

# Entwicklung einer Methodik zur optischen Analyse spannkraftinduzierter Deformationen additiv gefertigter Bauteile

Niklas Thieme

1. Juli 2024

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung und Motivation</b>	<b>3</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>4</b>
2.1 Additive Fertigung . . . . .	4
2.2 Reverse Engineering . . . . .	4
2.3 3D Rekonstruktion . . . . .	5
<b>3 Ausgangssituation und Ziel der Arbeit</b>	<b>7</b>
3.1 Einspannproblematik . . . . .	7
3.2 Erfassung der spannkraftinduzierten Deformation . . . . .	7
<b>4 Experimentelle Validierung</b>	<b>8</b>
4.1 Datenerfassung . . . . .	8
4.2 Versuchsaufbau . . . . .	8
4.2.1 Limitierung der Achsen: . . . . .	9
4.2.2 Geschwindigkeit . . . . .	9
4.2.3 Endergebnis . . . . .	10
4.2.4 Zusätzliche Messinstrumente . . . . .	10
4.2.5 Pointclouds . . . . .	11
4.3 Pointcloud filtern . . . . .	15
<b>5 Stitching</b>	<b>17</b>
<b>6 Analyse der spannkraftinduzierten Deformation</b>	<b>18</b>
6.1 Aufgenomme Daten auswerten . . . . .	18
6.2 Deformationen erkennen . . . . .	18
<b>7 Algorithmus und Software</b>	<b>19</b>
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>20</b>

# **1 Einleitung und Motivation**

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Additive Fertigung

Additive Fertigung, unabhängig von dem Werkstoff, ist ein Bereich im dem viel geforscht und innoviert wird. In fast jedem Industriebereich wird versucht ein bestehendes Design oder Modell zu optimieren und verbessern. [BAB20] Sei es hinsichtlich Qualität oder Kosteneffizienz. Additive Fertigung bietet bei dieser Optimierung viele Vorteile gegenüber spanenden Fertigungsverfahren, da Additive Fertigung einen höheren Grad der Gestaltungsfreiheit bietet. Additive Fertigung ist eine Ressource den Benutzern ermöglicht komplexe Bauteilgeometrien zu erstellen ohne die Limitierung von konventionellen spanenden Herstellungsverfahren, wie hoher Materialverschleiß oder die Notwendigkeit von spezialisierten Werkzeugen. [VGRH21]

Außerdem können mit additiver Fertigung Stückzahlen drastisch reduziert werden. Werkstücke können bei Bedarf gefertigt werden, was die Notwendigkeit für Lagerstätten größtenteils eliminiert. Zusätzlich können die Teile genau dort hergestellt werden, wo sie benötigt werden, was Lieferketten und Wartezeiten verkürzt.

Verschiedene Werkstoffe können mit additiver Fertigung (AF) benutzt werden, darunter sind Polymeren, Metalle und Keramik. Metalle haben vor allem in den letzten Jahren an Relevanz gewonnen. Zusätzlich zu den schon genannten Vorteile von AF, bietet Metall als Werkstoff noch mehr Nutzen in der Industrie. Gegenüber Kunststoffen produziert Metall weniger Abfall und kann eine höhere Qualität gewährleisten. Zusätzlich dazu kommen die offensichtlichen Vorteile von Metall gegenüber Polymeren: höhere Hitzebeständigkeit und eine stabilere Grundstruktur, was sie weniger anfällig für Verformungen macht.

Aufgrund dieser Vorteile wird AF in vielen Industriebereichen genutzt. Die folgende Sektion zeigt einige Fälle in denen AF erfolgreich benutzt wurde.

#### Automobil-Branche

Eine der führenden Branchen in der AF-Entwicklung ist die Automobil-Branche. Durch den Herstellungsprozess könne Teile gefertigt werden die leichter, belastbarer und sicherer sind. Die einfache Anpassbarkeit für geringen Entwicklungszeiten und Kosten. BWM zum Beispiel benutzt für den i8 Roadster viele AF gefertigte Teile. Darunter die Befestigung für das Soft-Top, die 44 % leichter als das Spritzgussteil ist, und dennoch 10 Mal steifer. [VGRH21] Die Führung für das Fenster wurde auch additiv gefertigt, durch den "HP Multi Jet Fusion" konnten 100 Teile in 24 Stunden gefertigt werden. Selbst teile des Zylinderkopfs für den S58 Motor sind auch additiv gefertigt. [Anu19]

Auch bei älteren Fahrzeugen kann additive Fertigung Verwendung finden. Gerade bei älteren Fabrikaten sind Ersatzteile häufig nicht mehr vom Erstzulieferer zu beschaffen oder mit konventionellen Herstellungsmethoden wirtschaftlich herzustellen. Hier wurde zum Beispiel die rechte Kotflügelhalterung für ein Matra 530 aus 1973 erfolgreich hergestellt, nachdem auch nach längerem suchen kein Originalteil gefunden wurde [AM 24]. Zusätzlich war bei diesem Beispiel die Herausforderung, das keine digitale Version des Bauteils existiert hat. Zuerst musste das also als Grundlage für die additive Fertigung erzeugt werden. Dies bringt mich zu meinem nächsten Punkt:

### 2.2 Reverse Engineering

Reverse Engineering beschreibt dem Prozess aus einem bestehenden Produkt oder Objekt ein digitales Abbild zu erzeuge [HL21]. Dabei sind meistens wenig oder keine technischen Details über das Objekt verfügbar. Gründe dafür können sein das der ursprüngliche Hersteller die Baupläne nicht veröffentlicht hat, um nicht der Konkurrenz in die Hände zu spielen. Auch denkbar ist ein militärischer Hintergrund, hier werden die Baupläne aus offensichtlichen Gründen auch nicht

