess könnte dahingehend optimiert werden, dass die Schnittstellen der unterschiedlichen Programme so programmiert wären, dass der Anwender schneller und mit weniger Aufwand zu den gewünschten 3D-CAD-Daten kommt. Um die Scandauer zu verkürzen könnte man untersuchen, ob eine Videoaufnahme mit sich langsam drehender Dreheinheit umsetzbar wäre. Dazu müsste man den Fokus der Arbeit wohl eher auf die Programmierung einer eigenständigen Software legen.

Da in der Produktentwicklung oft versucht wird viele Funktionen in einem Gerät unterzubringen, wäre die letzte Empfehlung, die Entwicklung eines 3D Kopierers. Dieser könnte den 3D Drucker und den 3D Scanner in einem Gerät vereinen und somit eine besondere Nachfrage auslösen.

8 Anhänge

8.1 Quellcode für die HTML-Seite

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="de">
<head>
  <script>
    var interval;
    function startScan() {
      var downloadBtn = document.getElementById('downloadBtn');
      var startBtn = document.getElementById('startBtn');
      var cancelBtn = document.getElementById('cancelBtn');
      var progressBar = document.getElementById('progeessBar');
      startBtn.setAttribute("disabled", "disabled");
      downloadBtn.setAttribute("style", "display:none");
      cancelBtn.setAttribute("style", "");
      var current_progress = 0;
      progressBar.style.width = 0;
      interval = setInterval(function () {
        progressBar.style.width = (current_progress += (1 /
3)) + '%';
        if (current_progress >= 100) /* 5min */ {
          cancelScan();
          downloadBtn.setAttribute("style", "");
        }
      }, 1000);
      var xmlhttp = new XMLHttpRequest();
      xmlhttp.open("GET",
http://192.168.5.1:3000/scanner/start", false);
      xmlhttp.send();
    }
    function cancelScan() {
      var startBtn = document.getElementById('startBtn');
      var cancelBtn = document.getElementById('cancelBtn');
      var progressBar = document.getElementById('progeessBar');
      clearInterval(interval);
      startBtn.removeAttribute("disabled");
      cancelBtn.setAttribute("style", "display:none");
      progressBar.style.width = '0%';
    }
  </script>
  <link rel="stylesheet"
href=https://stackpath.bootstrapcdn.com/bootstrap/4.1.
3/css/bootstrap.min.css
integrity="sha384-
MCw98/SFnGE8fJT3GXwEOngsV7Zt27NXFoaoApmYm81iuXoPkFOJwJ
8ERdknLPMO"
crossorigin="anonymous">
```

```

</head>
<body>
  <div class="container">
    <div class="row p-3">
      <div class="container p-3" style="background-color:
#e9ecef">
        <h1 class="pt-5 display-4">3D Scanner Prototyp</h1>
        <p class="lead">Virtuelle Produktentwicklung eines
        3D Scanners für die TU Wien Pilotfabrik Industrie
        4.0</p>
        <hr class="my-4">
        <ul style="list-style-type: square">
          <li>Verbinden Sie sich mit dem WIFI Netzwerk
          <code>3D-Scanner-WIFI</code></li>
          <li>Die Passphrase lautet <code>3D-Scanner-
          PI</code></li>
        </ul>
        <hr class="my-4">
        <div class="row p-3 d-flex">
          <button id="startBtn" onclick="startScan()"
          class="p-2 btn btn-primary btn-lg">Starte Scan
          Prozess</button>
          <button id="cancelBtn" onclick="cancelScan()"
          class="p-2 ml-3 btn btn-outline-danger btn-lg"
          style="display:none">Abbrechen</button>
          <a id="downloadBtn"
          href="http://192.168.5.1:3000/scanner/captures"
          class="ml-auto p-2 btn btn-secondary btn-lg"
          style="display:none">Download</a>
        </div>
        <div class="progress">
          <div id="progeSSBar" class="progress-bar pro-
          gress-bar-striped progress-bar-animated bg-
          success" role="progressbar" style="width:0%"
          aria-valuenow="0" aria-valuemin="0" aria-
          valuemax="100"></div>
        </div>
      </div>
    </div>
  </div>
</body>
</html>

```

8.2 Quellcode für das Skript

