

Bachelorarbeit

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

Niklas Thieme

16. Juli 2024

Gutachter:

Name des Erstgutachters

Name des Zweitgutachters

Technische Universität Dortmund  
Fakultät für Informatik  
Lehrstuhlbezeichnung (LS-Nummer)  
<http://lsXXX-www.cs.tu-dortmund.de>

In Kooperation mit:  
Fakultätsname  
Lehrstuhl-/Institutsbezeichnung



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Einleitung und Motivation . . . . .	1
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Additive Fertigung . . . . .	3
2.2 Limitierungen von AF . . . . .	4
2.3 Reverse Engineering . . . . .	4
2.4 3D Rekonstruktion . . . . .	5
2.4.1 Digitales Abbild . . . . .	6
2.4.2 Scanner und Datenerfassung . . . . .	7
2.4.3 ICP-Algorithmus . . . . .	8
2.4.4 Zusätzliche Messinstrumente . . . . .	8
<b>3 Ziel der Arbeit</b>	<b>11</b>
3.0.1 Einspannproblematik . . . . .	11
3.0.2 Erfassung der spannkraftinduzierten Deformation . . . . .	11
3.0.3 Verfahren zur optische Spannkraftdeformationserkennung . . . . .	11
<b>4 Stitching</b>	<b>13</b>
4.0.1 Feature Erkennung . . . . .	13
<b>5 Datenaufbereitung</b>	<b>19</b>
5.0.1 Pointcloud filtern . . . . .	19
5.0.2 Pointcloud in Bild konvertieren . . . . .	21
<b>6 Analyse der spannkraftinduzierten Deformation</b>	<b>23</b>
<b>7 Algorithmus und Software</b>	<b>25</b>
<b>8 Validierung</b>	<b>27</b>
8.0.1 Versuchsaufbau . . . . .	27

<b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>29</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>31</b>
<b>Algorithmenverzeichnis</b>	<b>33</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>36</b>
<b>Erklärung</b>	<b>36</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Einleitung und Motivation



## Kapitel 2

# Stand der Technik

### 2.1 Additive Fertigung

Additive Fertigung (AF), 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. Sei es hinsichtlich Qualität oder Kosteneffizienz. AF bietet bei dieser Optimierung viele Vorteile gegenüber spanenden Fertigungsverfahren, da AF einen höheren Grad der Gestaltungsfreiheit bietet. AF 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.

Bauteile können mit verschieden Werkstoffen additiv gefertigt werden, darunter sind Polymeren, Metalle und Keramik. Metalle haben vor allem in den letzten Jahren an Relevanz gewonnen. Zusätzlich zu den schon genannten Vorteilen 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 der Automobilindustrie, in denen AF erfolgreich benutzt wird. Die Automobilbranche ist ein Bereich in der AF schon viel und erfolgreich eingesetzt wird: Durch AF können Teile gefertigt werden die leichter, belastbarer und sicherer sind. Die einfache Anpassbarkeit sorgt für geringen Entwicklungszeiten und Kosten. BWM zum Beispiel benutzt für den i8 Roadster viele AF gefertigte Teile. Darunter sind zum Beispiel die Be-

festigung für das Soft-Top, die 44% leichter als das Spritzgussteil ist, und dennoch 10 Mal steifer. [VGRH21] Fensterführungen wurde auch additiv gefertigt. Mithilfe des "HP Multi Jet Fusion" konnten 100 Teile in 24 Stunden gefertigt werden. Selbst Teile des Zylinderkopfs für den S58 Motor wurden additiv gefertigt. [Anu19]

Auch bei älteren Fahrzeugen können additive Fertigungsmethoden zur Reparatur oder Restauration verwendet werden. Gerade bei älteren Fabrikaten sind Ersatzteile häufig nicht mehr vom Erstzulieferer zu beschaffen oder mit konventionellen Herstellungsmethoden wirtschaftlich herzustellen. Bei einem Matra 530 aus 1973 wurde zum Beispiel die rechte Kotflügelhalterung erfolgreich reproduziert, nachdem auch nach längerer Suche kein Originalteil gefunden wurde [AM 24]. Zusätzlich war bei diesem Beispiel die Herausforderung, dass keine digitale Version des Bauteils existiert hat. Zuerst musste also ein Modell als Grundlage für die additive Fertigung erzeugt werden.

## 2.2 Limitierungen von AF

AF kann trotz seiner Vorteile nicht überall eingesetzt werden. Limitierungen in der Materialvielfalt, hohe Material und Anschaffungskosten, begrenzte Bauraumgrößen, verminderte Oberflächenqualität und aufwändige Nachbearbeitungen können einen Einsatz von AF verhindern beziehungsweise unwirtschaftlich machen. [AKS15] Einige dieser Limitierungen können umgangen oder gelöst werden. Zum Beispiel die verminderte Oberflächenqualität kann durch eine anschließende Fräsbearbeitung verbessert werden. Diese Nachbearbeitung macht eine Fixierung des Bauteils notwendig. Auch für andere Nachbearbeitungen wie das Entfernen von Stützstrukturen kann sich das fixieren positiv auswirken und Zeit im Herstellungsprozess eingespart werden.

## 2.3 Reverse Engineering

Reverse Engineering beschreibt den Prozess aus einem bestehenden Produkt oder Objekt ein digitales Abbild zu erzeugen [HL21]. Dabei sind meistens wenig oder keine technischen Details über das Objekt verfügbar. [HL21] Auch wenn Baupläne vorhanden sind, kann es trotzdem notwendig sein Reverse Engineering zu betreiben, denn das tatsächliche Produkt kann von den Bauplänen abweichen. Produkte und Bauteile können durch die Benutzung abgenutzt werden und entsprechen deswegen unter Umständen nicht mehr den originalen Bauplänen. Zusätzlich können Toleranzen im ursprünglichen Fertigungsprozess für Diskrepanzen sorgen. Wenn technische Details vorhanden sind, können diese aber im Reverse Engineering Prozess verwendet werden. [MSS21] Dieses Paper zeigt, wie Reverse Engineering genutzt werden kann, um bestehende Bauteile passgenau zu erweitern. 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 in eine Frachtmashine 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, ein möglichst genaues Ergebnis zu erzielen.

