

Bachelorarbeit

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

Niklas Thieme

12. August 2024

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Petra Wiederkehr

Melina Wenzel, M.Sc.

Technische Universität Dortmund

Fakultät für Informatik

Virtual Machining (14)

<https://vm.cs.tu-dortmund.de/>



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen und 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 . . . . .	7
2.4.2 Scanner und Datenerfassung . . . . .	7
2.5 ICP-Algorithmus . . . . .	9
<b>3 Methodik</b>	<b>11</b>
3.1 Verfahren zur optische Spannkraftdeformationserkennung . . . . .	11
3.2 Vorgehen . . . . .	12
<b>4 Datenaufbereitung</b>	<b>13</b>
4.1 Pointcloud filtern . . . . .	13
4.2 Pointcloud in Bild konvertieren . . . . .	14
<b>5 Stitching</b>	<b>19</b>
5.1 Feature Erkennung . . . . .	19
5.2 Differenzierung von Punkten . . . . .	21
5.3 Transformation bestimmen . . . . .	21
5.4 Visuelle Darstellung des Stitching Prozesses . . . . .	23
5.5 Bilder zusammenfügen . . . . .	23
5.6 Probleme und Lösungen im Verfahren . . . . .	23
<b>6 Spannkraftinduzierten Deformation</b>	<b>27</b>
6.1 Deformation zwischen zwei Spannungszuständen . . . . .	27
6.1.1 Randgeometrien übereinander legen . . . . .	28
6.1.2 Deformation messen . . . . .	29

<b>7 Validierung</b>	<b>33</b>
7.1 Analyse der spannkraftinduzierten Deformation . . . . .	33
7.1.1 Versuchsaufbau . . . . .	34
7.2 Zusätzliche Messinstrumente . . . . .	34
7.3 Messergebnisse . . . . .	35
7.4 Ergebnisse der optischen Deformationsanalyse . . . . .	37
<b>8 Anwendung und Algorithmus</b>	<b>41</b>
8.1 Anwendung . . . . .	41
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>43</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>46</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>48</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

In den letzten Jahren hat die additive Fertigung (AF), auch bekannt als 3D-Druck, zunehmend an Bedeutung in der Industrie gewonnen [JJ22]. Diese innovative Technologie ermöglicht die schichtweise Herstellung komplexer Bauteilgeometrien und bietet im Vergleich zu traditionellen Fertigungsverfahren einen höheren Grad an Gestaltungsfreiheit. Trotz dieser Vorteile stehen Hersteller vor Herausforderungen bezüglich der Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit der gefertigten Werkstücke [SGLG<sup>+</sup>19].

Um Herausforderungen die bei AF auftreten zu lösen, existieren verschiedene Herangehensweisen. Viele dieser Herangehensweisen basieren auf der Nachbearbeitung des gefertigten Bauteils. Für den Nachbearbeitungsschritt muss das Bauteil in seiner Position und Lage im Bauraum der Werkzeugmaschine fixiert werden. Die hierzu aufzubringenden Spannkräfte können die filigranen Bauteile elastisch, in Extremfällen auch plastisch, verformen, sodass eine maßhaltige spangebende Nachbearbeitung verhindert wird. Um den Spannprozess und dessen Auswirkungen auf das Bauteil hinsichtlich der erzielbaren geometrischen Genauigkeit optimieren zu können, ist eine Quantifizierung der spannkraftinduzierten Deformation notwendig. [BAB20]

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird deshalb eine Methodik zum Erkennen und analysieren einer Deformation entwickelt. Das Ziel dieser Methodik ist es, mithilfe von optischen Informationen zu additiv gefertigten Bauteilen eine Deformation zu erkennen, wie sie zum Beispiel auftreten kann, wenn ein Bauteil in einem Schraubstock fixiert wird.

Das Verfahren soll auf verschiedenen Bauteilgeometrien anwendbar sein, daher werden möglichst wenig Annahmen über die Bauteilgeometrie getroffen. Im Verlauf dieser Arbeit werden erst die theoretischen Grundlagen, die für die entwickelte Methodik notwendig sind dargestellt. Anschließend wird das Vorgehen der Methodik vorgestellt und die einzelnen Schritte erläutert. Das Verfahren besteht aus mehreren Schritten die sich Grob in Datenaufbereitung, Stitching und Deformationserkennung einteilen lassen.

Nach der Vorstellung des Verfahrens wird die Funktion der Methodik anhand eines Demonstratorbauteils das in einem Schraubstock fixiert und mit mehrere Kraftstufen an-

gezogen wurde, validiert. Hier wird die erkannte Deformation bewertet und verschiedene Materialien und Herstellungsverfahren verglichen.

Ziel dieser Arbeit ist es zusätzlich, die entwickelte Methodik in einer einfach benutzbaren Anwendung um zusetzen. Die Funktionsweise dieser Anwendung wird nach der Validierung der Methodik dokumentiert. Außerdem wird auf Herausforderungen in der Anwendungsentwicklung eingegangen.

Zum Abschluss dieser Arbeit wird ein Fazit gezogen, in dem die erzielten Ergebnisse eingehend diskutiert werden. Zudem wird ein Ausblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen und weiterführende Forschungsansätze gegeben.

## Kapitel 2

# Grundlagen und Stand der Technik

[TODO fill me]

### 2.1 Additive Fertigung

Additive Fertigung (AF), unabhängig von dem Werkstoff, ist ein Bereich in 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 verschiedenem 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 ein-

fache Anpassbarkeit sorgt für geringen Entwicklungszeiten und Kosten. BWM zum Beispiel benutzt für den i8 Roadster viele AF gefertigte Teile. Darunter sind zum Beispiel die Befestigung 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, das 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 kann die verminderte Oberflächenqualität durch eine anschließende Fräsbearbeitung verbessert werden. [todo was sind supportstrukturen und warum braucht man sie] 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. 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

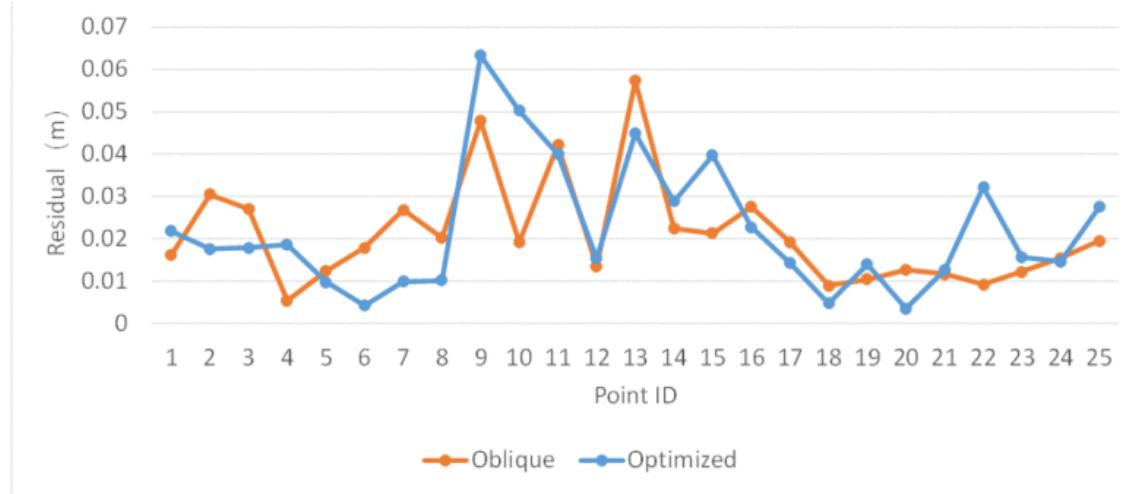
werden kann, um bestehende Bauteile passgenau zu erweitern. Konkret geht es um die Entwicklung einer Methodik um automatisiert Laser-Scans und originale Baupläne zusammenzufügen um ein möglichst detailgetreues Abbild der realen Struktur zu erzeugen. Dieses Abbild wird dann benutzt, um die bestehende 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

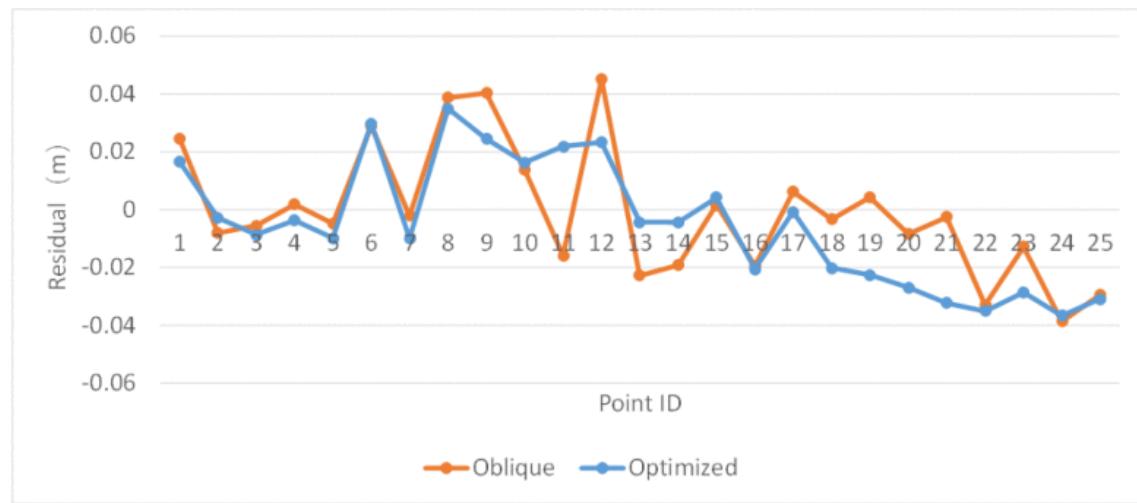
Digitale Abbildungen von Flächen, Objekten oder sogar Körperteilen wurden in den letzten Jahren mehr benutzt. Anwendungen sind zum Beispiel in der geometrischen Dokumentation, Inspektion, Navigation, Visualisierung und Objekterkennung zu finden [VI23]. Je nach Anwendungsfall wird eine bestimmte Akkuranz der Daten erwartet, im medizinischen Bereich sind die Ansprüche natürlich ganz andere als zum Beispiel in der Dokumentierung von ganzen Gebirgszügen. Das Scannen von Gesichtstexturen zeigte Abweichungswerte zwischen  $140 \mu\text{m}$  und  $1330 \mu\text{m}$ , während die 3D-Rekonstruktion des Kieferknochens Werte zwischen  $106 \mu\text{m}$  und  $760 \mu\text{m}$  aufwies. Das Scannen eines bezahlten Bogens durch intraorale und Labor-basierte Scanner variierte zwischen  $17 \mu\text{m}$  und  $378 \mu\text{m}$  und bei der digitalen Abtastung von Zahnimplantaten zwischen  $19,32 \mu\text{m}$  und  $112 \mu\text{m}$  [BGH<sup>+</sup>19]. Bei Lidar-Scans eines Sportkomplexes wurde eine Standardabweichung von  $\pm 0.10$  Metern 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.