```
#!/bin/bash

#properties
RESOLUTION="2048x1536"
DELAY=2

#clear existing zip
rm -f /home/pi/masterThesis/*.zip
echo $DATE

#do the scanning
for i in {0..24}
do
    #sleep for two seconds
    sleep 2

    #take picture from camera1
    fswebcam -d /dev/video0 -r $RESOLUTION --delay $DELAY
    /home/pi/masterThesis/captures/perspektive1_$i.jpg

    #take picture from camera2
    fswebcam -d /dev/video1 -r $RESOLUTION --delay $DELAY
    /home/pi/masterThesis/captures/perspektive2_$i.jpg

    #execute step
    python /home/pi/masterThesis/step.py
done

# zip files
zip -j -m /home/pi/masterThesis/captures.zip
/home/pi/masterThesis/captures/*
```

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die neun Kerntechnologien der Industrie 4.0 [8]	2
Abbildung 2: Drei Möglichkeiten einen 3D-CAD Datensatz zu erhalten	4
Abbildung 3: Punktwolke eines Zahnrades [14]	8
Abbildung 4: Rekonstruktion der Punktwolke des Zahnrades [14]	9
Abbildung 5: Hauptanwendungen des 3D Scans am Beispiel des Zahnrades [14]	10
Abbildung 6: Prozess der 3D Modellierung	11
Abbildung 7: Einteilung der 3D Scantechnologien	13
Abbildung 8: prinzipieller Aufbau eines Portalkoordinatenmessgerätes [24]	15
Abbildung 9: Schematische Darstellung einer Röntgenröhre [26]	16
Abbildung 10: Schematischer Aufbau der 3D-ICT [30]	18
Abbildung 11: Dreidimensionales ICT-Bild eines Leichtmetallbauteils [32]	18
Abbildung 12: DVT Gerät und 3D Darstellung nach dem Scan [35]	19
Abbildung 13: Schematische Skizze zum Prinzip der aktiven Triangulation	21
Abbildung 14: Prinzipdarstellung zur Berechnung der Koordinaten des Punktes P	21
Abbildung 15: Schematischer Aufbau der Streifenprojektion [12]	23
Abbildung 16: Schematische Darstellung der räumlich-zeitlichen Gray-Kodierung [40]	23
Abbildung 17: Cosinus-förmiges Intensitätsprofil nach dem Phasenschiebepverfahren	25
Abbildung 18: 3D Digitalisierung mittels Streifenprojektion [43]	26
Abbildung 19: links: Prinzipskizze einer Lochkamera; rechts: Funktionsbeispiel [44]	27
Abbildung 20: Schematische Skizze zum Prinzip der Photogrammetrie [45]	28
Abbildung 21: 3D Digitalisierung mit Hilfe von Photogrammetrie [46]	29
Abbildung 22: Grundprinzip eines TOF-Entfernungsmesssystems	29
Abbildung 23: Mensch-Roboter Kommunikation mit Hilfe von TOF Kameras [50]	31
Abbildung 24: von der Punktwolke zum Flächenmodell [53]	34
Abbildung 25: Prinzip der Delaunay-Triangulation [55]	34
Abbildung 26: Rekonstruktion der Punktwolke zu einem Flächenmodell [57]	35
Abbildung 27: Generierung von Smart Growing Cells [53]	36
Abbildung 28: Smart Growing Cells am Beispiel eines Hasen [53]	37
Abbildung 29: Flächenrückführung mittels NURBS [63]	39
Abbildung 30: der 3D Drucker der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0	43
Abbildung 31: Gegenüberstellung und Bewertung der Scantechnologien	45
Abbildung 32: Ausgangspunkt für den 3D Scanner	47
Abbildung 33: Aluminium U-Profil nach der Bearbeitung	48

Abbildung 34: Datenblatt des Schrittmotors (Auszug) [68]	49
Abbildung 35: Dreheinheit mit ihren Komponenten	50
Abbildung 36: Antriebsschaft mit Pulley, Axial-Rillenkugel- und Schrägkugellager	50
Abbildung 37: Axial-Rillenkugellager, einseitig wirkend (SKF) [69]	51
Abbildung 38: Schrägkugellager, einreihig (SKF) [70]	51