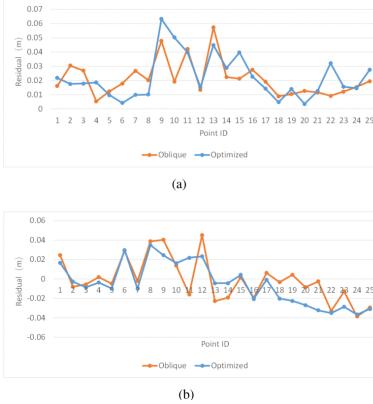
## 2.4 3D Rekonstruktion

Digitale Abbildungen von Flächen, Objekten oder sogar Körperteilen wurden in den letzten Jahren mehr und mehr benutzt. Anwendungen sind zum Beispiel in der geometrischem 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. Das Scannen von Gesichtstexturen zeigte Abweichungswerte zwischen 140 und 1330  $\mu\text{m}$ , während die 3D-Rekonstruktion des Kieferknorpels Werte zwischen 106  $\mu\text{m}$  und 760  $\mu\text{m}$  aufwies. Das Scannen eines bezahnten Bogens durch intraorale und laborbasierte Scanner variierte zwischen 17  $\mu\text{m}$  und 378  $\mu\text{m}$ . und bei der digitalen Abtastung von Zahnimplantaten zwischen 19,32 und 112  $\mu\text{mm}$  [.1624]. Bei Lidar-Scans eines Sportkomplexes wurde eine Standardabweichung von  $\pm 0.10\text{m}$  gemessen. Es wurde aus 600 Meter Höhe vermessen und die Scandaten mit Referenzpunkten auf dem Boden verglichen. [EAA23] Aus diesem Grund existieren auch verschiedene Herangehensweisen und Technologien zur 3D-Rekonstruktion. [.1624]

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]



**Abbildung 2.1:** Accuracy Photogrammetry

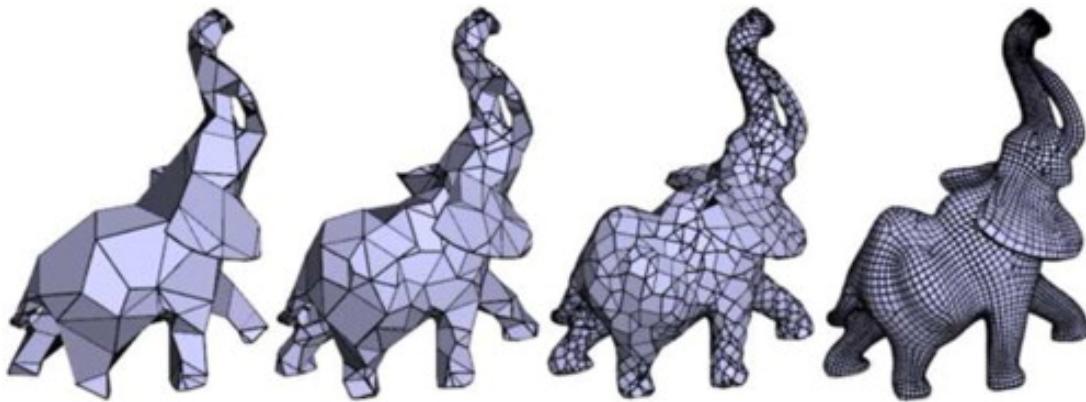
Bei kleinen Objekten, wenn eine hinreichende Akkuranz gefordert ist sollte man deswegen zum 2. Verfahren greifen. Hier sind die Ursprungsdaten schon dreidimensional mit einem Scanner aufgenommen. Um an diese Daten zu kommen, misst ein Scanner, meistens mithilfe von Lichtstrahlen, den Abstand zu einem Punkt auf dem zu rekonstruierenden Objekt. Dann wird entweder das Objekt oder der Scanner bewegt, um so möglichst viele Scanpunkte 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.

#### 2.4.1 Digitales Abbild

Das schon vorhandene oder erstellte 3D Objekt muss für die weitere Nutzung in einem geeigneten Datenformat gespeichert werden. Hierfür haben sich mehrere Formate etabliert. Die Geometrie eines Objekts wird häufig als Sammlung von Punkten gespeichert. Die Oberfläche eines Objekts wird als Serie von Polygonen beschrieben. Der Grad des Polygons kann variieren, häufig werden Dreiecke verwendet. Die Akkuranz mit der das Polygon-Netz die gewünschte Oberfläche abbildet kann gewählt werden. Je kleiner die Oberfläche der Polygone ist, desto genauer wird die Oberfläche abgebildet. Mit kleineren Oberflächen steigt die Anzahl der zu speichernden Eckpunkte, was eine größere Datei zur Folge hat. Ein in der akademischen Welt beliebtes Dateiformat für Polygon-Netze ist das Po-

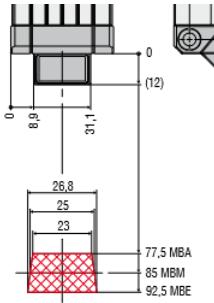
lygon File Format (ply).[KP08] Das Format kann vom Nutzer beliebig angepasst werden. Eine ply-Datei beginnt mit einem Header in dem die Inhaltsstruktur beschrieben wird. Für 3D-Objekte besteht diese meistens aus X, Y und Z Koordinaten. Zusätzlich können weitere Informationen gespeichert werden. Das ply Dateiformat unterstützt standardmäßig: "vertices/edges/faces, vertex colors, textures and material"[KP08]. Weitere Informationen können durch den Nutzer hinzugefügt werden, diese können dann aber unter Umständen nicht von anderen Programmen oder Benutzern benutzt werden. Im Dateiheader wird zu jedem Attribut auch der Datentyp festgelegt. Durch diesen kann die Akkuranz und Dateigröße beeinflusst werden. Häufig werden hier floats oder Integer in verschiedener Bit Tiefe gewählt.