öffentlich zugänglich sein. Das ist zum Beispiel in der Luftfahrtbranche, unter anderem bei dem Hersteller Boeing, der Fall. Selbst wenn Baupläne vorhanden sind kann es trotzdem notwendig sein Reverse Engineering zu betreiben, denn das tatsächliche Produkt kann von den Bauplänen abweichen, zum Beispiel durch jahrelange Benutzung oder Toleranzen in der Herstellung. Wenn technische Details vorhanden sind, können diese aber im Reverse Engineering Prozess verwendet werden. Hier wird dieser Prozess beschrieben wie mithilfe einer Kombination von originalen Bauplänen und 3D Laser Scanning ein möglichst genaues digitales Abbild erzeugt werden kann [MSS21]. In dem Paper wird der Ansatz des Reverse Engineering genutzt um bestehende Bauteile passgenau erweitern zu können. Konkret geht es um die Entwicklung einer Methodik um automatisiert Laser-Scans und originale Baupläne zusammenzufügen um ein möglichst detailgetreues Abbild der realen Struktur zu erzeugen. Dieses Abbild wird dann benutzt, um die bestehende Struktur zu erweitern und auf ihr aufzubauen. Das wird am Beispiel eines Flugzeugs demonstriert, erst wird der Innenraum gescannt und mit dem originalen Plänen abgeglichen, dann ein 3D Objekt erstellt. Mithilfe dieses 3D-Objekts können dann passgenaue Bauteile hergestellt werden, die es ermöglichen ein ehemaliges Passierflugzeug zu einer Frachtmaschine umzubauen. Wie schon erwähnt wird zur erfolgreichen Weiterbearbeitung ein möglichst genaues digitales Abbild benötigt. Ist dies nicht der Fall müssen nicht passende Teile erneut hergestellt werden, was die Material- und Personalkosten deutlich erhöht. Es ist also im wirtschaftlichen Interesse beim ersten Schritt, dem Erstellen der digitalen Version, sehr genau und gewissenhaft vorzugehen um ein möglichst genaues Ergebnis zu erzielen. Um eine digitale Version zu erstellen, existieren verschiedene Verfahren. Auf einige werde ich im nächsten Abschnitt genauer eingehen.

## 2.3 3D Rekonstruktion

Digitale Abbildungen von Flächen, Objekten oder sogar Körperteilen wurden in den letzten Jahren mehr und mehr benutzt. Anwendungen sind zum Beispiel in der geometrischen Dokumentation, Inspektion, Navigation, Visualisierung und Objekterkennung zu finden [VI23]. Je nach Anwendungsfall wird eine bestimmte Akkuranz der Daten erwartet, im Medizinischen Bereich sind die Ansprüche natürlich ganz andere als zum Beispiel in der Dokumentierung von ganzen Gebirgszügen. Aus diesem Grund existieren auch verschiedene Herangehensweisen und Technologien zur 3D-Rekonstruktion. 3D Rekonstruktion-Technologien können in 2 Kategorien eingeteilt werden, die bildbasierte Verfahren und die Verfahren die auf Scandaten beruhen. [VI23] Beide Verfahren können auch kombiniert werden. Bei bildbasierten Verfahren, auch Photogrammetrie genannt, wird das 3D Objekt aus mehreren 2D Bildern erstellt, umso mehr Bilder vorhanden sind umso besser kann das 3D Objekt rekonstruiert werden. Um das 3D Objekt zu erstellen werden in allen Bildern gemeinsame Punkte gesucht und dann mit der bekannten Kameraposition, die relative Position des Punktes im 3D Objekt ermittelt. Figur x zeigt dies anschaulich. Vorteile der Photogrammetrie sind die relativ einfache Aufnahme der Daten, schon ein Smartphone mit Kamera kann ausreichend hochauflösende Bilder aufnehmen, um eine 3D-Rekonstruktion zu ermöglichen. Des Weiteren sind viele Softwarelösungen auch kostenlos vorhanden um automatisiert 3D Objekte, auch ohne viele Vorkenntnisse, zu erzeugen. Gründe sich gegen die Photogrammetrie zu entscheiden ist die doch limitierte Auflösung beziehungsweise steigt der Arbeitsaufwand drastisch umso akkurater das Endergebnis sein soll. Auf der anderen Seite glänzt die Photogrammetrie aber bei 3D Rekonstruktionen im großen Stil wie zum Beispiel bei Gebäuden, Stadtteilen oder Geografischen Strukturen.

Die Akkuranz bei der Photogrammetrie kann dabei, bei großen Objekten, in der Größenordnung Zentimeter liegen [LHYJ23]

Bei kleinen Objekten, wenn eine hinreichende Akkuranz gefordert ist sollte man deswegen zum 2. Verfahren greifen. Hier sind die Ursprungsdaten schon dreidimensional mit einem Scanner aufgenommen. Um an diese Daten zu kommen, misst ein Scanner, meistens mithilfe von Licht-

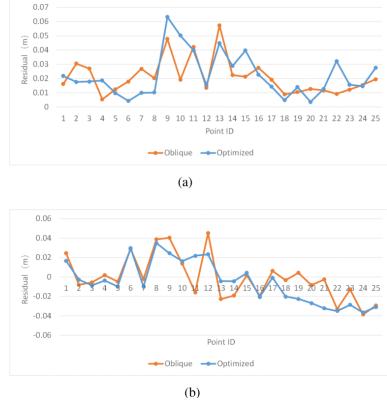


Abbildung 1: Accuracy Photogrammetry

strahlen, den Abstand zu einem Punkt auf dem zu rekonstruierenden Objekt. Dann wird entweder das Objekt oder der Scanner bewegt, um so möglichst viele Scan punkte aufzunehmen. Je mehr Punkte vorliegen, desto genauer wird das Ergebnis, allerdings steigt auch die vorhandene Datenmenge mit, ab einem Punkt kann der verfügbare Speicher ein limitierender Faktor sein. Außerdem steigt die Rechenzeit auch mit der Datenmenge, je nach anschließendem Verfahren sogar exponentiell.