Abbildung 39: Lagerschalen fürs Schrägkugellager (li.) und Axial-Rillenkugellager (re.)	52
Abbildung 40: Pulley – effektiver Durchmesser	53
Abbildung 41: Drehmodul als eigenständige Baugruppe	53
Abbildung 42: SONY IMX179 Kameramodul	54
Abbildung 43: Kameramodule mit Halteprismen	55
Abbildung 44: Aufbau der Elektronikkomponenten	55
Abbildung 45: li. Netzteil, re. step-down converter	57
Abbildung 46: Motortreiber DVR8825 mit Bezeichnung der Anschlüsse	57
Abbildung 47: Das virtuelle Modell des 3D Scanners	58
Abbildung 48: Der Prototyp des 3D Scanners	59
Abbildung 49: schematische Darstellung der Verkabelung	60
Abbildung 50: Programme für den Digitalisierungsprozess	61
Abbildung 51: HTML-Seite zur Kommunikation mit der Raspberry Pi	61

10 Literaturverzeichnis

- [1] G. M. Grossman und E. Helpman, *Innovation and Growth in the Global Economy*, MITPress, 1991.
- [2] J. Schmookler, „Invention and economic growth,“ *Harvard University Press*, 1966.
- [3] W. O. Henderson, „England und die Industrialisierung Deutschlands,“ *Journal of Institutional and Theoretical Economics*, Bd. 108, pp. 264 - 294, 1952.
- [4] J. Kilby und R. Roup, „Electrical circuit elements“. Patent 2,841,508, Juli 1958.
- [5] K. Schwab, *Die vierte industrielle Revolution*, Pantheon Verlag, 2016.
- [6] M. Bendl, B. Egelhofer und C. Raber, „Industrie 4.0 und digitale Produktion - Initiativen zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der österreichischen Unternehmen,“ Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, Wien, 2015.
- [7] W. Bauer und P. Horváth, „Industrie 4.0-Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland,“ *Controlling*, pp. 515-517, 2015.
- [8] M. Rößmann, M. Lorenz, P. Gerbert, M. Waldner, J. Justus, P. Engel und M. Harnisch, „Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries.,“ Boston Consulting Group, 2015.
- [9] „Pilotfabrik der TU Wien,“ [Online]. Available: <http://pilotfabrik.tuwien.ac.at/>. [Zugriff am 10 April 2018].
- [10] A. Gebhardt, J. Kessler und L. Thurn, *3D-Drucken: Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM)*, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG., 2016.
- [11] B. f. D. u. Wirtschaftsstandort, „Die digitale Strategie der österreichischen Bundesregierung,“ The Skills Group GmbH / Magistris und Berchtold / contemas, [Online]. Available: <https://www.digitalroadmap.gv.at>. [Zugriff am 9 4 2018].
- [12] J. Geng, „Structured-light 3D surface imaging: a tutorial,“ *Advances in Optics and Photonics*, pp. 128-160, 2011.
- [13] A. M. Wolfgang Böhler, *3D time-of-flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS/CCD-technology.*, 2006.
- [14] Rapidobject, „rapidobject,“ [Online]. Available: <https://www.rapidobject.com/de/Leistungen/3D-Datenerstellung/3D-Scannen/3D-Scan->

- Ausgabeformate_1262.html. [Zugriff am 2 5 2018].
- [15] T. Weyrich, M. Pauly, R. Keiser, S. Heinzle, S. Scandella und M. H. Gross, „Post-processing of Scanned 3D Surface Data,“ *SPBG*, pp. 85-94, 2004.
- [16] Creaform Ebook Series, „An introduction to 3D scanning,“ 2015. [Online]. Available: https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/ebook1_an_introduction_to_3d_scanning_en_26082014.pdf. [Zugriff am 2 Mai 2018].