**Abbildung 2.2:** Akkuranz des 3D Objekts ist abhängig von der Anzahl der Polygone

#### 2.4.2 Scanner und Datenerfassung

Datenerfassung durch einen Laserscanners. Der Scanner hat Abhängig vom Modell und der angebrachten Höhe einen limitierten Bereich den er erfassen kann. In unserem Fall wurde der Scanner 'LLT 30x0-25' verwendet der eine mittleren Messbreite von 25 mm bietet. In Abbildung 2.3 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 Scancvorgängen 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 entwickelnde Verfahren wieder zu einem digitalen Abbild zusammengefügt werden.



**Abbildung 2.3:** Funktionsweise eines Laserscanners

### 2.4.3 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]

### 2.4.4 Zusätzliche Messinstrumente

Zusätzlich zu dem Scanner werden noch mit weiteren Messinstrumenten Daten erfasst. In Abbildung 8.1 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.

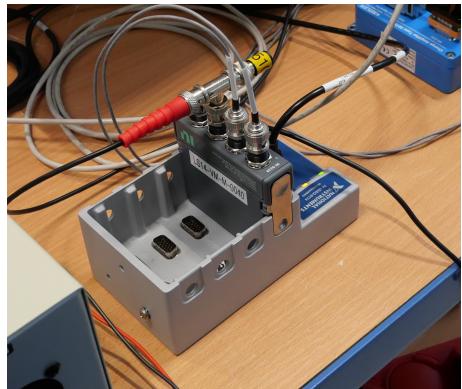
Hierzu wird die piezoelektrische Kraftmesstechnik verwendet. Bei Krafteinwirkung auf Piezokristalle (z. B. Quarz, Bariumtitanat, BaTiO<sub>3</sub>) werden im Kristallgitter negative gegen positive Gitterpunkte verschoben, sodass an den Kristalloberflächen Ladungsunterschiede Q als Funktion der Kraft 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 2.4 unten zu sehen.

Damit die Scanner Ergebnisse überprüft werden können, wird die Bauteilgeometrie zusätzlich nach dem Scavorgang 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 2.4 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 2.4: Taster



**Abbildung 2.5:** Spannungswandler

# Kapitel 3

## Ziel der Arbeit

Wie schon beschrieben müssen additiv gefertigte Bauteile nachbearbeitet werden bevor sie eingesetzt werden können. Um eine korrekte Nachbearbeitung gewährleisten zu können muss das additiv gefertigte Bauteil fixiert werden. Dies kann durch ein Einspannen in einem Schraubstock vorgenommen werden.

### 3.0.1 Einspannproblematik

Durch das Einspannen kann das Bauteil so deformiert werden, dass die vorgesehene Nutzung nicht mehr möglich ist. Je nach verwendetem Werkstoff und Geometrie kann die Deformation unterschiedlich ausfallen.

### 3.0.2 Erfassung der spannkraftinduzierten Deformation

Für die Beurteilung, ob ein Bauteil noch eingesetzt werden kann, ist es nötig die Deformation die auf das Objekt gewirkt hat zu erkennen. Wenn das Bauteil in einen Schraubstock eingespannt wird, wirkt eine Spannkraft über die Backen des Schraubstock auf das eingespannte Bauteil. Diese Kraft induziert eine Deformation auf das Bauteil. Diese Deformation soll optisch in einem Verfahren erkannt und dargestellt werden.

### 3.0.3 Verfahren zur optische Spannkraftdeformationserkennung

Um die Deformation des Bauteils erfassen zu können wird das 3D-Objekt benötigt, dass als Grundlage für die AF diente. Zusätzlich werden optische Daten des Bauteils im deformierten Zustand benötigt. Mit diesen beiden Daten kann der Unterschied ermittelt und ausgegeben werden. Um auch minimale Deformationen erkennen zu können müssen die Daten des eingespannten Bauteils hinreichend genau sein. Deswegen wird ein Laserscanner zur Datenerfassung eingesetzt. Wie schon beschrieben ist der Messbereich eines Laserscanners begrenzt. Da das Verfahren nicht auf eine Bauteilgröße beschränkt sein soll, müssen mehrere Scans als Eingabe akzeptiert und damit umgegangen werden.