Nachteile von diesem Verfahren sind die hohen initialen Kosten eines Scanners und der begrenzte Messbereich.

### **3 Ausgangssituation und Ziel der Arbeit**

#### **3.1 Einspannproblematik**

#### **3.2 Erfassung der spannkraftinduzierten Deformation**

## 4 Experimentelle Validierung

### 4.1 Datenerfassung

Ziel ist ein Verfahren zu entwickeln, das ein digitales Abbild von einem realen Objekt erstellen kann. Als Grundlage für dieses Abbild arbeite ich in diesem Fall mit Pointclouds, die mithilfe eines Laserscanners aufgenommen wurden. Auch andere Möglichkeiten Pointclouds zu erhalten sind denkbar und sollten mit dem Verfahren kompatibel sein. In den folgenden Absatz werde ich das Erstellen von Pointclouds mithilfe eines Laserscanners erläutern und auf ein Verfahren eingehen, dass aus den Pointclouds digitale Objekte erstellt, die miteinander verglichen werden können.

### 4.2 Versuchsaufbau

In Abbildung 2 ist der Versuchsaufbau zur Datenerfassung zu sehen. Alle wichtigen Bestandteile sind nummeriert. Es folgt eine kurze Benennung aller vorhandenen und notwendigen Teile:

- 1: Schraubstock Backen
- 2: Demonstratorbauteil
- 3: Scannerhalterung
- 4: Scanner LLT 30x0-25
- 5: Verschiebungsmesser
- 6: Laserlinie (Lila)
- 7: Schraubstock mit Kraftmesser
- X: x-Achse
- Y: y-Achse
- Z: z-Achse

Der Scanner ist an dem Werkzeugkopf einer CNC-Fräse befestigt und wird in Richtung der X und Y Achse verschoben. So kann von dem kompletten Bauteil eine Pointcloud aufgenommen werden.

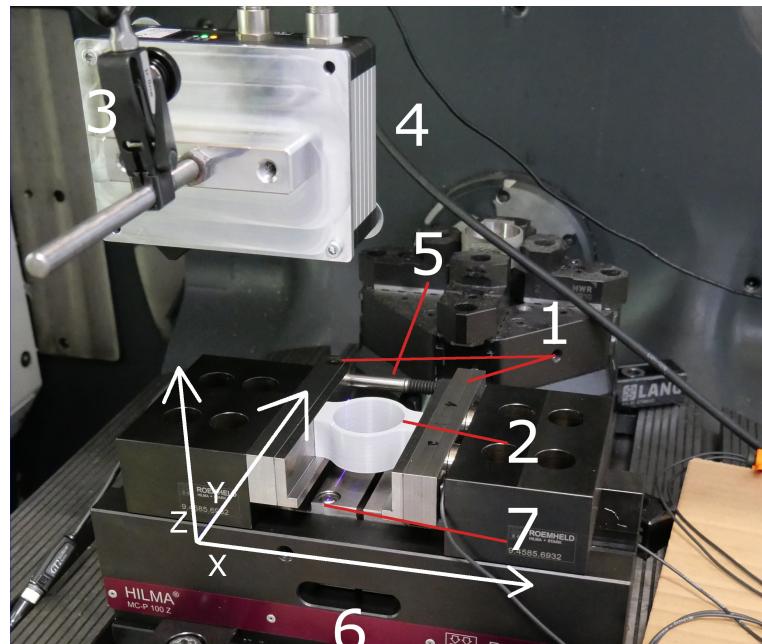


Abbildung 2: Versuchsaufbau

#### 4.2.1 Limitierung der Achsen:

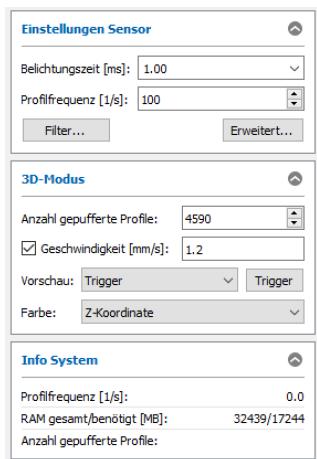


Abbildung 3: Scanparameter

Die gesamte Länge des Objekts kann also erfasst werden, indem Scanner beziehungsweise Werkzeugkopf in X-Richtung verschoben wird. Mit dem Start der Bewegung muss auch die Aufzeichnung der Scannerdaten beginnen. In unserem Fall wurde die Datenerfassung manuell per Hand im richtigen Zeitpunkt über die Software 'SCANControl' von micro-epsilon gestartet. Eine mögliche Verbesserung ist es, diesen Vorgang zu automatisieren, indem der Scanner automatisch mit dem Start der Bewegung getriggert wird und die Aufzeichnung startet. Die Länge der Aufzeichnung wird auch über die Software eingestellt. In Abbildung 3 sind die korrekten Parameter für das Demonstratorbauteil zu sehen. Über den Parameter 'Anzahl gepufferte Profile' kann die Länge der Aufzeichnung eingestellt werden. Limitiert wird dieser Parameter durch den verfügbaren Speicher auf dem Zielsystem. Es sollte auch darauf geachtet werden, dass der Scanner mindestens genauso lange bewegt wird wie die Aufzeichnung läuft, ist dies nicht der Fall entsteht eine Pointcloud die einmal größer als notwendig ist, und außerdem am Ende der x-Achse nur wiederholende Profile beinhalten. Die y-Achse der Pointcloud wird durch den eingesetzten Scanner limitiert.