3D Rekonstruktion-Technologien können in 2 Kategorien eingeteilt werden, die bildbasierte Verfahren und die Verfahren die auf Scandaten beruhen. [VI23] [todo es existieren noch mind. 2 weitere verfahren] Beide Verfahren können auch kombiniert werden. Bei bildbasierten Verfahren, auch Fotogrammetrie genannt, wird das 3D Objekt aus mehreren zweidimensionalen Bildern erstellt, umso mehr Bilder vorhanden sind, desto 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 [todo figur einfügen] zeigt dies anschaulich. Vorteil bei der Fotogrammetrie ist, dass die Daten relativ einfach aufgenommen werden können. Die Kamera eines Smartphones kann ausreichend hochauflösende Bilder

aufnehmen, um eine 3D-Rekonstruktion zu ermöglichen. Des Weiteren sind viele Softwarelösungen, auch kostenlose, vorhanden um automatisiert 3D Objekte zu erzeugen. Gründe, sich gegen den Einsatz von Fotogrammetrie zu entscheiden, liegen in der begrenzten Auflösung sowie im signifikant ansteigenden Arbeitsaufwand bei steigenden Anforderungen an die Genauigkeit des Endergebnisses. Fotogrammetrie zeigt jedoch ihre Stärken bei großflächigen 3D-Rekonstruktionen, wie sie beispielsweise bei der Erfassung von Gebäuden, Stadtteilen oder geografischen Strukturen erforderlich sind.



(a)



(b)

**Abbildung 2.1:** Akkurate der Fotogrammetrie

Für kleine Objekte, bei deren Rekonstruktion eine hohe Genauigkeit gefordert ist, sollte daher das zweite Verfahren angewendet werden. Bei diesem Verfahren werden die Ursprungsdaten dreidimensional mit einem Scanner erfasst. Ein Scanner misst dabei, meist

mithilfe von Lichtstrahlen, den Abstand zu einem Punkt auf dem zu rekonstruierenden Objekt. Um eine Vielzahl von Scanpunkten zu erfassen, wird entweder das Objekt oder der Scanner bewegt. Je mehr Punkte erfasst werden, desto genauer wird das Ergebnis. Allerdings nimmt die Datenmenge mit der Anzahl der Scanpunkte ebenfalls zu, was ab einem bestimmten Punkt zu einer Einschränkung durch den verfügbaren Speicher führen kann. Zudem steigt die Rechenzeit mit der Datenmenge an, und je nach angewandtem Verfahren kann dieser Anstieg sogar exponentiell sein.

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

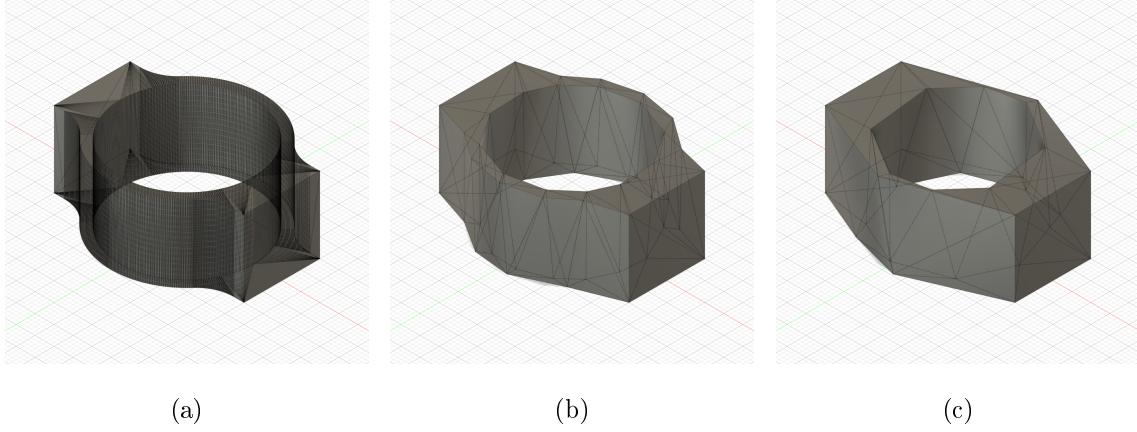
#### 2.4.1 Digitales Abbild

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 Polygon 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.

#### 2.4.2 Scanner und Datenerfassung

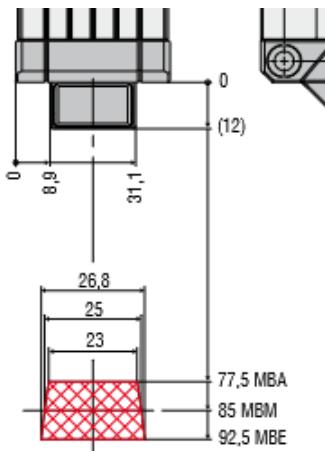
[todo verschiedene Scanner differenzieren und vergleichen]

Wie schon beschrieben können dreidimensionale Daten direkt mit einem Scanner aufgenommen werden. Der Scanner hat Abhängig vom Modell und der angebrachten Höhe einen limitierten Bereich den er erfassen kann. Je nach Scannertyp und Modell kann sich der Messbereich ändern. In Abbildung 2.3 ist ein Beispiel Messbereich sichtbar. Mittig kann in einer Tiefe von 85 mm eine Linie mit der Länge 25 mm gemessen werden. Der komplette



**Abbildung 2.2:** Akkuranz einer 3D-Datei ist abhängig von der Anzahl der gespeicherten Eckpunkte am Beispiel des Demonstratorbauteils. (a) 1512 Punkte (b) 52 Punkte (c) 30 Punkte

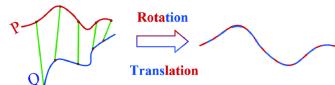
messbare Bereich ist rot markiert. [MES20] Bauteile die breiter sind als die maximale Breite der Scanebene, in Abbildung 2.3 mittig 25 mm, können also nicht in einer Pointcloud erfasst werden. Damit eine Digitalisierung von größeren Objekten erfolgen kann, müssen also mehrere Scans durchgeführt, und später zusammengefügt werden. Zwischen den Scanvorgängen muss der Scanner in Richtung der Breitenachse 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. Das Ergebnis verbessert sich nicht, da nicht mehr Daten aufgenommen werden, sondern nur die gleichen Daten mehrfach. So können Pointclouds aufgenommen werden die dann in dem zu entwickelnden Verfahren wieder zu einem digitalen Abbild zusammengefügt werden.



**Abbildung 2.3:** Funktionsweise eines Laserscanners [todo was ist abgebildet]

## 2.5 ICP-Algorithmus

Der Iterative-Closest-Point-Algorithmus(ICP-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] [todo was ist eine Transformation] 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] Der Algorithmus geht iterativ vor und berechnet immer eine optimale lokale Transformation. Die beiden Datensätze sollten schon vor dem Anwenden des ICP-Algorithmus grob angenähert sein, das beschleunigt die Konvergenz und damit die Laufzeit des Algorithmus. Eine grobe Annäherung kann ermittelt werden, indem die Massenmittelpunkte der beiden Datensätze übereinander gelegt werden. In Abbildung 2.4 ist das Prinzip visuell dargestellt. Die grünen Linien sind jeweils die kürzeste Distanz von Q nach R.



**Abbildung 2.4:** Prinzip des ICP-Algorithmus [todo Größe anpassen]



# Kapitel 3

## Methodik

[todo umfangreicher schreiben]

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 vorgenommen werden, indem das Bauteil in einen Schraubstock eingespannt wird. Durch eine Einspannung kann das Bauteil so deformiert werden, dass die vorgesehene Nutzung nicht mehr möglich ist.

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, dargestellt und anschließend ausgewertet werden.

### 3.1 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.

## 3.2 Vorgehen

[todo Hier beschreibst du noch etwas offener, was umgesetzt werden soll, als wäre es noch nicht umgesetzt, heißt weniger: dann wird, sondern mehr, es soll...]

Das Verfahren, um eine Deformation in einem eingespannten additiv gefertigten Bauteil, zu erkennen umfasst folgenden Schritte: [Schritt 1 datenaufnahme]

- **Digitalisierung des Bauteils:**

In diesem Schritt werden Messfehler und Ausreißer in den Scannerdaten entfernt. Anschließend werden die dreidimensionalen Eingangsdaten in eine zweidimensionale Ansicht umgewandelt. Nach diesem Schritt liegen für jedes Bauteil mehrere Datensätze als zweidimensionale schwarz weiß Bilder vor.

- **Stitching Methodik**

Diese Bilder müssen nun zu einem einzelnen Bild zusammengefügt werden. Hierfür werden Gemeinsamkeiten in den sich teilweise [todo besser erklären] überlappenden Bildern gesucht und eine Transformation ermittelt, die auf eines von zwei Bildern angewendet werden kann, um sie zusammenzufügen.

- **Deformationserkennung**

Sobald ein Bild für ein eingespanntes Bauteil vorliegt, können verschiedene Zustände des Bauteils verglichen werden. Deformationen werden erkannt, in dem die Länge und Breite des Bauteils verglichen wird, zusätzlich wird der Abstand zwischen den Rändern des Bauteils berechnet. Es können verschiedene Spannungszustände verglichen werden, ein Vergleich mit dem initialen 3D-Design ist auch möglich. Hier werden auch Fehler erkannt die im Fertigungsprozess entstehen erkannt. Der Unterschied zwischen Bauteilzuständen wird auch visuell ausgegeben und als Bild gespeichert.

## Kapitel 4

# Datenaufbereitung

Um die Deformation im eingespannten Zustand zu erkennen, muss das komplette Werkstück als digitales Modell existieren, um es mit anderen Modellen vergleichen zu können. 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. Geometrie und Oberflächeninformationen 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.