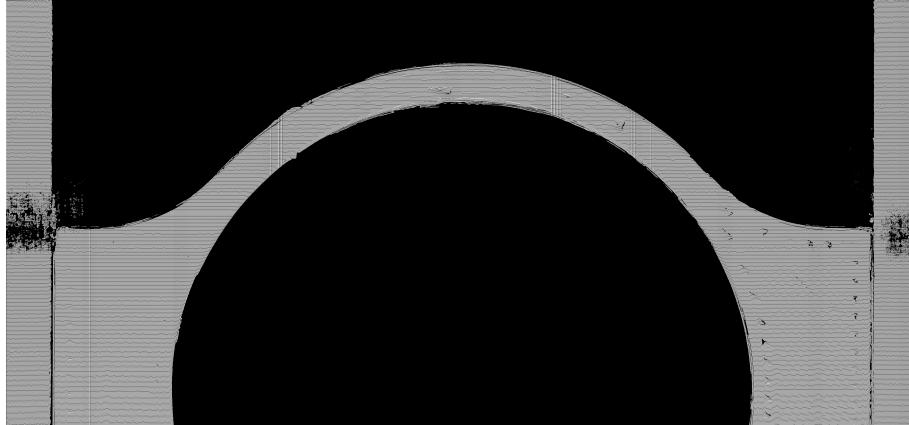
# Kapitel 4

## Stitching

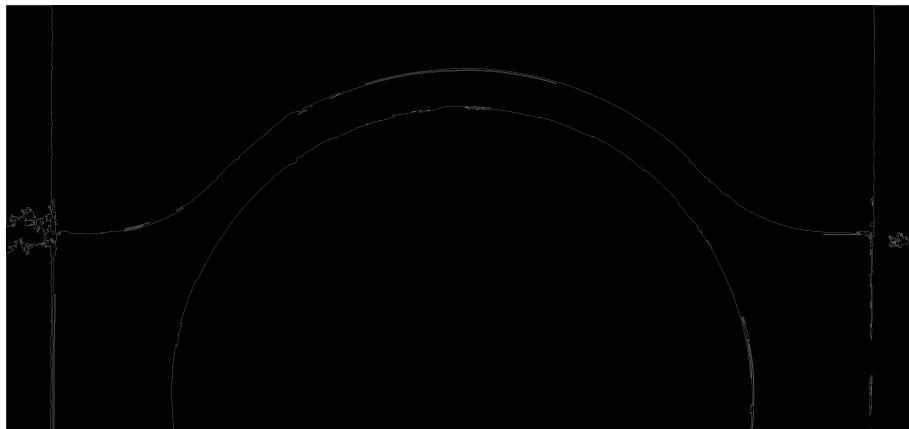
Wie schon beschrieben überlappen die mithilfe des Laserscanner aufgenommen Daten. Diese Überlappung kann benutzt werden, um die Bilder zu einem zusammenzufügen. Für das Stitching von Bilddateien existieren schon mehrere Verfahren die in Bibliotheken für viele Programmiersprachen implementiert sind. Der schon beschriebene ICP-Algorithmus ist eines dieser Verfahren. Das Problem mit diesen Verfahren ist das sich zwei Datensätze angenähert werden indem auf ein Datensatz so lange eine Transformation und Rotation, manchmal auch eine Skalierung, angewendet wird, bis die Distanz der Datensätze unter einen Grenzwert fällt oder nicht mehr verbessert werden kann. Die Überlappung in den von dem Laserscanner aufgenommen Daten ist jedoch nur in zwei Achsen verschoben. Durch eine Rotation der Daten wird eine nicht korrekte Distanz berechnet. Um die korrekte Transformation zu finden, mit der die beiden Bilder überlappen muss nicht der komplette Bereich analysiert werden, sondern nur der überlappende Teil. In diesem Bereich müssen Features erkannt werden. Nachdem in beiden Teilbildern Features erkannt wurden können diese miteinander verglichen werden.

### 4.0.1 Feature Erkennung

Features in einem Bild sind große Unterschiede in benachbarten Pixeln. Die größten Features sind die Ränder des Bauteils, kleinere Features können Oberflächenänderungen oder Spuren des Herstellungsprozesses sein. Diese Unterschiede können mithilfe der 'OpenCV' Bibliothek extrahiert werden. Diese Bibliothek gibt die erkannten Features als Liste von Konturen aus. Konturen selbst bestehen aus Listen von Punkten, die aus X und Y Koordinaten bestehen. Die Konturerkennung kann verbessert werden, indem das Bild entsprechend präpariert wird. In Abbildung 4.2 und 4.1 ist das Ursprungsbild und die extrahierten Konturen zu sehen. Mittig am linken und rechten Rand sind in Abbildung 4.1 Messfehler des Laserscanners zu sehen. Diese werden auch als Features in Abbildung 4.2 erkannt. Diese müssen entfernt werden damit die Bilder korrekt zusammengefügt werden können. Erfolgt dies nicht werden diese Fehler miteinander verglichen was das Ergebnis verfälscht.



**Abbildung 4.1:** Oberes Bild eines Scavorgangs, FDM Bauteil



**Abbildung 4.2:** Extrahierte Kontouren des Bildes ohne Pre-Processing

Die Überlappung kann nur im oberen oder unteren Bildbereich auftreten. Der restliche Teil des Bildes kann also entfernt werden. So wird außerdem Rechenzeit gespart.



**Abbildung 4.3:** Extrahierte Kontouren des Bildes ohne Pre-Processing, zugeschnitten auf den (vermutlich) überlappenden Bereich

Dieses Verfahren wird auf beide Bilder angewendet. Daraus resultieren dann zwei zugeschnittene Bilder aus denen Konturen extrahiert wurden. Würden diese beiden Bildteile vollständig überlappen könnte jetzt der ICP-Algorithmus angewendet werden. Dieser würde dann die korrekte Transformation berechnen in dem er die Konturen aus dem oberen Bild, mit denen aus dem unteren Bild vergleicht und die Distanz zwischen den Punkten minimiert. Der Grad der Überlappung ist unbekannt und kann nicht im Vorhinein bestimmt werden. Dadurch kann der ICP-Algorithmus nicht eingesetzt werden. Eine andere wichtige

Annahme kann getroffen werden: Jeweils eine Kontur aus dem oberen und unteren Bild haben mindestens einen gemeinsamen Punkt.