Der Scanner hat Abhängig vom Modell und der angebrachten Höhe eine fixe Länge die er aufnehmen kann. In unserem Fall wurde der Scanner 'LLT 30x0-25' verwendet, der eine mittleren Messbreite von 25 mm bietet. In Abbildung 4 ist dieser Messbereich sichtbar. Mittig kann in einer Tiefe von 85 mm eine Linie mit der Länge 25 mm gemessen werden. Der komplette messbare Bereich ist rot markiert. [MES20] Bauteile mit einer größeren Länge in Y-Richtung können also nicht in einer Pointcloud erfasst werden. Damit eine Digitalisierung von größeren Objekten erfolgen kann, müssen also mehrere Scans durchgeführt, und später zusammengefügt werden. Zwischen den Scavorgängen muss der Scanner in Y-Richtung verschoben werden. Die Länge der Verschiebung sollte kleiner als die Scannerbreite sein, damit eine Überlappung entsteht, die genutzt werden kann, um die Pointclouds wieder zusammenzufügen. Die Verschiebung kann beliebig klein gewählt werden, jedoch steigt der Arbeitsaufwand und die Dateigröße mit jeder zusätzlichen Pointcloud, während das Ergebnis sich nicht verbessert. So können Pointclouds aufgenommen werden die dann in dem zu entwickelnden Verfahren wieder zu einem digitalen Abbild zusammengefügt werden.

#### 4.2.2 Geschwindigkeit

Der Parameter 'Geschwindigkeit' in Abbildung 3 muss der realen Vorlaufgeschwindigkeit des Scanners entsprechen, um eine korrekte und akkurate Pointcloud zu erhalten. Ist die Messgeschwindigkeit kleiner als die Bewegung des Scanners, werden Profile doppelt aufgenommen, ist sie zu hoch, werden Profile übersprungen und das Bauteil wirkt in der resultierende Pointcloud in X-Richtung gestreckt.

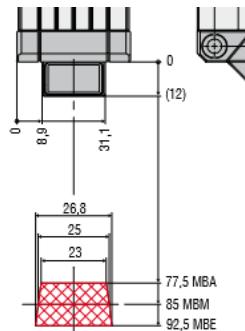


Abbildung 4: Scanner

#### 4.2.3 Endergebnis

Ist dieser Prozess erfolgreich erhält man eine Pointcloud der Oberfläche des Objekts. In Abbildung 5 ist eine solche Pointcloud eines einzelnen Scanverlaufs dargestellt. In Abbildung 6 ist eine Nahaufnahme des mittleren Teils derselben Pointcloud zu sehen. Hier sind die einzelnen Punkte sichtbar und man kann erkennen wie die Oberfläche aus tausenden Punkten aufgebaut ist. Bei einem Messbereich von 25 mm und 2048 Punkten pro Profil [GK20] sind das mehr als 80 Punkte pro mm in einem y-Achse-Profil. Zusätzlich kann man im rechten oberen Bereich Ausreißer sehen, warum diese das Verfahren erschweren und wie man sie entfernen kann folgt in den kommenden Kapiteln. Außerdem werde ich auch auf die Struktur von Pointcloud Dateien noch eingehen.

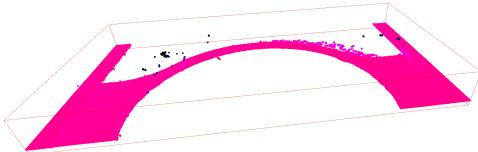


Abbildung 5: Pointcloud

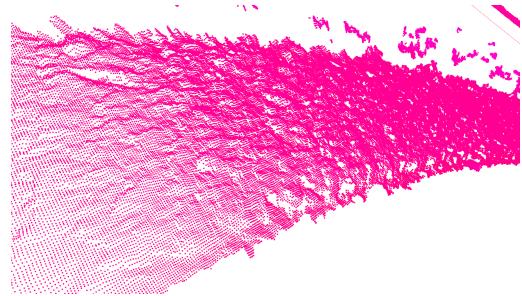


Abbildung 6: Nahaufnahme Pointcloud

#### 4.2.4 Zusätzliche Messinstrumente

Zusätzlich zu dem Scanner werden noch mit weiteren Messinstrumenten Daten erfasst. In Abbildung 2 unter der Nummer 5 ist ein mechanischer Verschiebungsmesser zu sehen. Dieser misst die Verschiebung der Backen des Schraubstocks. Der Schraubstock misst zusätzlich mit viel Kraft die Backen aufeinander pressen.

Hierzu wird die piezoelektrische Kraftmesstechnik verwendet. Bei Krafteinwirkung auf Piezokristalle (z. B. Quarz, Bariumtitanat, BaTiO<sub>3</sub>) werden im Kristallgitter negative gegen positive Gitterpunkte verschoben, sodass an den Kristalloberflächen Ladungsunterschiede Q als Funktion der Kraft F gemessen werden. Piezoelektrische Kraftaufnehmer sind mechanisch sehr steif, sie erfordern Ladungsverstärker zur Messsignalverarbeitung und sind hauptsächlich zur Messung dynamischer Vorgänge mit einer kleineren Frequenz als 1 Hz geeignet. [CD20]. Diese Kraftmesstechnik ist für unseren Einsatzzweck gut geeignet da sie eine hohe Empfindlichkeit bietet und in vielfältigen Formen und Größen hergestellt werden kann. Zur Aufbereitung der Ladung, die der piezoelektrische Sensor, liefert wurde ein Ladungsverstärker eingesetzt. [Sch06] Dieser ist in Spannungsverstärker ist in Abbildung 8 unten zu sehen.