### 4.1 Pointcloud filtern

Wie in Abbildung 4.1 zu erkennen ist, streuen nicht alle Punktfolken gleichmäßig. Abhängig vom Werkstoff des Bauteils reflektieren die Laserstrahlen unterschiedlich, was zu einer variierenden Anzahl von Ausreißern führt. Das Metallteil zeigt eine deutlich stärkere Streuung in beide Richtungen, während das FDM-gedruckte Bauteil weniger nach oben, aber mehr nach unten streut. Daher muss eine Filtermethode gewählt werden, die für alle Fertigungsverfahren anwendbar ist und nicht bei einem Verfahren besser funktioniert als bei einem anderen. Wird beispielsweise die Methode angewendet, die die 10 % am häufigsten auftretenden Höhenwerte bei einem Metallteil berücksichtigt, ergibt sich das in Abbildung 4.2 gezeigte Bild. Man sieht vor allem auf der rechten Seite, dass Ränder nicht mehr klar erkennbar sind, da sie durch die Filterung Lücken aufweisen. Praxistests haben gezeigt das ein ausreichend gut funktionierender Filterwert 50 Prozent ist. Damit werden ausreichend viele Messfehler aus dem Bild genommen, aber trotzdem bleiben Oberflächenstrukturen und Ränder sichtbar genug um ein korrektes Zusammenfügen zu gewährleisten. Dieses Filtern bezieht sich aber nur auf zweidimensionale Bildinformationen. Um bei dem Konvertieren noch weniger Punkte, die nicht auf dem Bauteil liegen nicht in das Bild

zu übernehmen, kann auch noch die Pointcloud gefiltert werden. Hier kann ein einzelner Punkt relativ zu seinen Nachbarn im dreidimensionalen Raum betrachtet werden, um so Ausreißer zu erkennen. Dafür sind in der Open-Source Bibliothek 'Open3D' zwei Methoden vorhanden: Radius basierte Entfernung, oder auf Basis von statistischen Werten. Die erste Methode eignet sich gut, wenn die Maße des Objekts bekannt sind. Hier wird um jeden Punkt eine Kugel gebildet und alle 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 statistische genutzt. Hier werden alle 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, desto länger dauert der Filterprozess, aber die Filterung wird auch akkurater. Im Praxistest haben sich hier 50 Nachbarpunkte bewährt. Mit diesem Wert werden bei Pointclouds in unserem Datensatz jeweils ca. zwei Prozent aller Punkte entfernt. So kann das resultierende Bild ausreichend gut umgewandelt werden, um eine erfolgreiche Zusammenführung von verschiedenen Bildern zu gewährleisten. Ein Nachteil bei der Filterung in Abbildung 4.3 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.

## 4.2 Pointcloud in Bild konvertieren

Um Rechenzeit zu sparen und die zahlreichen Funktionen bereits bestehender Bilderkenntnisbibliotheken nutzen zu können, wurden die Punktwolken in Bilder konvertiert. Hierfür wird zunächst ein leeres Bild mit den gleichen Maßen der Pointcloud erstellt. Anschließend wird über alle Punkte der Pointcloud iteriert und der Pixel an den entsprechenden X- und Y-Koordinaten des Punktes auf einen Helligkeitswert gesetzt.

Um Rechenzeit und Speicherkapazitäten zu schonen und da es für die Berechnungen ausreichend ist, wurden 8-Bit-Single-Channel-Bilder verwendet, die nur Helligkeitswerte abbilden. In diesen Bildern kann jeder Pixel einen Wert zwischen 0 und 255 annehmen. Der entsprechende Helligkeitswert kann wie folgt berechnet werden:

$$value_p = \frac{Z - min_z}{max_z - min_z} \cdot (max_{brightness} - min_{brightness}) + min_{brightness} \quad (4.1)$$

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.

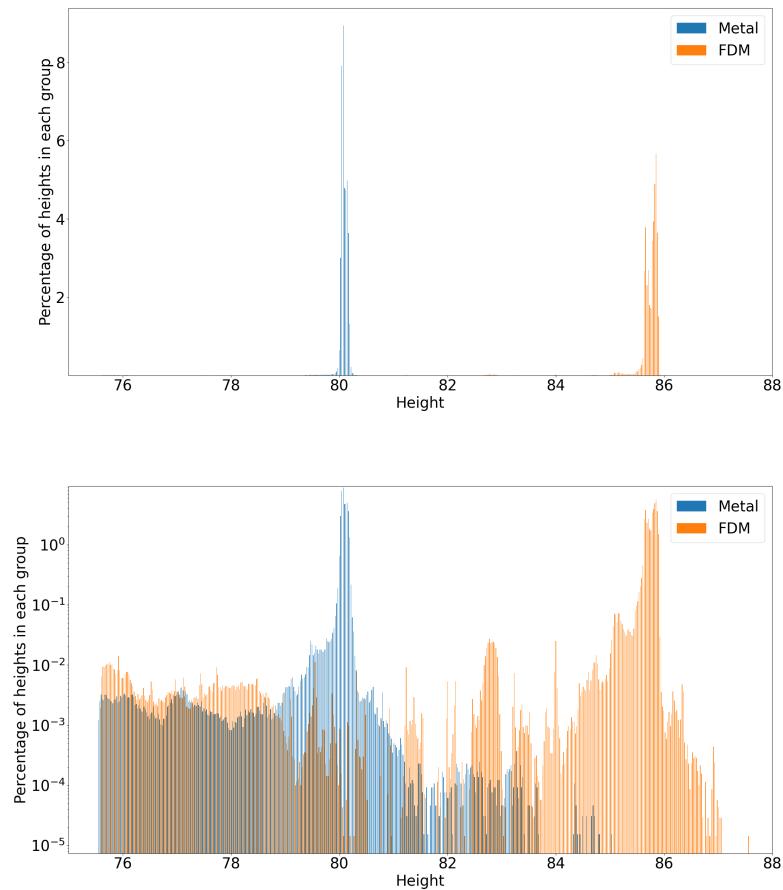


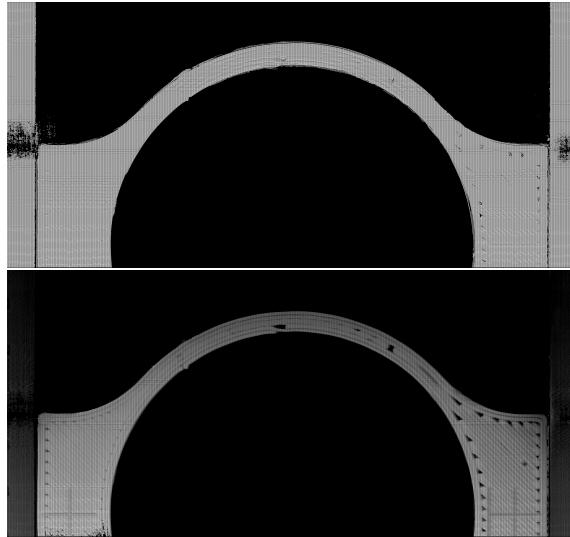
Abbildung 4.1: Auftreten Höhe



Abbildung 4.2: Metallteil gefiltert

$min_{brightness}$  und  $max_{brightness}$  sind die gewünschten Grenzen der Helligkeit. In unserem Fall sind  $min_{brightness} = 0$  und  $max_{brightness} = 255$  da ein 8 Bit Bild verwendet wird.

[todo A und B]



**Abbildung 4.3:** Konvertierung Pointcloud zu Bild, Oberhalb ohne Filter, unterhalb mit den zehn Prozent häufigsten Höhenwerten

Wie man in Abbildung 4.3 sehen kann, sind kaum Helligkeitsveränderungen im Bild sichtbar. Das liegt an derselben Problematik, an der der ICP-Algorithmus häufig scheitert. Reale Datensets widerspiegeln die Realität nicht absolut korrekt, sondern beinhalten Messfehler und Streuungen.

Abbildung 4.1 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 4.1 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 zehn Prozent übernommen werden erhält man das untere Bild in Abbildung 4.3

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. Zusätzlich sind die Spuren und Lücken die durch den FDM Herstellungsprozess entstehen zu sehen.

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 5

## Stitching

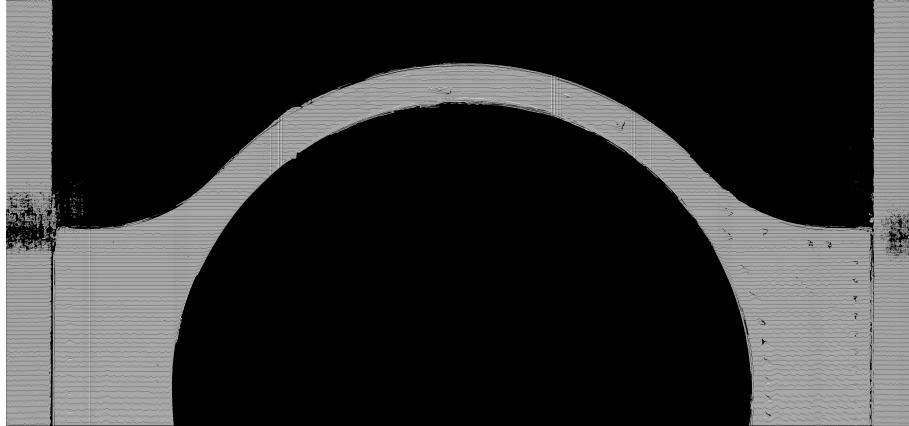
Für jeden Einspannzustand eines Bauteils können mehrere Bilddateien vorliegen. Alle Bilddateien gehören zu dem gleichen Bauteil und müssen zusammengefügt werden, um ein einzelnes digitales Objekt zu erhalten. Als Voraussetzung ist gegeben das alle Bilder Überlappung enthalten.

Diese Überlappung kann benutzt werden, um die Bilder zu einem Objekt zusammenzufügen. Das Zusammenfügen ist im folgenden auch Stitching genannt. 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.

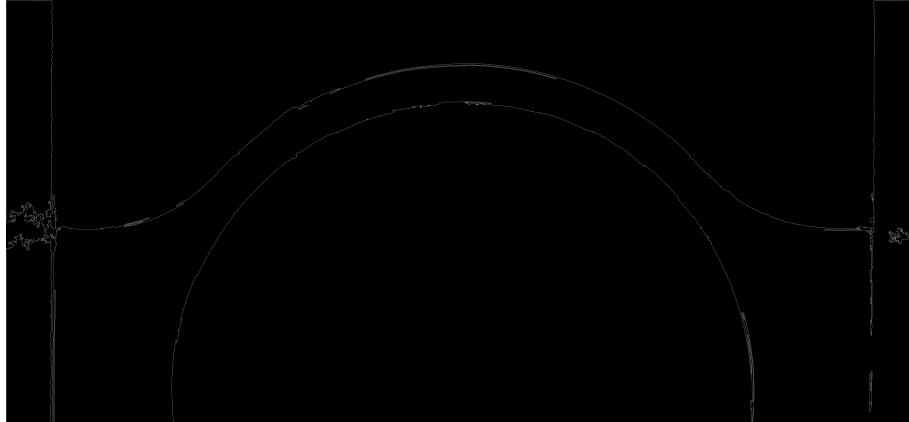
### 5.1 Feature Erkennung

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 entspre-

chend präpariert wird. In Abbildung 5.2 und 5.1 ist ein Ursprungsbild und die extrahierten Konturen zu sehen. Mittig am linken und rechten Rand sind in Abbildung 5.1 Messfehler des Laserscanners zu sehen. Diese werden auch als Features in Abbildung 5.2 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 5.1:** Oberes Bild eines Scavorgangs, FDM Bauteil



**Abbildung 5.2:** Extrahierte Konturen 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 5.3:** Extrahierte Konturen 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.