### Differenzierung von Punkten

Die Distanz zwischen zwei Punkten kann über den euklidischen Abstand gemessen werden. [DPRV]. Sei A ein Punkt in einer Kontur aus dem oberen Bild und K eine Kontur aus dem unteren Bild. Um den Punkt aus K zu finden, der am nächsten an A liegt, muss A mit jedem Punkt aus K verglichen werden. Das Punktepaar mit dem kleinsten gefundenen Euklidischen Abstand wird als "Best Match" gespeichert. Wenn die Euklidische Distanz null beträgt, kann die Suche abgebrochen werden, da kein kleinerer Wert mehr gefunden werden kann. Dieser Ansatz ist dem ICP-Algorithmus ähnlich. Die Differenz zwischen zwei Konturen K1 und K2 kann verglichen werden, indem für jeden Punkt A aus K1 der nächste Punkt aus K2 gefunden wird. In dem ICP-Algorithmus werden alle Distanzen von der "Best Matchesäufsummiert und beschreiben den Unterschied der beiden Distanzen. Diese Summe kann dann minimiert werden. Dieser Ansatz funktioniert bei einem sich nur partiell überlappenden Datensatz nicht. Statt die Summe zu bilden, wird jede beste Distanz zusammen mit ihren korrespondierenden Punkten gespeichert. Um den Grad der Überlappung zu bestimmen, werden die Distanzen gezählt, die gleich null sind. Dieser Wert in Relation zu der Länge von K1 gibt, in Prozent, an zu welchem Anteil sich die beiden Konturen überlappen.

### Transformation bestimmen

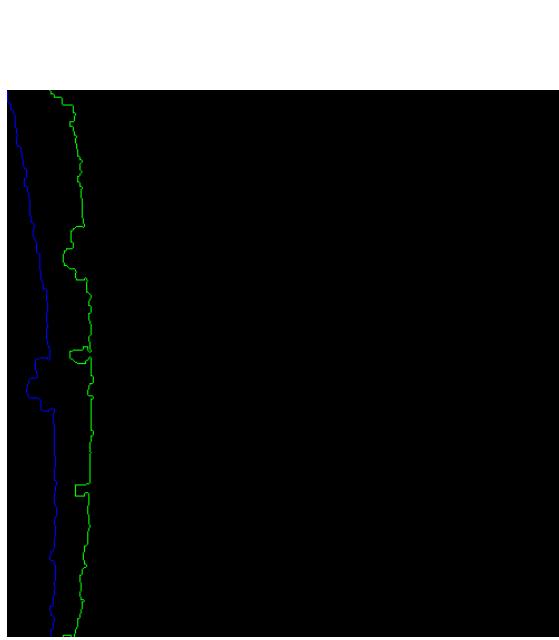
Gesucht ist die Transformation, welche die maximale Überlappung der beiden Konturen K1 und K2 bietet. Um diese Transformation zu berechnen, muss der Grad der Überlappung für jede mögliche Positionierung ermittelt werden. Jeder Punkt aus K2 muss auf die Koordinaten eines beliebigen aber festen Punkts aus K1 verschoben werden. Die Transformation zwischen zwei Punkten A und B kann über die Vektorberechnung erfolgen:

$$T_{a,b} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \end{pmatrix}$$

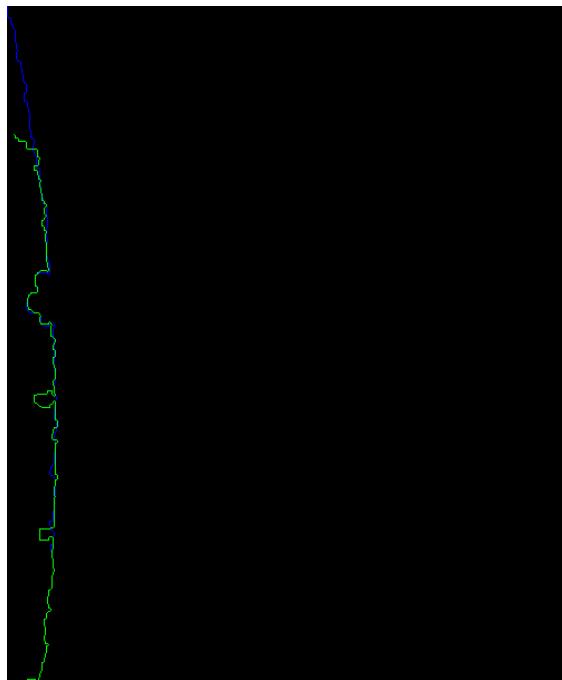
Kontur K2 kann über Kontur K1 verschoben werden, indem Punkt A festgehalten wird, während Punkt B sukzessive jeden Punkt aus K2 annimmt. Die daraus resultierende Punkttransformation wird auf jeden Punkt von K1 angewendet, um die nächstgelegenen Nachbarpunkte zu ermitteln. Für jede Transformation wird der Überlappungsanteil berechnet, wobei das Ergebnis mit der maximalen Überlappung als die optimale Transformation gespeichert wird. Dieses Verfahren ist nur anwendbar, wenn Punkt A im überlappenden Bereich liegt. Befindet sich Punkt A nicht in der Kontur K2, kann das Verfahren nicht erfolgreich angewendet werden. Zur Berechnung der optimalen Transformation wer-

den verschiedene Punkte aus K1 ausgewählt und das Verfahren jeweils angewendet. Die Transformation mit dem größten Verhältnis von Nullen zur Gesamtlänge der Kontur wird als optimal angesehen. Aufgrund des exponentiellen Laufzeitverhaltens ist es ineffizient, jeden Punkt A aus K1 mit jedem Punkt B aus K2 zu vergleichen.