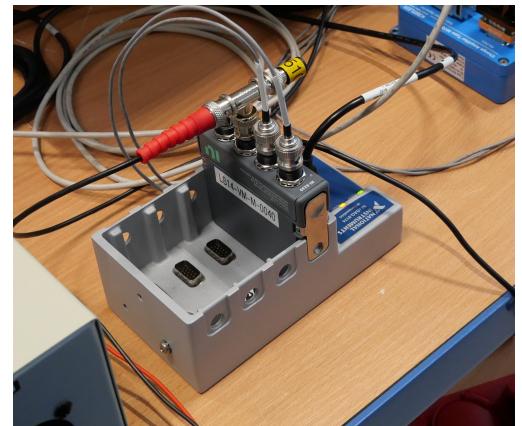


Abbildung 7: Spannungswandler

Damit die Scanner-Ergebnisse überprüft werden können, wird die Bauteilgeometrie zusätzlich nach dem Scanvorgang noch mit einem Taster abgetastet. Hierfür wird der Werkzeugkopf gewechselt und der Scanner entfernt. Dann wird der Taster in die CNC-Maschine eingesetzt und das Bauteil abgetastet. In Abbildung 8 ist das Tasterwerkzeug zu sehen. Die rote Kugel am Ende des Tasters erkennt, sobald eine Berührung zu dem Bauteil erfolgt ist und benachrichtigt den Steuerungsrechner. Dieser speichert die aktuelle Position dann in einer Protokolldatei.



Abbildung 8: Taster

#### 4.2.5 Pointclouds

Bevor ich mich aber mit dem Zusammenfügen von mehreren Pointclouds beschäftige, möchte ich auf die Datenstruktur von Pointclouds eingehen. Wie der Name schon sagt bestehende Pointclouds aus Punkten. In unserem Fall ca. 3 Millionen für eine einzelne Bewegung in X-Richtung. In jedem Punkt sind mindestens 3 Koordinaten gespeichert, eine X und Y Koordinate relativ zu Ursprung der Pointcloud und eine Z Koordinate in der die Höhe gespeichert wird. Der Ursprung der Pointcloud liegt am Laserausgang des Scanners.

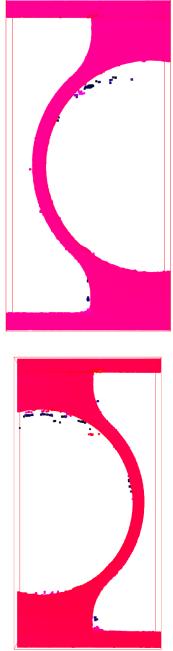


Abbildung 9:  
Demonstrator-  
bauteil

Zusätzlich ist für jeden Punkt auch noch eine Farbe als RGB-Farbwert (3 Werte von 0 bis 255) gespeichert. Die Farbe wird relativ zu der Höhe berechnet. Punkte bekommen einen Farbwert zugewiesen je nachdem wie nah sie an dem Minimum oder Maximum der Z-Koordinate sind. In 5 ist die komplette Pointcloud eines Demonstratorbauteils zu sehen, zusammen mit einer Bounding-Box, durch diese werden die Randpunkte der Pointcloud visuell dargestellt. Man sieht außerdem das unten liegende Punkte hell und weiter oben liegende Punkte dunkler dargestellt werden. Unterhalb ist eine Nahaufnahme des Mittelstücks des gleichen Bauteils zu sehen. Hier sind die einzelnen Punkte sichtbar.

Die Koordinaten sind als Float gespeichert haben keinerlei Bezug zueinander. Das heißt die X und Y Koordinaten sind nicht zum Beispiel anhand eines Netzes angelegt, sondern können einen beliebigen Abstand zwischen einander haben. Das werden wir auch später in der weiteren Bearbeitung der Pointclouds sehen.

Wenn nun also alle Pointclouds für ein Objekt erfasst wurden, kann zu dem 2. Schritt des Verfahrens übergegangen werden. Hier müssen die Daten zusammengefügt werden. Hierfür existieren in der Literatur schon verschiedene Verfahren, ein besonders beliebtes ist der ICP-Algorithmus. Dieser Algorithmus existiert schon seit dem Beginn der 90er Jahre und ist die klassische Methode, wenn es um die Registrierung von Pointclouds und anderen Punkt-Sets geht. [ZYD22, ] Der Algorithmus errechnet eine lokale, optimale Transformation die ein Datenset dem anderen annähern kann. [BM92] Um diese Transformation zu bestimmen werden zuerst die Distanzen von allen Punkten in Datenset A zu dem jeweils nächsten Punkt in Datenset B aufsummiert werden. Dann wird eins der Datensets verschoben und rotiert und wieder die Distanzen gebildet. Dies wird so lange gemacht bis die Änderung der Distanzen konvergiert. Die entstehende Transformation ist dann optimal. Für identische Datensets die sich nur in einer Transformation und Rotation unterscheiden, funktioniert dieser Algorithmus sehr gut. Bei Datensätzen die Messfehler oder Überlappungen beinhalten kann häufig keine optimale Transformation bestimmt werden.

Deswegen wurden seit der ersten Vorstellung des Algorithmus viele Varianten entwickelt, die

mit diesem Schwächen umgehen. Zum Beispiel der 'Sparse Iterative Closest Point' Algorithmus von [BTP13] oder die 'Anderson-accelerated' Version die besser mit Ausreißern und nur partiell überlappenden Daten umgehen kann und eine gleichwertige oder bessere Transformation errechnen kann. [ZYD22]

Aufgrund der Versprechen dieser Varianten und weil dieser Algorithmus in vielen Open-Source Bibliotheken schon implementiert ist, war das auch mein erster Ansatz und ich habe mir Hoffnungen gemacht, dass das Zusammenfügen der Pointclouds damit schnell abgehakt ist. Dafür habe ich die Methode der Global Registrierung aus der Open3D Bibliothek genutzt die auf dem Paper von Qian-Yi Zhou, Jaesik Park und Vladlen Koltun basiert. [ZPK] Das Globale Registrierung Verfahren wird vor dem ICP-Algorithmus benutzt um eine erste, initiale Transformation zu erstellen, die der IPC-Algorithmus im ersten Schritt braucht.