## 5.2 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 gefunden 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 nähste Punkt aus K2 gefunden wird. In dem ICP-Algorithmus werden alle Distanzen von der 'Best Matches' aufsummiert 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.

## 5.3 Transformation bestimmen

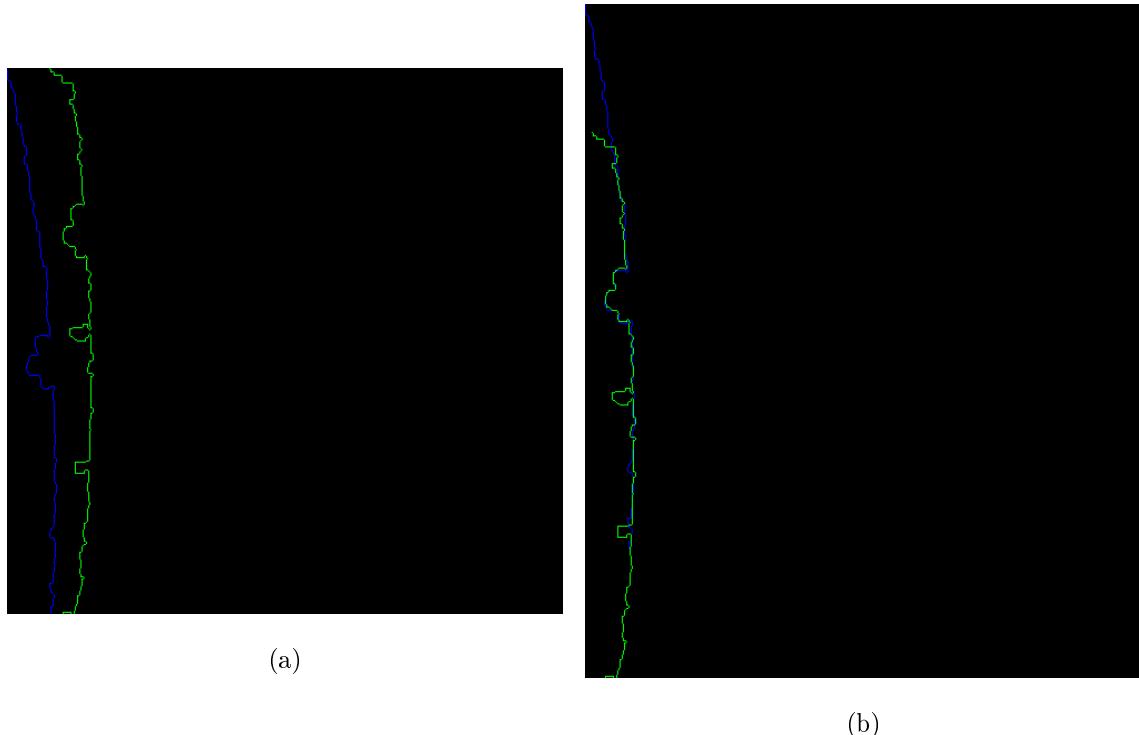
Gesucht ist die Transformation welche die maximale Überlappung der beiden Konturen K1 und K2 bietet. Um diese Transformation zu berechnen, muss der Grad der Überlappung für jede mögliche Positionierung ermittelt werden. Jeder Punkt aus K2 muss auf die Koordinaten eines beliebigen aber festen Punkts aus 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 werden 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.

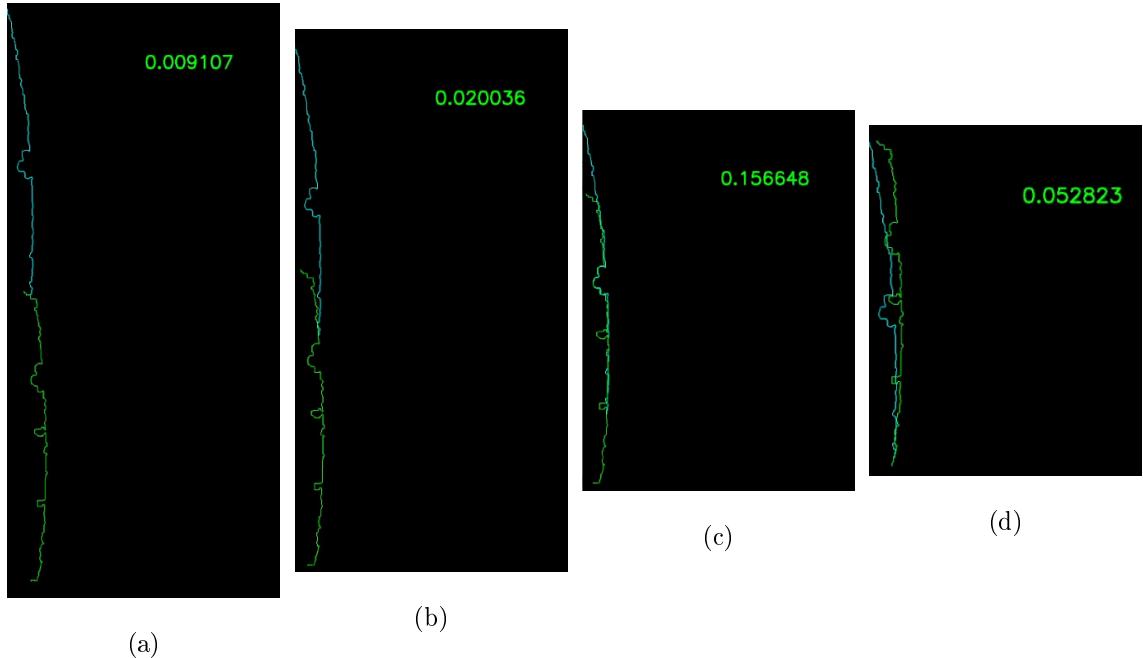
In Abbildung 5.4 (a) sind zwei Beispielkonturen zu sehen. Diese sind nicht angeordnet. Der ICP-Algorithmus würde diese beiden Konturen annähern, ohne sie zu überlappen. Das Ergebnis des vorgestellten Stitching Verfahrens ist in Abbildung 5.4 (b) zu sehen. Es ist zu erkennen das, trotz Messfehler und kleineren Unterschieden im überlappenden Bereich die korrekte Transformation ermittelt werden konnte. Diese Konturen stammen von einem additiv gefertigten Metallbauteil.



**Abbildung 5.4:** (a) Konturen K1 und K2 so positioniert wie sie in den Ursprungsbildern gefunden wurde. (b) Konturen, transformiert mit größter Überlappung, Grad der Überlappung: 24,26%

## 5.4 Visuelle Darstellung des Stitching Prozesses

In Abbildung 5.5 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. Die Bilder sind repräsentativ ausgewählt, im tatsächlichen Prozess wird K1 komplett über K2 bewegt.



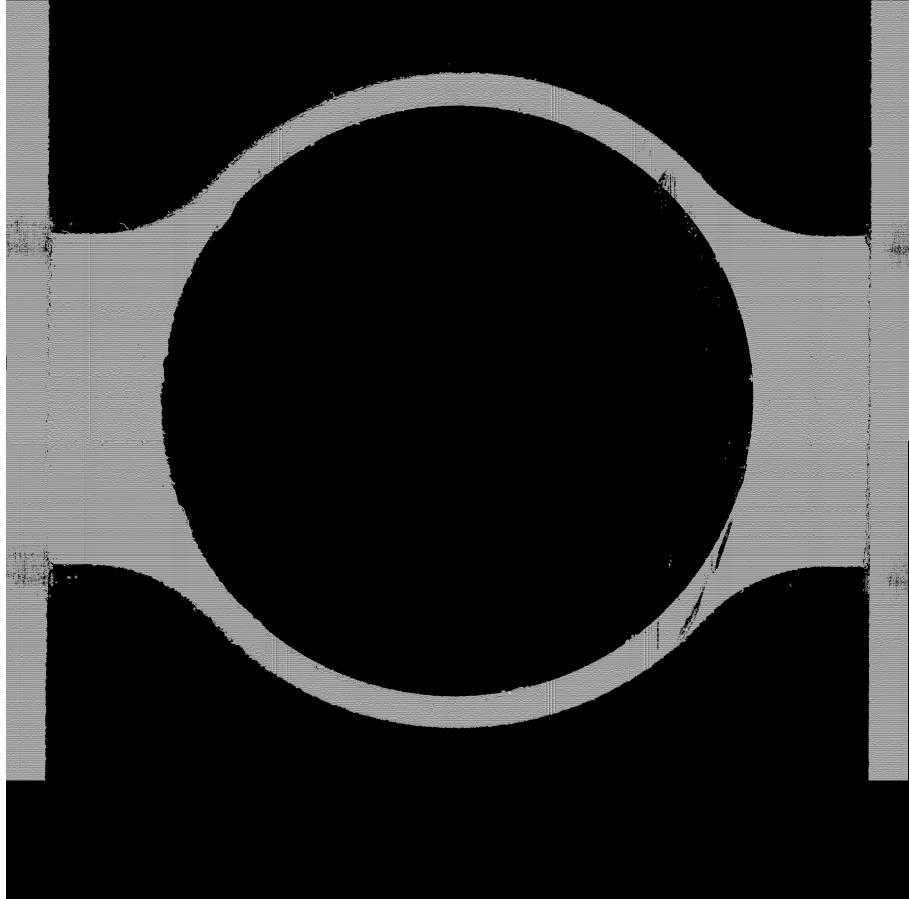
**Abbildung 5.5:** Verfahren im Verlauf dargestellt, a am Anfang, b nach n-durchgängen, c bei einem guten Match, d Kontur K2 komplett über K1 geschoben.

## 5.5 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.

## 5.6 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



**Abbildung 5.6:** Zusammengefügtes Bild

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 einem großen Längenunterschied verglichen werden, kann eine sehr hohe Übereinstimmung ermittelt werden, die aber keine tatsächliche Übereinstimmung ist. Dies liegt daran, dass es wahrscheinlicher ist eine Sequenz der Länge 5 in einer anderen Sequenz der Länge 500 zu finden. Das kann zum Beispiel vorkommen, wenn Konturen die am linken und rechten Bildrand in Abbildung 5.2 zu sehen sind, verglichen werden. Um dies zu vermeiden wird eine Bedienung eingeführt, dass die Länge der Konturen nicht zu sehr voneinander abweichen 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.