In Abbildung 4.4 sind zwei Beispielkonturen zu sehen. Diese sind nicht angeordnet. Der ICP-Algorithmus würde diese beiden Konturen annähern ohne sie zu überlappen. Das Ergebnis des vorgestellten Stitching Verfahrens ist in Abbildung 4.5 zu sehen. Es ist zu erkennen das, trotz Messfehler und kleineren Unterschieden im überlappenden Bereich die korrekte Transformation ermittelt werden konnte. Diese Konturen stammen von einem additiv gefertigten Metallbauteil.



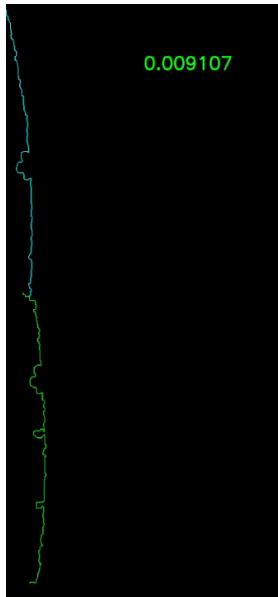
**Abbildung 4.4:** Konturen, vor der Transformation



**Abbildung 4.5:** Konturen, transformiert mit größter Überlappung, Grad der Überlappung: 24,26%

### Stitching visuell dargestellt

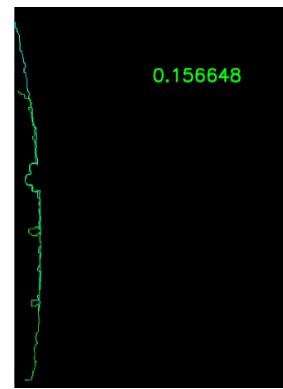
In Abbildung 4.6 bis Abbildung 4.9 ist der Prozess des Verfahrens zu sehen. K1 ist in Blau dargestellt, K2 in Grün. In jeden Bild ist der Grad der Überlappung dargestellt. Es ist dargestellt wie Kontur K2 über K1 geschoben wird um den besten Grad der Übereinstimmung zu ermitteln.



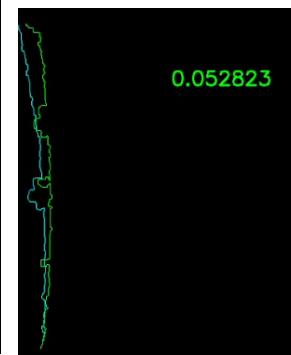
**Abbildung 4.6:** Konturen K1 und K2 beim Beginn des Verfahrens



**Abbildung 4.7:** Konturen K1 und K2 nach  $n$  Schritten



**Abbildung 4.8:** Konturen K1 und K2 beim Ende des Verfahrens



**Abbildung 4.9:** Konturen K1 und K2 beim Ende des Verfahrens

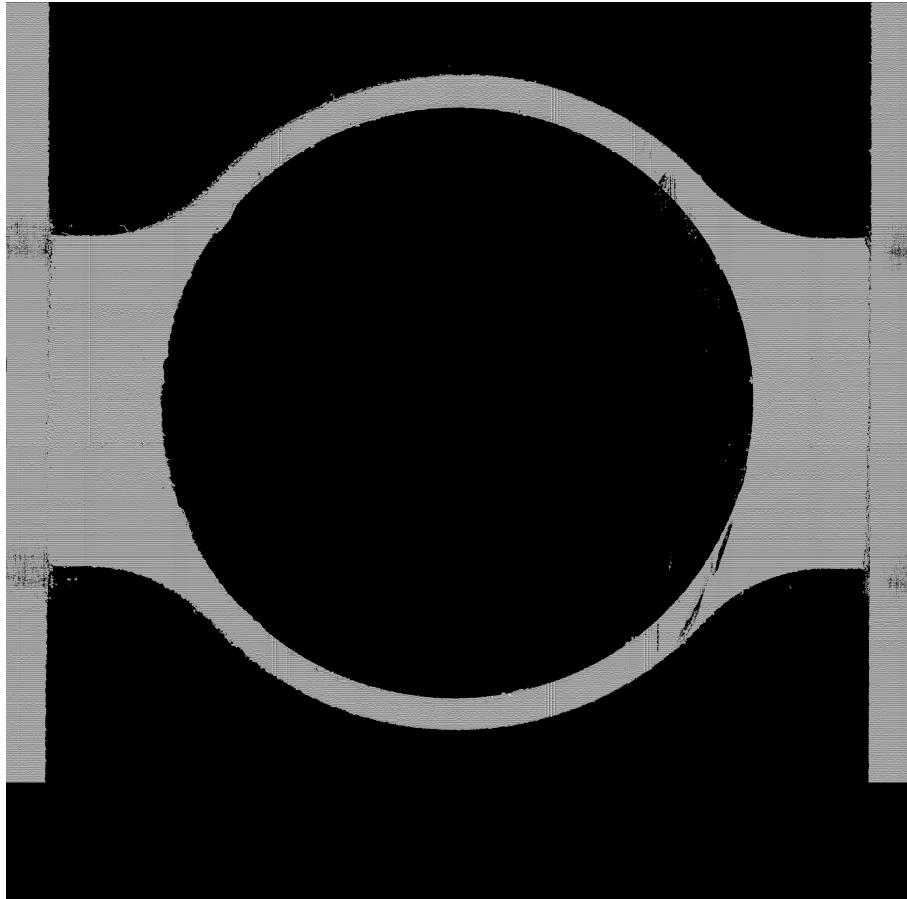
## Bilder zusammenfügen

Wenn alle Transformationen vorliegen wird die Transformation mit der besten Übereinstimmung gewählt. Diese wird genutzt, um die beiden Bilder zusammenzufügen. Das zugehörige Bild der Konturen K2 wird transformiert, indem die Transformation auf jeden Pixel angewendet wird. Die Transformation ist nur korrekt, wenn die beiden Bilder die gleichen Ursprungskoordinaten haben, die auch bei den Konturen K1 und K2 verwendet wurden.