- [17] B. O. T. & I. K. Zheng, „Rail Sensor: A Mobile Lidar System for 3D Archiving the Bas-reliefs in Angkor Wat,“ *IP SJ Transactions on Computer Vision and Applications*, pp. 59-63, 2015.
- [18] G. Tallig, R. Zender und U. Lucke, „Konzeption und Verifikation eines Auswahlverfahrens für 3D-Scantechnologien,“ *DeLFI Workshops*, pp. 19-27, 2015.
- [19] O. Harry, „Measuring apparatus“. USA Patent 3,394,248, 1968.
- [20] C. Specht, P. Dąbrowski, A. Dumalski und K. Hejbudzka, „Modeling 3D Objects for Navigation Purposes Using Laser Scanning,“ *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2016.
- [21] D. Bachfeld, P. König und V. Zota, „Kopieren in 3D - Räumlich scannen mit Digitalkamera, Kinect oder Laser-Scanner,“ *c't*, pp. 86-91, 2012.
- [22] B. Curless, „From range scans to 3D models,“ *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, pp. 38-41, 1999.
- [23] A. Weckenmann, *Koordinatenmesstechnik: Flexible Meßstrategien für Maß, Form und Lage*, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2012.
- [24] A. Weckenmann, „Wikimedia,“ 1 November 1999. [Online]. Available: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/KMG-QFM.jpg>. [Zugriff am 11 April 2018].
- [25] W. Schaaffs, *Erzeugung von Röntgenstrahlen*, Berlin: Springer, 1957.
- [26] K. Durstberger-Rennhofer, „vwu-info.at,“ [Online]. Available: <http://www.vwu-info.at/physik/skriptum/Physik6-ss14.pdf>. [Zugriff am 10 März 2018].
- [27] A. Liebing, „Computertomografie–Teil 1: Aufbau, Technik, Bildentstehung,“ *Radiopraxis*, pp. 9-21, 2013.
- [28] E. Ambos und e. al., „Neue zerstörungsfreie Werkstoff-prüfung im Test,“ *Giesserei Erfahrungsaustausch*, 2012.
- [29] A. Flisch und e. al., „Industrial computed tomography in reverse engineering applications,“ *DGZ-fP-Proceedings BB*, 1999.

- [30] T. Brandmüller, „Wikimedia,“ [Online]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/10/3D_Computed_Tomography.png . [Zugriff am 11 April 2018].
- [31] N. Blessing, *Segmentierung von industriellen 3D-CT-Voxelmodellen durch dynamische Schwellwertberechnung*, Stuttgart, 2008.
- [32] unknown, „Zeiss,“ [Online]. Available: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/computed-tomography/metrotom.html> . [Zugriff am 11 April 2018].
- [33] M. Knörigen, S. Brandt und S. Kösling, „Qualitätsvergleich digitaler 3D-fähiger Röntgenanlagen bei HNO-Fragestellungen am Schläfenbein und den Nasennebenhöhlen,“ *RöFo - Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren*, pp. 1153-1160, 2012.
- [34] M. Bremke, R. Leppke und J. A. Werner, „Die digitale Volumetomographie in der HNO-Heilkunde Digital volume tomography in ENT medicine,“ *Hno*, pp. 823-832, 2010.
- [35] Zahnarztpraxis Grass-Herrmann, „Zahnarztpraxis Grass-Herrmann,“ [Online]. Available: <http://www.grass-herrmann.de/leistungen/dvt.html>. [Zugriff am 11 April 2018].
- [36] B. Achermann, X. Jiang und H. Bunke, „Face recognition using range images,“ *Virtual Systems and MultiMedia*, pp. 129-136, 1997.
- [37] T. Luhmann, *Nahbereichsphotogrammetrie*, Wichmann Verlag, 2000.
- [38] L. J. Hornbeck, „Digital light processing and MEMS: An overview,“ *Advanced Applications of Lasers in Materials Processing/Broadband Optical Networks/Smart Pixels/Optical MEMs and Their Applications*, pp. 7-8, 1996.
- [39] G. Frank, „Pulse code communication“. Patent 2,632,058, 1953.