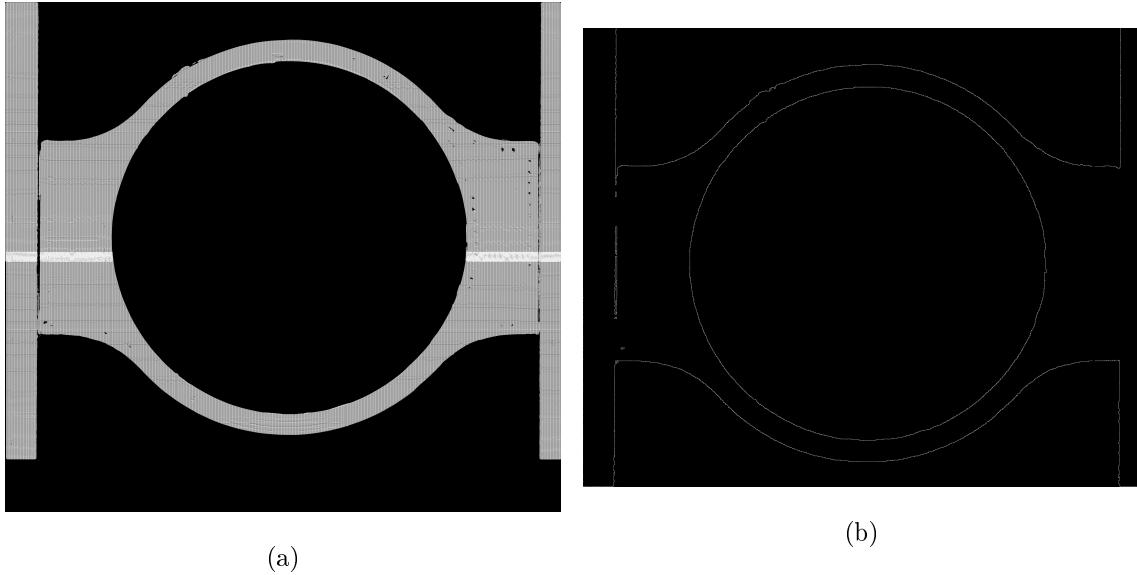
# Kapitel 6

## Spannkraftinduzierten Deformation

Im folgenden Kapitel wird die Methode zur Erkennung und Analyse von durch Spannkraft induzierten Deformationen erläutert. Ziel ist es, Deformationen anhand von zwei zusammengefügten Bildern aus unterschiedlichen Spannungsstufen zu identifizieren. Eine Deformation wird als äußerliche Veränderung des betrachteten Bauteils definiert, wobei diese Veränderung durch den Unterschied der Ränder der Bauteile bestimmt wird. Bevor eine Deformation erkannt werden kann, muss die Randgeometrie beider abgebildeter Bauteile erfasst werden. Zunächst werden in einem Schritt immer zwei Spannungsstufen miteinander verglichen, und die Deformationsdaten werden anschließend gespeichert. Die Auswertung der resultierenden Daten erfolgt in einem separaten Schritt, wodurch es möglich ist, mehrere Spannungsstufen miteinander zu vergleichen, ohne dass die Komplexität des Verfahrens ansteigt.

### 6.1 Deformation zwischen zwei Spannungszuständen

Wie beschrieben, wird die Deformation zwischen zwei Bauteilen als Differenz der Randgeometrie definiert. Um die Randgeometrie eines Bauteils zu ermitteln, kann erneut die Kontursuche [VERWEIS] angewendet werden. Die ermittelten Konturen bilden die Ränder des Bauteils ab und erfassen sowohl äußere als auch innere Geometrien, was die Deformationserkennung ermöglicht. In Abbildung 6.1 ist ein zusammengefügtes Bild sowie die erkannte Randgeometrie eines Bauteils dargestellt.



**Abbildung 6.1:** (a) Zusammengefügtes Bild des FDM Demonstratorbauteils, Spannungsstufe 0  
 (b) Randgeometrie von (a), die zur Erkennung der Deformation genutzt wird

### 6.1.1 Randgeometrien übereinander legen

Um die Differenz zweier Randgeometrien bestimmen zu können, müssen diese präzise übereinander gelegt werden. Dies gewährleistet, dass die resultierende Differenz minimal ist. Der bereits beschriebene Ansatz des Konturmatchings [VERWEIS] könnte auch hier genutzt werden. Allerdings müssen in diesem Fall die gesamten Konturen berücksichtigt werden und nicht nur der überlappende Ausschnitt. Das zuvor vorgestellte Verfahren ist jedoch für die Konturen eines gesamten Bauteils nicht performant genug, um eine akzeptable Laufzeit sicherzustellen.

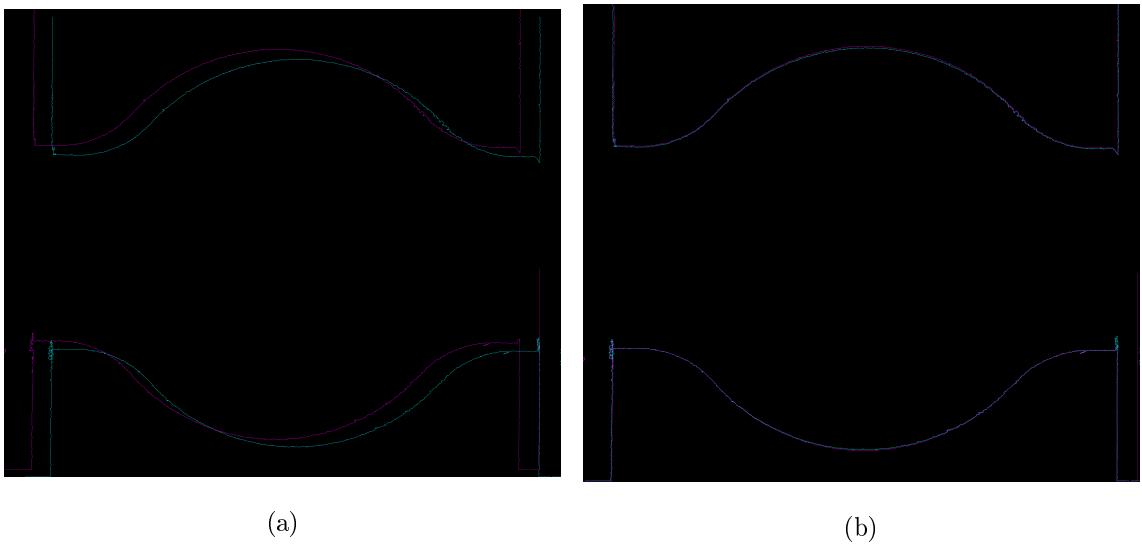
Deshalb wird in diesem Kontext ein alternatives Verfahren eingesetzt. Es basiert auf dem Prinzip, Punktpaare zu finden, deren euklidische Distanz gleich null ist. Anstatt jedoch jeden Punkt der Zielkontur mit jedem Punkt der Ursprungskontur zu vergleichen, wird ein maximaler Radius definiert, innerhalb dessen nach benachbarten Punkten gesucht wird. Hierfür muss die Kontur zunächst in eine zweidimensionale Datenstruktur überführt werden. Dieser zusätzliche Aufwand führt zu einer erheblichen Verkürzung der Laufzeit.

Ähnlich dem bereits beschriebenen ICP-Algorithmus [VERWEIS] wird eine Transformation berechnet, die eine Kontur an eine andere annähert. Die Berechnung der Transformation erfolgt nach folgendem Algorithmus:

1. Zu jedem Punkt in der Ursprungskontur wird der Nachbarpunkt in der Zielkontur gesucht, der den kleinsten euklidischen Abstand besitzt.

2. Wird kein solcher Punkt in einem definierten Radius gefunden, wird der nächste Punkt der Ursprungskontur betrachtet. Falls ein Punkt gefunden wurde, wird der Vektor gebildet der die Punkte der Ursprungs- und Zielkontur verbindet.
3. Wenn alle Punkte der Ursprungskontur betrachtet sind, wird der Durchschnitt aller gefundenen Vektoren gebildet.
4. Da die Transformation auf Pixel angewendet wird, muss sie ganzen Zahlen entsprechen. Wenn der Absolutwert beider Vektorelemente der Transformation unter 0.2 Pixel fällt wird die Transformation auf  $(0, 0)$  gerundet. Ansonsten wird auf die nächste ganze Zahl gerundet.

Ist die Transformation ungleich dem Vektor  $(0, 0)$  wird sie auf die Ursprungskontur angewendet und erneut die Transformation berechnet. Dies wird so lange wiederholt bis die Transformation dem Nullvektor entspricht. Wenn dies geschieht, sind beide Konturen, und damit die Randgeometrien der Bauteile angenähert. Um Rechenzeit zu sparen werden vor dem Ermitteln der ersten Transformation die Massenmittelpunkte beider Bauteilgeometrien berechnet und übereinander gelegt. In Abbildung 6.2 sind die Konturen vor und nach dem Überlappungsprozess abgebildet.



**Abbildung 6.2:** (a) Kontur des Bauteils AM2 bei Spannungsstufe null, vor dem übereinanderlegen mit der Kontur von Spannungsstufe drei. (b) Die Konturen von AM2 bei Spannungsstufen null und drei. Vollständig übereinander gelegt.

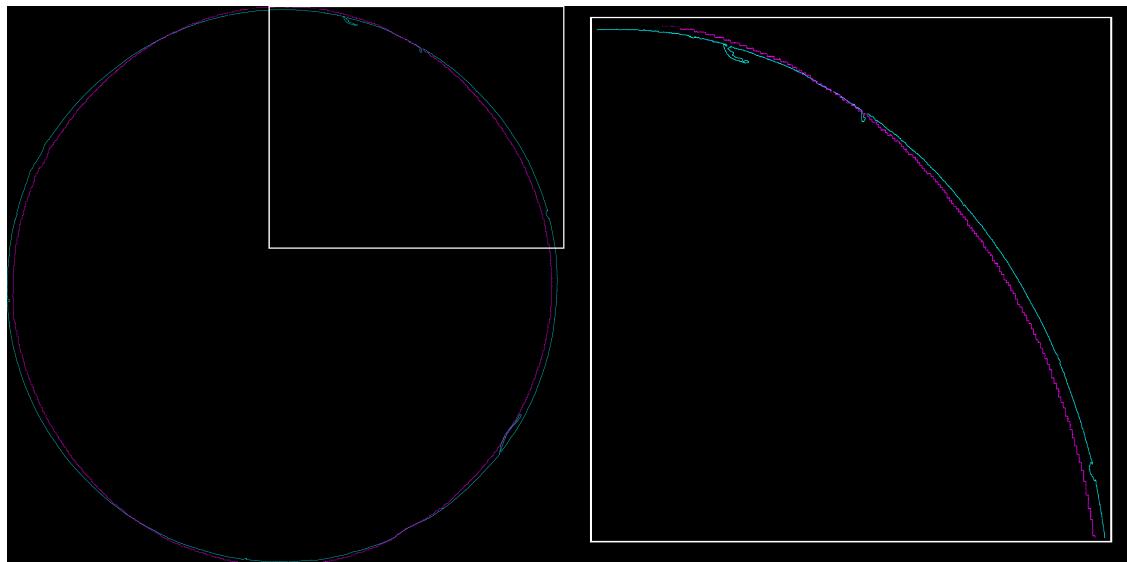
### 6.1.2 Deformation messen

[Deformation ausführlich beschreiben] Nachdem die beschriebenen Schritte erfolgt sind, kann die Deformation bestimmt werden. Hierfür wird über die gesamte x-Achse des Bildes iteriert und die kleinste Differenz zwischen zwei Punkten gebildet. Diese entspricht dann