## Probleme und Lösungen im Verfahren

Durch die Funktionsweise treten am Randbereich der Scannerdaten vermehrt Messfehler auf, die nicht vollständig durch vorheriges Filtern entfernt werden können. Damit diese Messfehler das Stitching nicht verfälschen, werden alle Konturen nochmals gefiltert. Alle Punkte in einer Kontur, die sich in einem konfigurierbaren Abstand zu den Bildrändern befinden, werden entfernt. Dadurch werden sie bei der Berechnung der Transformation nicht verwendet. Der konfigurierbare Abstand muss beim Stitching des finalen Bilds berücksichtigt werden und von der Transformation abgezogen werden.

Wenn Konturen mit einer großen unterschiedlichen Länge verglichen werden, kann eine sehr hohe Übereinstimmung ermittelt werden, die aber keine tatsächliche Übereinstimmung ist. Das kann zum Beispiel vorkommen, wenn Konturen die am linken und rechten Bildrand in Abbildung 4.2 zu sehen sind, verglichen werden. Um dies zu vermeiden wird eine Bedienung eingeführt, dass die Länge der Konturen nicht zu sehr voneinander abweichen



**Abbildung 4.10:** Zusammengefügtes Bild

darf. Bei einer Abweichung von mehr als 200 Punkten in einer Kontur sollte die Konturen nicht miteinander verglichen werden.

Auch Konturen mit einer Länge von weniger als 100 Punkten sollten nicht berücksichtigt werden. Diese beschreiben keine Features in einem Bild, die für das Stitching verwendet werden sollten. Diese Konturen beschreiben meist nur Messfehler oder Oberflächenstrukturen, die nicht konsistent in beiden Bildern von dem Scanner erkannt werden können.

Um das Ergebnis noch weiter zu verbessern, können zwei Konturen zweimal miteinander verglichen werden. Während des zweiten Vergleichs wird die Zielkontur mit der Ursprungskontur vertauscht. So wird aus beiden Konturen jeweils einmal ein fester Punkt gewählt. Wieder wird die Transformation gespeichert mit der besten Überlappung. Wenn die Überlappung im zweiten Vergleich eine höhere Übereinstimmung hat, muss die berechnete Transformation invertiert werden. Geschieht dies nicht, kann die Transformation nicht für den finalen Stitchprozess eingesetzt werden, weil dort das Ziel und Ursprungsbild fest gesetzt ist.

# Kapitel 5

## Datenaufbereitung

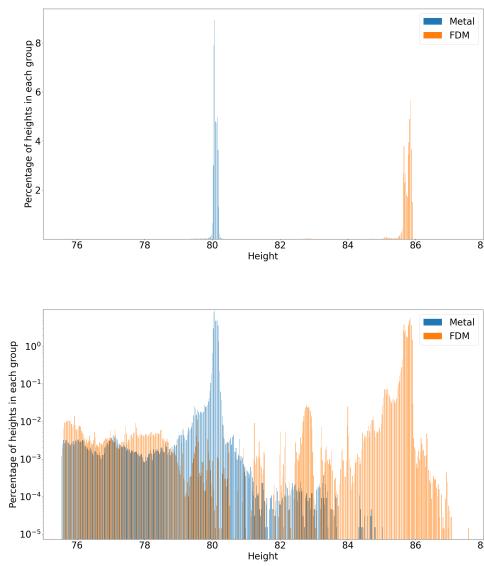
Um die Deformation im eingespannten Zustand zu erkennen, muss das komplette Werkstück als dreidimensionales Modell existieren. Nur so kann es mit einem anderen Modell verglichen werden.

Das Verfahren soll die Deformation nur in einer zweidimensionalen Ansicht erkennen. Das ist weniger komplex, hat aber zur Folge, dass Bauteile mit unterschiedlichen Oberflächenhöhen nicht korrekt analysiert werden können. Die Daten des eingespannten Bauteils liegen in Form von mehreren Pointclouds vor. Diese Daten wurden mithilfe eines Laserscanners aufgenommen. Durch diesen Prozess entstehen Messfehler und Ausreißer. Diese Punkte verfälschen das Verfahren da sie nicht auf dem eingespannten Bauteil liegen. Die Akkuranz des Verfahrens profitiert, wenn diese Punkte entfernt werden.

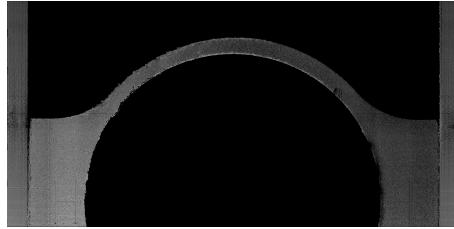
### 5.0.1 Pointcloud filtern

Wie man in Abbildung 5.1 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.