Das Problem bei dieser Methodik und unserem Datensatz ist, das beide Hälften des Demonstratorbauteils symmetrisch sind. In dem Verfahren wird nicht nur eine Transformation anhand der X, Y und Z Achsen eingesetzt, sondern auch eine Rotation der Pointcloud. Wie man in Abbildung 9 sehen kann überlappen die beiden Pointclouds schon fast zu 100 Prozent, wenn eine Pointcloud um 180 Grad gedreht, und über die andere gelegt wird. Auf dieses Ergebnis ist auch das Global Registrierungsverfahren gekommen. Für unseren Fall ist also ein Verfahren nötig was ausschließlich eine Transformation in X und Y Richtung benutzt. Das sind auch die einzigen Achsen, in der sich der Scanner bewegt hat.

## Wahl des Demonstratorbauteils

Man könnte sich jetzt hier die Frage stellen, warum das Demonstratorbauteil dann so gewählt und entworfen wurde das es symmetrisch ist. In dem ersten Schritt des zusammenfügen ist die Bauteilgeometrie zwar hinderlich, dafür profitiert die Spannkraftdeformationserkennung von dem initial runden Innenkreis des Bauteils. Zusätzlich soll das hier zu entwickelnden Verfahren auf viele Bauteilgeometrien anwendbar sein und somit nicht durch eine Symmetrie beschränkt werden.

## Weitere Verfahren

Nachdem die globale Registrierung und der ICP-Algorithmus auf den Pointclouds nicht anwendbar waren musste ein anderes Verfahren her. Aufgrund weniger schon existieren Verfahren die eine reine Bewegung auf nur 2 Achsen verwenden habe ich eine Idee entworfen, die auf dem ICP-Algorithmus basiert, um 2 Pointclouds zu vergleichen und zu verschieben. Hierfür habe ich die Pointclouds in ein zweidimensionales Array mit den Z-Werten als Inhalt konvertiert. Nun kann die euklidische Distanz der Z-Werte und jedem X und Y Wert aufsummiert werden. In einem naiven Ansatz kann dann eine Pointcloud entlang der Länge und Breite der anderen Pointcloud bewegt werden und für jede Transformation die Summe der Distanzen gespeichert werden. Die Idee war das die Transformation mit der kleinsten Summe die besten Überlappungen der beiden Pointclouds ist. Das hat aber nicht funktioniert. Durch die tatsächliche relativ kleine Überlappung ist die Summe der Distanzen nicht bei der korrekten Transformation minimal, sondern, wenn die Pointclouds maximal übereinander geschoben sind. Zusätzlich war die Verschiebung und Berechnung der zweidimensionalen Arrays rechenintensiv und hat zu langen Laufzeiten geführt. Also habe ich dieses Verfahren wieder aufgeben mit einer neuen Idee:

## Pointcloud in Bild konvertieren

Um Rechenzeit zu sparen und auf viele Funktionen von schon bestehenden Bilderkennungs-Bibliotheken zurückgreifen zu können habe ich die Pointclouds in ein Bild konvertiert. Hierfür wird zuerst in leeres Bild mit den gleichen Maßen einer Pointcloud erstellt. Dann wird über alle Punkte der Pointcloud iteriert und jeweils der Pixel an der X und Y Koordinate des Punktes auf einen Helligkeitswert gesetzt. Um Rechenzeit und Speicherkapazitäten zu schonen, und weil es für die Berechnung ausreichend ist, habe ich mich für 8 Bit Single-Channel Bilder die nur Helligkeitswerte abbilden entschieden. Hier kann also jede Pixel einen Wert zwischen 0 und 255 annehmen. Der entsprechende Wert kann wie folgt berechnet werden:

Der resultierende Wert ist die Helligkeit, die dem Pixel zugewiesen wird.  $Z$  ist die Z-Koordinate des Punktes in der Pointcloud.  $min_y$  und  $max_y$  sind die Grenzen der Z-Koordinate, diese werden gebraucht um die Helligkeit relativ zu der Höhe zu berechnen.  $min_b$  und  $max_b$  sind die gewünschten Grenzen der Helligkeit. In unserem Fall sind  $min_b = 0$  und  $max_b = 255$  da ein 8 Bit Bild verwendet wird.

$$value_p = \frac{Z - min_y}{max_y - min_y} \cdot (max_b - min_b) + min_b$$

Abbildung 10: Berechnung Pixelwert

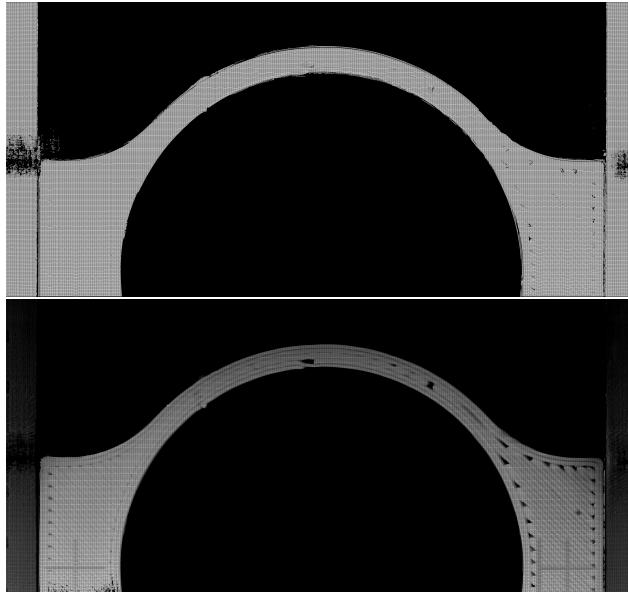


Abbildung 11: Konvertierung Pointcloud zu Bild

Wie man in Abbildung 11 sehen kann, sind kaum Helligkeitsveränderungen im Bild sichtbar. Das liegt an derselben Problematik, an der der ICP-Algorithmus häufig scheitert. Reale Datensets wie wir es vorliegen haben sind nicht perfekt, sondern beinhalten Messfehler und Streuungen.