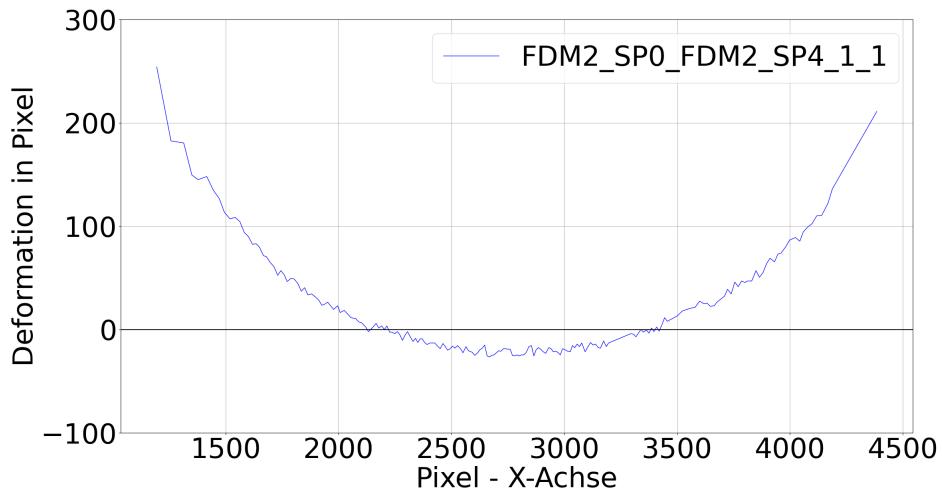
einer Abweichung. Da innere und äußere Randgeometrie separat betrachtet werden, kann es immer nur zwei solcher Punktepaare geben, eins am oberen Ende des Bauteils und eins am unteren Ende. Es wird der euklidische Abstand beider Punktepaare gebildet und aufsummiert. So entsteht ein Datensatz für ein Bild, dass die Differenz zweier Spannungsstufen ausgibt. In Abbildung 6.5 ist ein solcher Datensatz zu sehen.

Innere und äußere Randgeometrien werden separat betrachtet und analysiert. In Abbildung 6.3 ist die Deformation des inneren Kreises visuell dargestellt. In Abbildung 6.4 sind die Deformationswerte grafisch dargestellt.

Es wurde ein per FDM gefertigtes Bauteil eingespannt und zwei Spannungsstufen verglichen. Die Blau sehende Linie bildet die Randgeometrie des Bauteils ab, dass mit Spannungsstufe null eingespannt wurde. Das entspricht hier nur einer lockeren Einspannung in den Schraubstock. Die Magenta gefärbte Linie ist die Spannungsstufe sechs des gleichen Bauteils. Hier wurde der Schraubstock mit einer Kraft von ca. 250 nm angezogen.

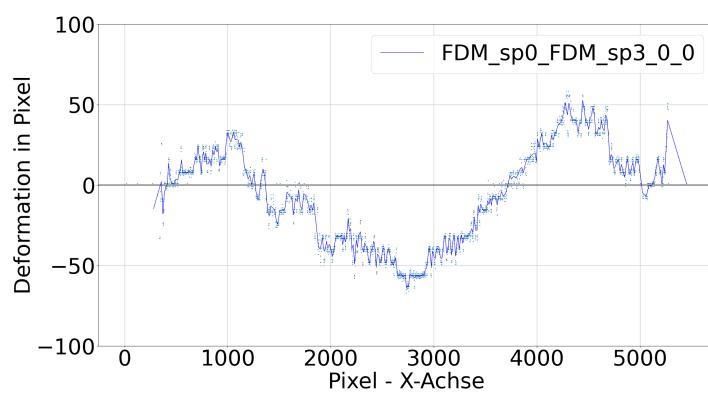


**Abbildung 6.3:** Deformation der inneren Bauteilgeometrie des Demonstratorbauteils visuell dargestellt

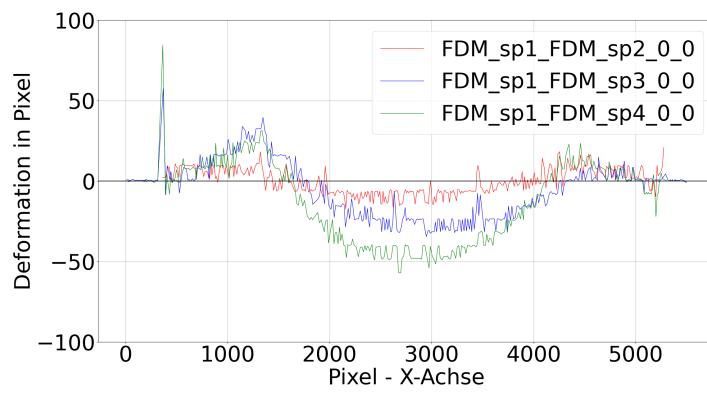


**Abbildung 6.4:** Deformation der inneren Bauteilgeometrie des Demonstratorbauteils als Graph

Es ist gut zu erkennen, dass sich das Bauteil im mittleren Bereich ausgedehnt hat und in den Randbereichen schmäler geworden ist. Dieser Datensatz unterliegt einer relativ großen Streuung. Um mehrere Spannungsstufen zu vergleichen, wird der Datensatz zu einer Geraden zusammengefasst. Diese Gerade ist auch in 6.5 in Blau zu sehen. Sie wird gebildet, indem immer zehn Datenpunkte zu einem zusammengefasst werden. So können auch mehrere Spannungsstufen visuell dargestellt und verglichen werden.



**Abbildung 6.5:** Differenz von zwei Spannungsstufen bei einem FDM Bauteil, äußere Bauteilgeometrie.



**Abbildung 6.6:** Differenz von mehreren Spannungsstufen bei einem FDM Bauteil

# Kapitel 7

## Validierung

### 7.1 Analyse der spannkraftinduzierten Deformation

[explizit Unterschiede FDM und additiv herausstellen mit genauen Angaben über die Deformationen]

Mithilfe dieser Funktion können unterschiedliche Bauteilgeometrien und Herstellungsprozesse auf ihre Deformation hin verglichen werden. Bei einem additiv gefertigten Metallteil tritt bei den gleichen Spannungsstufen eine deutlich kleinere, aber dennoch erkennbare Deformation auf. Zusätzlich zeigt sich, dass bei verschiedenen Herstellungsprozessen trotz gleicher Geometrie unterschiedliche Verformungen auftreten. Die verschiedenen Verformungen und Auswirkungen werden später in diesem Kapitel behandelt.

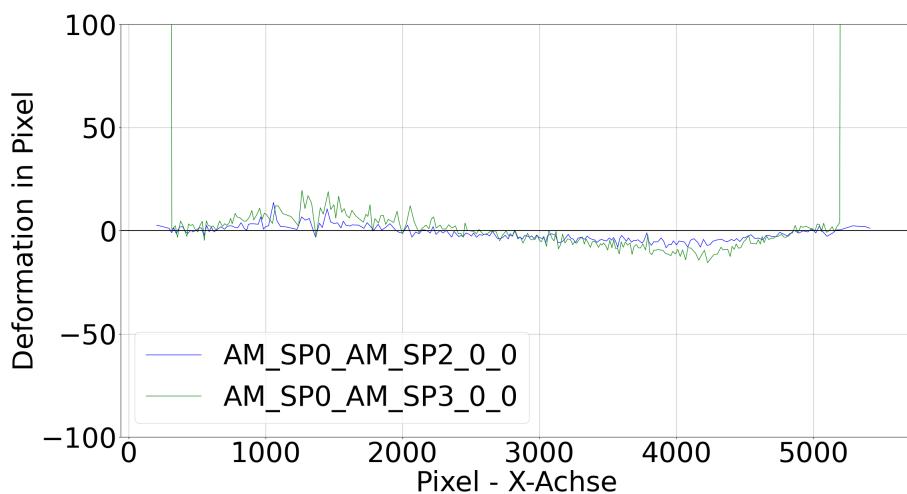


Abbildung 7.1: Differenz von mehreren Spannungsstufen bei einem AM Metall Bauteil

### 7.1.1 Versuchsaufbau

In Abbildung 7.2 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.

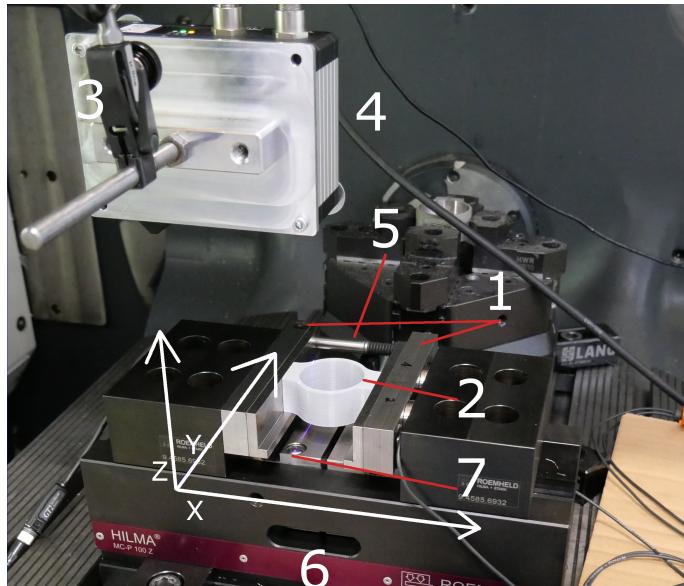


Abbildung 7.2: Versuchsaufbau

## 7.2 Zusätzliche Messinstrumente

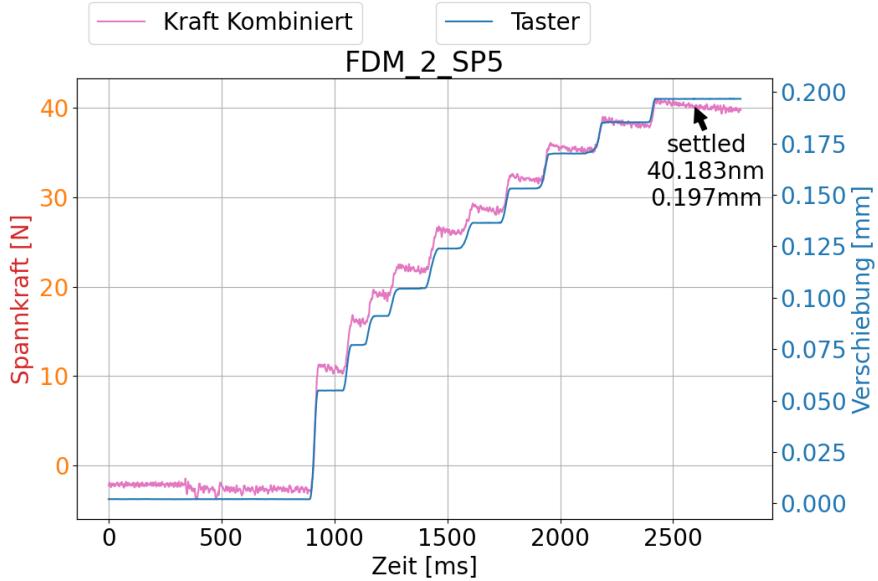
Zusätzlich zu dem Scanner werden noch mit weiteren Messinstrumenten Daten erfasst. In Abbildung 7.2 unter der Nummer 5 ist ein mechanischer Verschiebungsmesser zu sehen.