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 übernehmen, kann auch noch die Point-



**Abbildung 5.1:** Auftreten Höhe



**Abbildung 5.2:** Metallteil gefiltert

cloud 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 gesamten 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

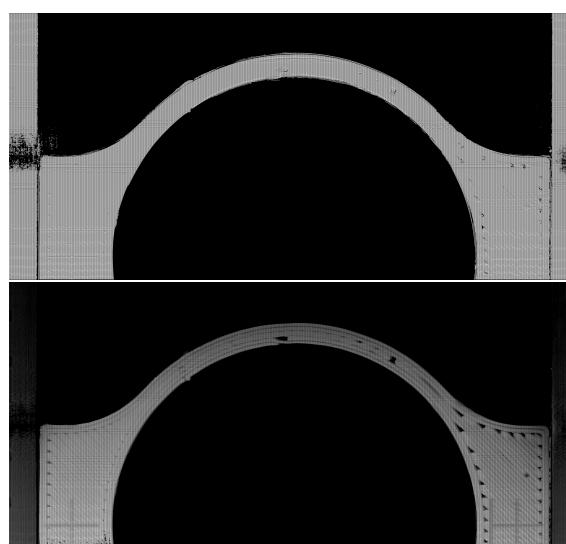
gewährleisten. Ein Nachteil bei der Filterung in Abbildung 5.3 links und rechts mittig zu sehen. Hier sind schwarze Punkte sichtbar. Diese treten auf, weil der Scanner hier über dem Bauteil Punkte erkannt hat. Durch das Filtern wurden diese Punkte entfernt beziehungsweise bei der Konvertierung nicht berücksichtigt. Da diese Punkte dann fehlen bleiben sie im resultierenden Bild schwarz. Das ist zwar etwas unschön anzuschauen, beeinträchtigt das zusammenfügen aber nicht weiter.

### 5.0.2 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:

$$value_p = \frac{Z - min_z}{max_z - min_z} \cdot (max_{brightness} - min_{brightness}) + min_{brightness}$$

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.



**Abbildung 5.3:** Konvertierung Pointcloud zu Bild

Wie man in Abbildung 5.3 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 5.1 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 ?? 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 auftreten 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 5.3

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. Dadurch können mehrere Bilder korrekt zusammengefügt werden.

## Kapitel 6

# Analyse der spannkraftinduzierten Deformation



## Kapitel 7

# Algorithmus und Software



# Kapitel 8

## Validierung

### 8.0.1 Versuchsaufbau

In Abbildung 8.1 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

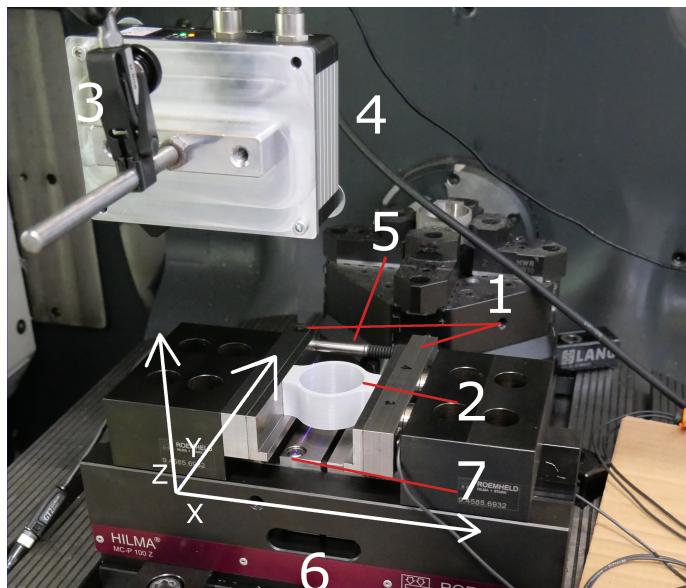


Abbildung 8.1: Versuchsaufbau

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.

## Kapitel 9

# Zusammenfassung und Ausblick



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Accuracy Photogrammetry . . . . .	6
2.2	Akkuranz des 3D Objekts ist abhängig von der Anzahl der Polygone . . . . .	7
2.3	Funktionsweise eines Laserscanners . . . . .	8
2.4	Taster . . . . .	9
2.5	Spannungswandler . . . . .	10
4.1	Oberes Bild eines Scanvorgangs, FDM Bauteil . . . . .	14
4.2	Extrahierte Kontouren des Bildes ohne Pre-Processing . . . . .	14
4.3	Extrahierte Kontouren des Bildes ohne Pre-Processing, zugeschnitten auf den (vermutlich) überlappenden Bereich . . . . .	14
4.4	Konturen, vor der Transformation . . . . .	16
4.5	Konturen, transformiert mit größter Überlappung, Grad der Überlappung: 24,26% . . . . .	16
4.6	Konturen K1 und K2 beim Beginn des Verfahrens . . . . .	17
4.7	Konturen K1 und K2 nach n Schritten . . . . .	17
4.8	Konturen K1 und K2 beim einer guten Übereinstimmung . . . . .	17
4.9	Konturen K1 und K2 beim Ende des Verfahrens . . . . .	17
4.10	Zusammengefügtes Bild . . . . .	18
5.1	Auftreten Höhe . . . . .	20
5.2	Metallteil gefiltert . . . . .	20
5.3	Konvertierung Pointcloud zu Bild . . . . .	21
8.1	Versuchsaufbau . . . . .	27



# Algorithmenverzeichnis



# Literaturverzeichnis

- [.1624] Accuracy of digital technologies for the scanning of facial, skeletal, and intraoral tissues: A systematic review, 16/07/2024.
- [AKS15] Bhrgu Ahuja, Michael Karg, and Michael Schmidt. Additive manufacturing in production: challenges and opportunities. page 935304, 03 2015.
- [AM 24] 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.
- [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.
- [DPRV] Ivan Dokmanic, Reza Parhizkar, Juri Ranieri, and Martin Vetterli. Euclidean distance matrices: Essential theory, algorithms, and applications.
- [EAA23] Ahmed Elaksher, Tarig Ali, and Abdullatif Alharthy. A quantitative assessment of lidar data accuracy, 2023.
- [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.
- [KP08] Kenton McHenry and Peter Bajcsy. *An overview of 3D data content, file formats and viewers*. 2008.

- [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.
- [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.

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Dortmund, den 16. Juli 2024

Muster Mustermann