- [40] J. Gühring, *3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion*, Beck, 2002.
- [41] H. Sakulin, P. A. Wilksch und T. Neger, „Hochpräzise Echtzeit-Dehnungsmessung mittels digitaler Speckle-Interferometrie unter Einsatz eines Phasenschiebeverfahrens,“ *In Component Failures by Microdefects*, 1998.
- [42] A. Purde, *Speckle-Interferometrie zur Formvermessung un stetiger Oberflächen*, Technischen Universität München, 2006.
- [43] unknown, „Brown University School of Engineering,“ [Online]. Available: <http://mesh.brown.edu/3DP-2012/assignments.html>. [Zugriff am 18 Mai 2018].
- [44] Anton, „Wikimedia,“ Oktober 2014. [Online]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9d/Lochkamera_prinzip.jpg. [Zugriff

- am 2018 Mai 2018].
- [45] T. Luhmann, S. Robson, S. A. Kyle und I. A. Harley, Close range photogrammetry: principles, techniques and applications, Whittles, 2006.
- [46] 3. Scanexpert, „3d Scanexpert,“ [Online]. Available: https://3dscanexpert.com/wp-content/uploads/realitycapture_review_header-525x300.x92699.jpg. [Zugriff am 23 Mai 2018].
- [47] R. Lange, „3D time-of-flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS/CCD-technology,“ *Dissertation Uni Siegen*, pp. 17-18, 2006.
- [48] C. Steger, M. Ulrich und C. Wiedemann, Machine vision algorithms and applications, John Wiley & Sons, 2018.
- [49] R. Kreifeldt und e. al., „Bediensysteme mit Gestensteuerung Stand der Technik und Zukunft,“ *ATZechnik*, pp. 248-253, 2012.
- [50] A. Thoß, „Gesteuerung erlaubt intuitive Kommunikation,“ 30 Mai 2017. [Online]. Available: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/gesteuerung-erlaubt-intuitive-kommunikation-a-612475>. [Zugriff am 24 Mai 2018].
- [51] P. J. Besl und N. D. McKay, „Method for registration of 3-D shapes,“ *Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures*, pp. 586-607, 1992.
- [52] S. Rusinkiewicz und M. Levoy, „Efficient variants of the ICP algorithm. In 3-D Digital Imaging and Modeling,“ *3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 145-152, 2001.
- [53] H. Annuth, „Dreiecksvermaschung von Punktwolken durch Smart Growing Cells,“ FH Wedel, 2011.
- [54] S. Fortune, „Voronoi diagrams and Delaunay triangulations.,“ *Computing in Euclidean geometry*, pp. 225-265, 1995.
- [55] P. f. G. u. Geoinformatik, „Geoinformatik-Service,“ Uni Rostock, 2001-2016. [Online]. Available: <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/einzel.asp?ID=477>. [Zugriff am 5 Juni 2018].
- [56] J. R. Shewchuk, „Triangle: Engineering a 2D quality mesh generator and Delaunay triangulator,“ *Applied computational geometry towards geometric engineering*, pp. 203-222, 1996.
- [57] Etzel, „Wikipedia,“ 30 Juli 2009. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Delaunay-Triangulierung#/media/File:Delaunay-Triangulation.svg> . [Zugriff am 5 Juni 2018].
- [58] M. Traeger, A. Eberhart, G. Geldner, A. M. Morin, C. Putzke, H. Wulf und L. H. J. Eberhart, „Künstliche neuronale Netze,“ *Der Anaesthetist*, pp. 1055-1061, 2003.

- [59] A. Scherer, Neuronale Netze: Grundlagen und Anwendungen, Springer-Verlag, 2013.
- [60] P. Bourke, „Data Formats: 3D, Audio, Image,“ [Online]. Available: <http://paulbourke.net/dataformats/obj/>. [Zugriff am 11 Juni 2018].