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]

### 7.3 Messergebnisse

Es wurden fünf Bauteile mit verschiedenen Spannungsstufen gemessen. Für jede Spannungsstufe wurde die Kraft, die auf das Bauteil wirkte sowie die Verschiebung des Schraubstocks gemessen. Jede Spannungsstufe wurde durch Stufenweises anziehen des Schraubstocks erreicht. Die Spannkraftkurve eines einzelnen Einspannvorgangs ist in Abbildung 7.3 zu sehen. In der Spannungskurve ist ein elastischer Bereich für das Bauteil zu sehen, in dem sich die Spannkraft zurückbewegt, nachdem kein Anzugdrehmoment mehr anliegt. Aus diesem Grund kann nicht der maximale Wert der Spannkraft angenommen werden, sondern es muss ein Wert gewählt werden der nach dem maximalen Ausschlag liegt. Dieser wurde über die erste Ableitung der Spannkraftkurve gefunden. Sobald der Absolutwert der Steigung unter 0.0009 N fällt, wir die Spannkraft und Auslenkung an diesem Punkt gewählt. 0.0009 N wurde empirisch ermittelt um bei allen Bauteilen einen angemessenen Wert zu liefern. Die Spannkraft wurde an zwei Achsen aufgenommen und zu der Gesamtkraft aufsummiert.



**Abbildung 7.3:** Kraft- und Verschiebung der Spannungsstufe fünf bei einem FDM Bauteil

Diese maximalen Werte für die Spannkraft und Auslenkung wurden für jedes Bauteil akkumuliert und sind in Abbildung 7.4 dargestellt. Die mit dem FDM-Prozess hergestellten Bauteile wurden jeweils in sechs Spannungsstufen gemessen. Zwischen den Stufen wurde versucht, eine konstante Kraft auf das Bauteil auszuüben. Durch den manuellen Prozess des Anziehens des Schraubstocks war dies jedoch nicht immer möglich. Die Metallbauteile unterscheiden sich durch ihren Aufbau. Alle basieren auf dem gleichen 3D-Modell, besitzen jedoch unterschiedliche Stützstrukturen. Im Bauteil AM0 ist die vollständige Stützstruktur vorhanden, während in den Bauteilen AM1 und AM2 die Stützstruktur in unterschiedlicher Tiefe ausgebohrt wurde. Die Bauteile sind in Abbildung 7.5 dargestellt.

Das Bauteil AM0 wurde nur mit zwei Spannungsstufen gemessen, da bereits bei der zweiten Stufe über 2500 N Kraft erforderlich war, um das Bauteil nur minimal in x-Richtung zu deformieren. Dies zeigt, dass die Stützstruktur einen erheblichen Einfluss auf die Verformbarkeit eines Bauteils hat. Beim Bauteil AM1 wurden 2500 N erst nach vier Spannungsstufen erreicht. Vergleicht man die Verformung in x-Richtung mit der Verformung von AM2, zeigt sich, dass das Bauteil ohne Stützstruktur bei ähnlicher Krafteinwirkung etwa doppelt so weit in x-Richtung deformiert wurde.

Die FDM-Bauteile wurden mit deutlich weniger Kraft eingespannt. Hier wurde bei etwa 250 N gestoppt, dennoch ist die Verschiebung der Teile deutlich größer als bei den AM-Bauteilen. Diese Werte wurden aufgenommen, um die visuelle Deformationserkennung zu validieren.

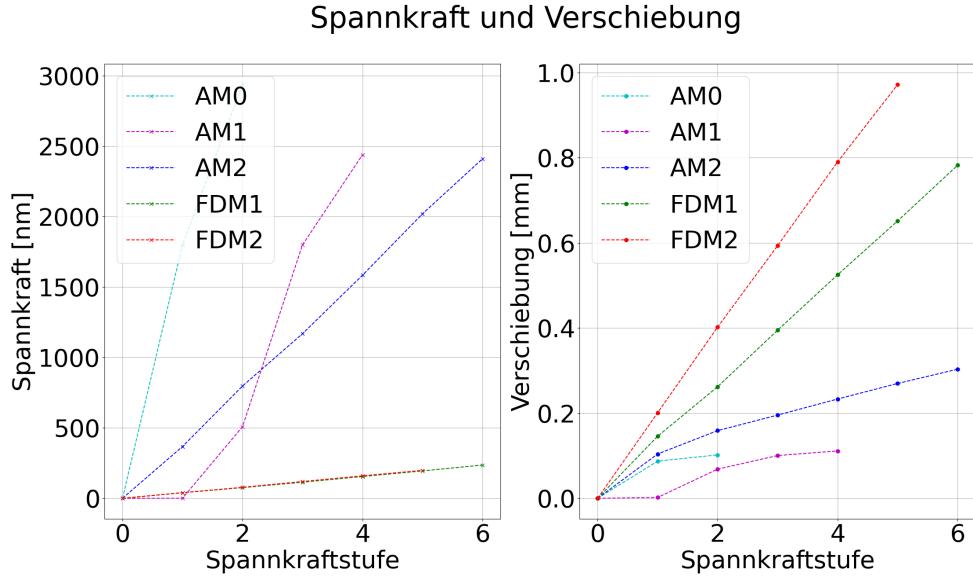


Abbildung 7.4: Akkumulierte Kraft- und Verschiebung jedes Bauteils

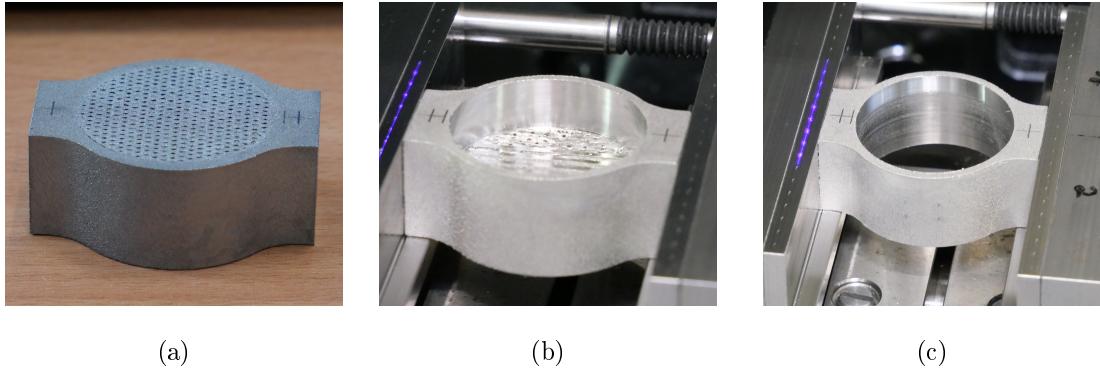
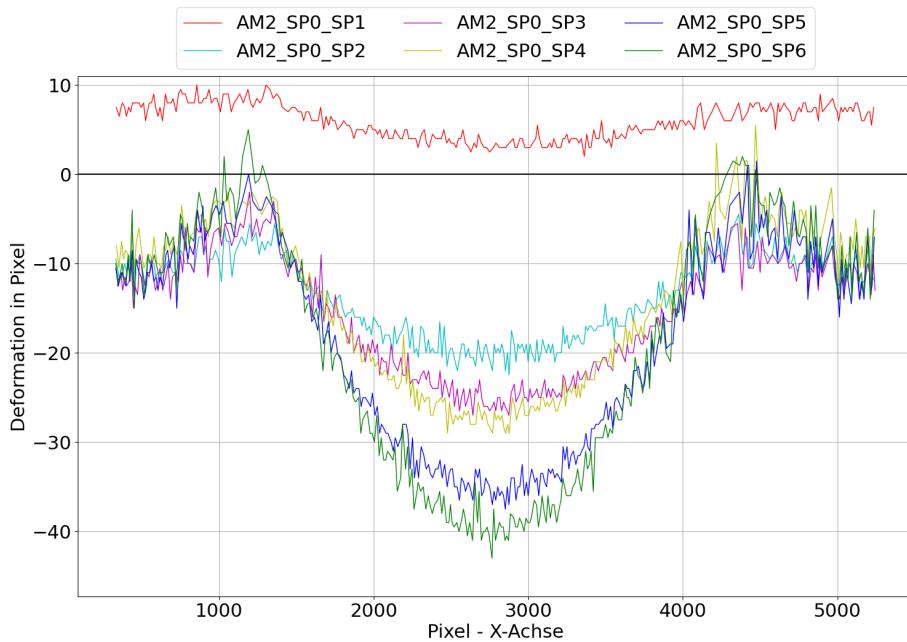


Abbildung 7.5: (a): AF Metallbauteil mit voller Stützstruktur, Bezeichnung: AM0. (b): AF Bauteil mit der halben Stützstruktur ausgebohrt, Bezeichnung: AM1. (c): AF Bauteil ohne Stützstruktur, Bezeichnung: AM2