Abbildung 12 zeigt die Häufigkeit der gleichen Höhenwerte einer Pointcloud von dem Demonstratorbauteil. In Blau ist die Verteilung der Punkte auf einem Demonstratorbauteil zu sehen das aus Metall gedruckt wurde, Orange zeigt die Verteilung der Punkte auf einem Kunststoffteil. In dem oberen Histogramm sind die Häufigkeiten der Höhenwerte zu sehen. Der Datensatz wurde in 500 gleich große Teile gruppiert, jeder Balken repräsentiert eine Gruppe. Unterhalb ist das Histogramm mit dem gleichen Datensatz, aber mit der y-Achse logarithmisch skaliert um kleine Prozente deutlich zu machen die im oberen Diagramm nur

schwer oder gar nicht sichtbar sind. Die meisten Höhenwerte treten bei ca. 80 beziehungsweise 85 auf, sie gehören zu den Punkten, die auf dem Demonstratorbauteil liegen, es treten allerdings auch Werte darunter und darüber auf. Die in Abbildung 10 vorgestellte Formel benutzt allerdings die absoluten Minimum und Maximum Werte. Alle Punkte die tatsächlich auf dem Bauteil werden also entsprechend wenig berücksichtigt. Dem kann Abhilfe geschaffen werden, indem Werte, die weniger häufig auftreten entfernt werden. Sortiert man alle Höhenwerte nach der Häufigkeit ihres Auftretens in der Pointcloud und entfernt den n-ten Prozentsatz können Ausreißer entfernt werden. Wenn nur die häufigsten 10 Prozent übernommen werden erhält man das untere Bild in Abbildung 11

Features auf dem Bauteil können jetzt deutlich besser erkannt werden. Auch zu sehen sind jetzt die Markierungen auf der linken und Rechten Seite die bei der Registrierung helfen sollen. Auch schön zu sehen sind die Spuren und Lücken die durch den FDM Herstellungsprozess entstehen.

Durch das Filtern der Höheninformationen sind Oberflächenstrukturen nicht nur besser erkennbar, auch die Ränder treten genauer hervor. Das ist sehr wichtig für das korrekte zusammenfügen.

Doch wo soll die Grenze gezogen werden, um die Oberfläche möglichst genau zu erkennen, aber nicht zu viele Höheninformation zu verlieren.

### 4.3 Pointcloud filtern

Ziel ist ein Verfahren zu entwickeln Verfahren bei allen gängigen Additiven Fertigungsmethoden angewendet werden kann. Das muss bei der Filterung der Daten berücksichtigt werden da die Datenverteilung von FDM Bauteilen anders aussieht als bei Metallenen Werkstoffen, muss eine Pointcloud so gefiltert werden, dass das Zusammenfügen unabhängig von dem gewählten Material zuverlässig funktioniert. Wie man in Abbildung 12 sehen kann streuen nicht alle Pointclouds gleich, abhängig von dem Werkstoff des Bauteils werden die Laserstrahlen unterschiedlich reflektiert und mehr oder weniger Ausreißer sind zu sehen. Man sieht das Metallteil deutlich mehr in beide Richtungen streut, während das FDM gedruckte Bauteil weniger nach oben, aber mehr nach unten streut. Es muss also eine Filtermethode gewählt werden die für alle Fertigungsverfahren anwendbar ist und nicht bei einer Methode besser funktioniert wie bei einer anderen. Werden zum Beispiel die 10 Prozent häufigst auftretenden Höhenwerte bei einem Metallteil benutzt kommt folgendes Bild heraus.

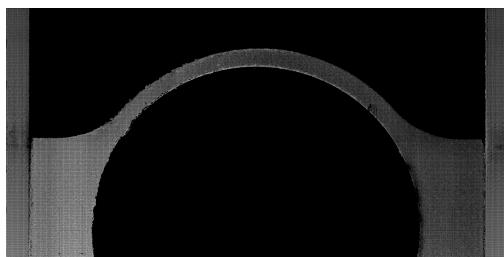


Abbildung 13: Metallteil gefiltert

übernehmen, kann auch noch die Pointcloud gefiltert werden. Hier kann ein einzelner Punkt relativ zu seinem Nachbarn im 3 dimensionalen Raum betrachtet werden, um so Ausreißer zu erkennen. Dafür sind in der Open-Source Bibliothek 'Open3D' 2 Methoden vorhanden: Radius basiert oder auf Basis von statistischen Werten, erste Methode eignet sich gut, wenn die Maße des Objekts bekannt sind. Hier wird um jeden Punkt eine Kugel gebildet und die Punkte die weniger als einen konfigurierbare Menge an Punkten in ihrer Kugel haben werden entfernt. Da das hier zu entwickelnde Verfahren sich nicht auf eine Bauteilgeometrie beschränken ist dieses Verfahren nicht geeignet. Stattdessen wird das andere benutzt. Hier werden die Punkte entfernt die weiter von ihren benachbarten Punkten entfernt sind als der durchschnittliche Abstand der Punkte in der ge-