- [61] D. F. Rogers, „An Introduction to NURBS With Historical Perspective,“ *Academic Press*, 2001.
- [62] L. Piegl und W. Tiller, *The NURBS Book. Monographs in Visual Communication*, Springer, 2000.
- [63] unknown, „Pinterest,“ [Online]. Available: <https://i.pinimg.com/originals/25/36/47/253647eefa89172d7bdb9347d4101f96.jpg>. [Zugriff am 8 Juni 2018].
- [64] P. Fastermann, „Grundlagen und Hintergrund zum 3D-Druck,“ in *3D-Druck/Rapid Prototyping*, Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 7-28.
- [65] just3dp.com, „Was ist eine STL-Datei?,“ just3dp.com, Oktober 2016. [Online]. Available: <https://www.just3dp.com/blog/post/3d-stl-files-fuer-den-3d-druck/>. [Zugriff am Juni 2018].
- [66] T. C. Lueth und F. Irlinger, „Berechnete Erzeugung von dreidimensionalen Oberflächenmodellen im STL-Format aus der Beschreibung planarer Mechanismen für die generative Fertigung durch selektives Lasersintern,“ *Kolloquium Getriebetechnik*, pp. 267-28, 2013.
- [67] A. Kulischkin, M. Tuscher, N. Kleinhans und J. Koß, „Unified 3D Printing Platform U3DP,“ [Online]. Available: https://www.informatik.uni-stuttgart.de/studium/interessierte/bsc-studiengaenge/informatik/projekt-inf/2016-06-03/Gruppe_8.pdf. [Zugriff am 8 Juni 2018].
- [68] makeralot.com, „MAKERLOT - Maker Tools and Materials,“ makeralot.com, [Online]. Available: <https://www.makeralot.com/nema17-stepper-motor-34mm-133a-36ozin-18-p296/>. [Zugriff am Juni 2018].
- [69] skf.com, „Axial-Rillenkugellager, einseitig wirkend,“ SKF, [Online]. Available: <http://www.skf.com/de/products/bearings-units-housings/ball-bearings/thrust-ball-bearings/single-direction/index.html?designation=51105>. [Zugriff am Juni 2018].
- [70] skf.com, „Schräggugellager, einreihig,“ SKF, [Online]. Available: <http://www.skf.com/de/products/bearings-units-housings/ball-bearings/angular-contact-ball-bearings/single-row-angular-contact-ball-bearings/single-row/index.html?designation=7200%20BEP>. [Zugriff am Juni 2018].
- [71] www.skf.com, „Designation system,“ SKF, [Online]. Available: <http://www.skf.com/in/products/bearings-units-housings/ball-bearings/angular-contact-ball-bearings/single-row-angular-contact-ball-bearings/designation-system/index.html>. [Zugriff am Juni 2018].

- [72] M. Weigand, „Berechnung der Riemenlänge,“ in *Skriptum zur Vorlesung Machinelemente*, Wien, TU Wien, 2011, p. 373.
- [73] E. Foundation, „Eclipse - The Platform for Open Innovation and Collaboration,“ [Online]. Available: https://wiki.eclipse.org/IGES_file_Specification. [Zugriff am 8 Juni 2018].
- [74] G. Frankowski, „Funktionsweise der Streifenprojektion mit praktischen Beispielen,“ 24 Februar 2011. [Online]. Available: <http://docplayer.org/41145942-Funktionsweise-der-streifenprojektion-mit-praktischen-beispielen.html>. [Zugriff am 17 Mai 2018].
- [75] unknown, „uni-stuttgart,“ uni-stuttgart, [Online]. Available: http://www.ito.uni-stuttgart.de/img/img_forschung/3do/streifenprojektion/Triangulation.gif. [Zugriff am 8 Mai 2018].
- [76] marketsandmarkets.com, „marketsandmarkets.com,“ 2017. [Online]. Available: marketsandmarkets.com. [Zugriff am April 2018].
- [77] marketsandmarkets.com, „marketsandmarkets.com,“ marketsandmarkets.com, 2017. [Online]. Available: marketsandmarkets.com. [Zugriff am April 2018].