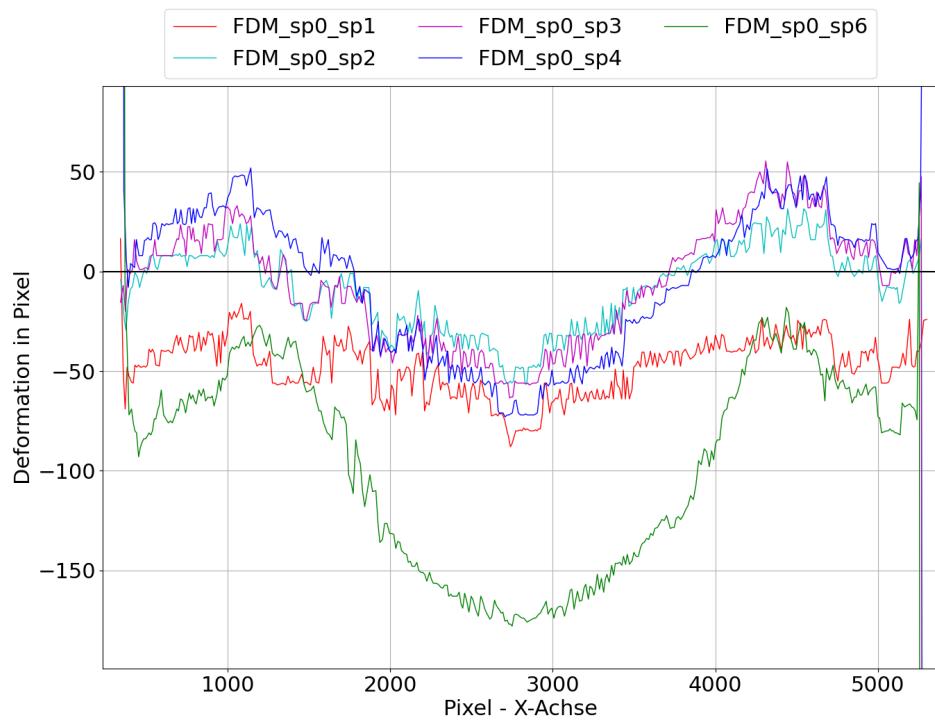
## 7.4 Ergebnisse der optischen Deformationsanalyse

In Abbildung 7.6 und Abbildung 7.7 sind die erkannten, vertikalen Deformationen grafisch dargestellt. Jeweils von Spannungsstufe null bis Spannungsstufen Sechs. Bei dem FDM Bauteil fehlt die Spannungsstufen fünf, diese ist leider bei der händischen Dateiname Vergabe überschrieben worden und konnte deshalb nicht ausgewertet werden. Aus diesem Grund ist eine so große Lücke in der Abbildung 7.7. Außerdem sind große Unterschiede in der absoluten Deformation zu sehen. Zum Beispiel die rote Kurve in Abbildung 7.6 die den Unterschied der Spannungsstufen null und eins angibt. Diese Kurve sollte näher an null der y-Achse liegen. Dies liegt an Ungenauigkeiten in dem Stitching Verfahren. In den Graphen

ist also auf die Steigung der Deformationskurve zu achten. In der Steigung erkannt man das sich die Bauteile in mittleren Bereich nach außen hin deformiert haben und in den Randbereichen sich nach innen und dann wieder nach außen deformieren. Außerdem ist im Vergleich der beiden Graphen zu sehen das sich das FDM Bauteil deutlich mehr verformt hat. Hier beträgt die größte Deformation über 150 Pixel. Bei dem Metallbauteil, das mit der zehnfachen Kraft eingespannt wurde (250 nm vs. 2500 nm) sind es nur knapp 40 Pixel. Trotzdem ist zu sehen das sich die Bauteile, die auch die gleiche Geometrie teilen, auf die gleiche Weise verformt haben.



**Abbildung 7.6:** Sechs Deformationsstufen bei einem AM Bauteil von 0 bis 2500 nm



**Abbildung 7.7:** Fünf Deformationsstufen bei einem FDM Bauteil von 0 bis 250 nm



# Kapitel 8

## Anwendung und Algorithmus

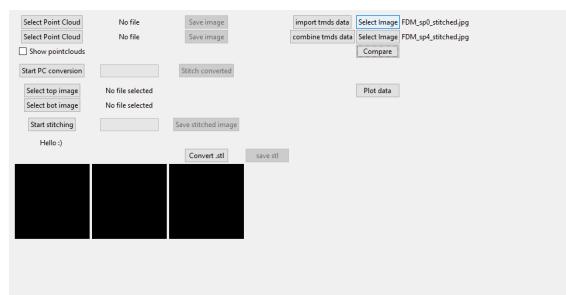
Ziel dieser Arbeit ist es nicht nur eine Methodik zur optische Deformationserkennung zu entwickeln, sondern diese Methodik auch in einer Anwendung einfach nutzbar zu machen.

Diese Kapitel dokumentiert diese Anwendung und geht auf Herausforderungen in der Entwicklung ein.

### 8.1 Anwendung

Die Anwendung beeinhaltet verschiedene Funktionen, alle Funktionen können separat benutzt werden. Dadurch müssen zeitintensive Vorgänge nicht wiederholt werden, sondern Zwischenergebnisse können abgespeichert und neu geladen werden.

Die Anwendung bietet Funktionen um Resultate in dem entsprechenden Dateiformat zu speichern. Soweit möglich werden Dateinamen Empfehlungen automatisch ermittelt, daher ist es zu empfehlen von Anfang an mit einem einheitlichen Namensschema bei den 3D-Scannerdaten zu arbeiten. Das Schema Bauteilbeschreibung \_Spannungsstufe \_Scanderdurchlauf.ply wird empfohlen. Ein Beispiel für die zweite Pointcloud eines FDM-Bauteil bei der vierten Spannungsstufen wäre also FDM0\_SP4\_2.ply"



**Abbildung 8.1:** Anwendungsoberfläche

[Hier will ich noch auf die folgenden Dinge eingehen:]

- Alle Buttons und Displays erklären

- Nebenläufigkeit (Threads) um Prozesse wie das Laden von Pointclouds zu verschnellern.
- python -> c code um arbeiten in Arrays und mit großen Daten zu verschnellern  
(Vergleich Laufzeit ca. 10fach schneller)

## Kapitel 9

# Zusammenfassung und Ausblick

[Stichpunkte]

- Auf die Unterschiede der Materialien eingehen. Auch auf die Ähnlichkeiten wo die Deformation auftreten.
- Was das für die Bauteile bedeutet.
- Verbesserung: Stitching verbessern, um einheitlichere Ergebnisse zu erhalten.
- Forschungsansätze: Veränderung in der inneren Struktur der Bauteile vergleichen.



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Akkuranz der Fotogrammetrie . . . . .	6
2.2	Akkuranz einer 3D-Datei ist abhängig von der Anzahl der gespeicherten Eckpunkte am Beispiel des Demonstratorbauteils. (a) 1512 Punkte (b) 52 Punkte (c) 30 Punkte . . . . .	8
2.3	Funktionsweise eines Laserscanners [todo was ist abgebildet] . . . . .	8
2.4	Prinzip des ICP-Algorithmus [todo Größe anpassen] . . . . .	9
4.1	Auftreten Höhe . . . . .	15
4.2	Metallteil gefiltert . . . . .	15
4.3	Konvertierung Pointcloud zu Bild, Oberhalb ohne Filter, unterhalb mit den zehn Prozent häufigsten Höhenwerten . . . . .	16
5.1	Oberes Bild eines Scanvorgangs, FDM Bauteil . . . . .	20
5.2	Extrahierte Kontouren des Bildes ohne Pre-Processing . . . . .	20
5.3	Extrahierte Kontouren des Bildes ohne Pre-Processing, zugeschnitten auf den (vermutlich) überlappenden Bereich . . . . .	20
5.4	(a) Konturen K1 und K2 so positioniert wie sie in den Ursprungsbildern gefunden wurde. (b) Konturen, transformiert mit größter Überlappung, Grad der Überlappung: 24,26% . . . . .	22
5.5	Verfahren im Verlauf dargestellt, a am Anfang, b nach n-durchgängen, c . .	23
5.6	Zusammengefügtes Bild . . . . .	24
6.1	(a) Zusammengefügtes Bild des FDM Demonstratorbauteils, Spannungsstufe 0 (b) Randgeometrie von (a), die zur Erkennung der Deformation genutzt wird . . . . .	28
6.2	(a) Kontur des Bauteils AM2 bei Spannungsstufe null, vor dem übereinanderlegen mit der Kontur von Spannungsstufe drei. (b) Die Konturen von AM2 bei Spannungsstufen null und drei. Vollständig übereinander gelegt. . .	29
6.3	Deformation der inneren Bauteilgeometrie des Demonstratorbauteils visuell dargestellt . . . . .	30
6.4	Deformation der inneren Bauteilgeometrie des Demonstratorbauteils als Graph	31

6.5	Differenz von zwei Spannungsstufen bei einem FDM Bauteil, äußere Bauteilgeometrie. . . . .	31
6.6	Differenz von mehreren Spannungsstufen bei einem FDM Bauteil . . . . .	32
7.1	Differenz von mehreren Spannungsstufen bei einem AM Metall Bauteil . . .	33
7.2	Versuchsaufbau . . . . .	34
7.3	Kraft- und Verschiebung der Spannungsstufe fünf bei einem FDM Bauteil .	36
7.4	Akkumulierte Kraft- und Verschiebung jedes Bauteils . . . . .	37
7.5	(a): AF Metallbauteil mit voller Stützstruktur, Bezeichnung: AM0. (b): AF Bauteil mit der halben Stützstruktur ausgebohrt, Bezeichnung: AM1. (c): AF Bauteil ohne Stützstruktur, Bezeichnung: AM2 . . . . .	37
7.6	Sechs Deformationsstufen bei einem AM Bauteil von 0 bis 2500 nm . . . . .	38
7.7	Fünf Deformationsstufen bei einem FDM Bauteil von 0 bis 250 nm . . . . .	39
8.1	Anwendungsoberfläche . . . . .	41

# Literaturverzeichnis

- [AKS15] Bhrigu 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.
- [BAB20] Vincent Benoist, 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.
- [BGH<sup>+</sup>19] Lauren Bohner, Diego Diaz Gamba, Marcel Hanisch, Bruno Silva Marcio, Pedro Tortamano Neto, Dalva Cruz Laganá, and Newton Sesma. Accuracy of digital technologies for the scanning of facial, skeletal, and intraoral tissues: A systematic review. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 121(2):246–251, 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.
- [JJ22] Aniket Jadhav and Vijay S. Jadhav. A review on 3d printing: An additive manufacturing technology. *Materials Today: Proceedings*, 62:2094–2099, 2022. International Conference on Design, Manufacturing and Materials Engineering.
- [KP08] Kenton McHenry and Peter Bajcsy. *An overview of 3D data content, file formats and viewers*. 2008.
- [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.
- [SGLG<sup>+</sup>19] Matthias Schneck, Matthias Gollnau, Max Lutter-Günther, Benjamin Haller, Georg Schlick, Marius Lakomiec, and Gunther Reinhart. Evaluating the use of additive manufacturing in industry applications. *Procedia CIRP*, 81:19–23, 2019. 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS), Ljubljana, Slovenia, June 12-14, 2019.
- [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.