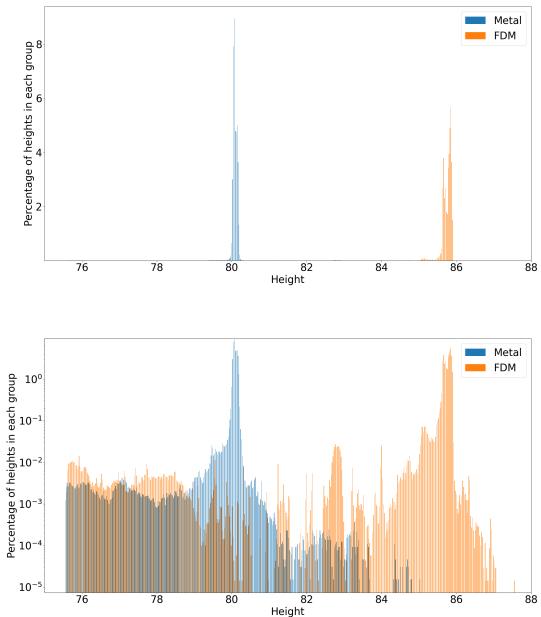


Abbildung 12: Auftreten Höhe

Man sieht vor allem auf der rechten Seite, dass Ränder nicht mehr klar erkennbar sind, da sie durch die Filterung Lücken aufweisen. Praxistest haben gezeigt das ein ausreichend gut funktionierender Filterwert 50 Prozent ist. Damit werden genug Messfehler aus dem Bild genommen aber trotzdem bleiben Oberflächenfeatures und Ränder sichtbar genug um ein korrektes Zusammenfügen zu gewährleisten. Dieses Filtern bezieht sich aber nur auf 2 dimensionale Bildinformationen. Um bei dem Konvertieren noch weniger Punkte die nicht auf dem Bauteil liegen nicht in das Bild zu

samten Pointcloud. Hier kann die Menge der benachbarten Punkte die betrachtet werden sollen und ein Limit für den Abstand von der Standardabweichung. Umso mehr benachbarte Punkte betrachtet werden, umso mehr Zeit braucht die Filterung, aber die Filterung wird auch akkurate. Im Praxistest haben sich hier 50 Nachbarpunkte bewährt. Mit diesem Wert werden bei Pointclouds in unserem Datensatz jeweils ca. 2 Prozent der Punkte entfernt. So kann das resultierende Bild gut genug umgewandelt werden, um eine erfolgreiche Zusammenführung von verschiedenen Bildern zu gewährleisten. Ein Nachteil bei der Filterung in Abbildung 11 links und rechts mittig zu sehen. Hier sind schwarze Punkte sichtbar. Diese treten auf, weil der Scanner hier über dem Bau teil Punkte erkannt hat. Durch das Filtern wurden diese Punkte entfernt beziehungsweise bei der Konvertierung nicht berücksichtigt. Da diese Punkte dann fehlen bleiben sie im resultierenden Bild schwarz. Das ist zwar etwas unschön anzuschauen, beeinträchtigt das zusammenfügen aber nicht weiter.

## **5 Stitching**

## **6 Analyse der spannkraftinduzierten Deformation**

### **6.1 Aufgenommene Daten auswerten**

### **6.2 Deformationen erkennen**

## **7 Algorithmus und Software**

## **8 Zusammenfassung und Ausblick**

## Literatur

- [AM24] AM Expo 365. 3d-druck: Neues leben für den oldtimer, 03.06.2024.
- [Anu19] Victor Anusci. Bmw's new s58 engine features cylinder head made with 3d printing, 2019.
- [BAB20] Vincent Benoit, Lionel Arnaud, and Maher Baili. A new method of design for additive manufacturing including machining constraints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111:1–12, 11 2020.
- [BM92] P.J. Besl and Neil D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2):239–256, 1992.
- [BTP13] Sofien Bouaziz, Andrea Tagliasacchi, and Mark Pauly. Sparse iterative closest point. *Computer Graphics Forum*, 32(5):113–123, 2013.
- [CD20] Horst Czichos and Werner Daum. Messgrößen und messverfahren. In Beate Bender, Dietmar Göhlich, and Heinrich Dubbel, editors, *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*, pages 693–732. Springer Vieweg, Berlin, 2020.
- [GK20] MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GmbH and Co. KG. scancontrol // 2d/3d laserprofil-sensoren. Y9760353-H042061GKE, 2020.
- [HL21] Robin H. Helle and Hirpa G. Lemu. A case study on use of 3d scanning for reverse engineering and quality control. *Materials Today: Proceedings*, 45:5255–5262, 2021.
- [LHYJ23] Qingquan Li, Hui Huang, Wenshuai Yu, and San Jiang. Optimized views photogrammetry: Precision analysis and a large-scale case study in qingdao. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16:1144–1159, 2023.
- [MES20] MICRO-EPSILON MESSTECHNIK. Präzision. - scancontrol // 2d/3d laser-profil-sensoren, 2020. <https://www.micro-epsilon.de/fileadmin/download/products/cat--scanCONTROL--de.pdf> [Accessed: 26.02.2024].
- [MSS21] Stephan Mönchinger, Robert Schröder, and Rainer Stark. Automated 3d scan based cad-repositioning for design and verification in one-off construction. *Procedia CIRP*, 100:530–535, 2021.
- [Sch06] Roman Schwartz. Kraft, masse, drehmoment. In Hans-Jürgen Gevatter, editor, *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*, VDI-Buch, pages 55–92. Springer, Berlin [u.a.], 2006.
- [VGRH21] Ana Vafadar, Ferdinando Guzzomi, Alexander Rassau, and Kevin Hayward. Advances in metal additive manufacturing: A review of common processes, industrial applications, and current challenges. *Applied Sciences*, 11(3):1213, 2021.
- [VI23] Styliani Verykokou and Charalabos Ioannidis. An overview on image-based and scanner-based 3d modeling technologies. *Sensors*, 23(2):596, 2023.
- [ZPK] Qian-Yi Zhou, Jaesik Park, and Vladlen Koltun. Fast global registration. volume 9906, pages 766–782.
- [ZYD22] Juyong Zhang, Yuxin Yao, and Bailin Deng. Fast and robust iterative closest point. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 44(7):3450–3466, 2022.