

Bachelorarbeit

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

Niklas Thieme

13. 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

1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1 Additive Fertigung	3
2.2 Limitierungen von AF	4
2.3 Reverse Engineering	5
2.4 3D Rekonstruktion	6
2.4.1 Digitales Abbild	8
2.4.2 Scanner und Datenerfassung	9
2.5 Transformationen	9
2.6 ICP-Algorithmus	10
3 Methodik	11
3.1 Verfahren zur optische Spannkraftdeformationserkennung	12
3.2 Vorgehen	12
4 Datenaufbereitung	15
4.1 Pointcloud filtern	15
4.2 Pointcloud in Bild konvertieren	16
5 Stitching	21
5.1 Feature Erkennung	21
5.2 Differenzierung von Punkten	23
5.3 Transformation bestimmen	23
5.4 Visuelle Darstellung des Stitching Prozesses	25
5.5 Bilder zusammenfügen	25
5.6 Probleme und Lösungen im Verfahren	26
6 Spannkraftinduzierten Deformation	29
6.1 Deformation zwischen zwei Spannungszuständen	29
6.1.1 Randgeometrien übereinander legen	30

6.1.2	Deformation messen	31
7	Validierung	35
7.1	Analyse der spannkraftinduzierten Deformation	35
7.1.1	Versuchsaufbau	36
7.2	Zusätzliche Messinstrumente	36
7.3	Messergebnisse	37
7.4	Ergebnisse der optischen Deformationsanalyse	39
8	Anwendung und Algorithmus	43
8.1	Anwendung	43
9	Zusammenfassung und Ausblick	45
	Abbildungsverzeichnis	48
	Literaturverzeichnis	51

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⁺19]. Herausforderungen können die Bauteilgeometrie, die möglichen Materialien oder den Herstellungsprozess betreffen. Die Herausforderungen bei der Bauteilgeometrie umfassen die minimalen Wandstärken sowie das maximale Bauteilvolumen, das von den technischen Spezifikationen des verwendeten 3D-Druckers abhängt. Für das (AF) stehen verschiedene Materialien zur Verfügung, die sich jedoch von den in der konventionellen, spanenden Fertigung verwendeten Werkstoffen unterscheiden. In der AF werden hauptsächlich Legierungen auf Basis von Titan, Aluminium, Nickel oder Chrom eingesetzt. Diese Materialien müssen zudem in einer für das Verfahren geeigneten Form vorliegen, meistens in Form von Pulver oder Draht. Der Prozess zur Herstellung von Pulver oder Draht aus diesen Materialien ist kostenintensiv und schränkt die Auswahl der verwendbaren Materialien ein. Aufgrund der schichtbasierten Natur der AF sind Stützstrukturen notwendig, um Bauteile mit geometrischen Formen, die Überhänge aufweisen, erfolgreich produzieren zu können. [VBC⁺17]

Einige dieser Herausforderungen, können durch Nachbearbeitung des Bauteils gelöst werden. Dazu gehört das Entfernen der Stützstrukturen und die Verbesserung der Oberflächenqualität. 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 Extremfallen 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 in Datenerfassung, 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 angezogen 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 werden verschiedene Optimierungen dargelegt, die das Verfahren Zeit- und Speichereffizienter machen und die Genauigkeit der Ergebnisse verbessern.

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

Für den Prozess der Deformationserkennung sind grundlegende Kenntnisse der Additiven Fertigung sowie des 3D-Designs von Vorteil. In diesem Kapitel werden sowohl diese Grundlagen als auch der aktuelle Stand der Technik erläutert.

2.1 Additive Fertigung

Additive Fertigung (AF) ist unabhängig von dem Werkstoff ein Bereich, in dem viel geforscht und innoviert wird. In fast jedem Industriebereich wird versucht, ein bestehendes Design oder Modell zu optimieren und zu 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, welche Benutzern ermöglicht, komplexe Bauteilgeometrien zu erstellen, ohne die Limitierung von konventionellen spanenden Herstellungsverfahren zu erstellen. Limitierungen von konventionellen spanenden Herstellungsverfahren kann ein hoher Materialverschleiß oder die Notwendigkeit von spezialisierten Werkzeugen sein. [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 [CM23].

Bauteile können mit verschiedenen Werkstoffen, darunter sind Polymeren, Metalle und Keramik, additiv gefertigt werden. Metalle haben vor allem in den letzten Jahren an Relevanz gewonnen. Zusätzlich zu den schon genannten Vorteilen von AF, bietet Metall als Werkstoff großen 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 [Gar23].

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 geringe 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 zehnmal steifer. [VGRH21] Fensterführungen wurden 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. 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. Wie schon in Kapitel 1 beschrieben, sind Stützstrukturen notwendig, wenn das zu produzieren Bauteil Überhänge aufweist, die eine Steigung von ungefähr 30° unterschreiten. Der Grad des Überhangs variiert je nach verwendetem Material und Verfahren.

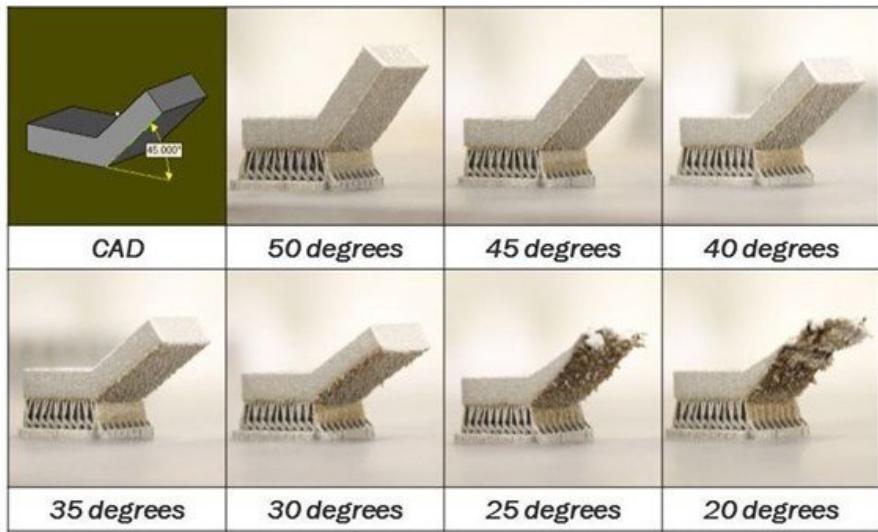


Abbildung 2.1: Überhangtests mit unterschiedlichen Resultaten und Oberflächenqualitäten in sieben verschiedenen Winkeln [MZQ⁺20]

2.3 Reverse Engineering

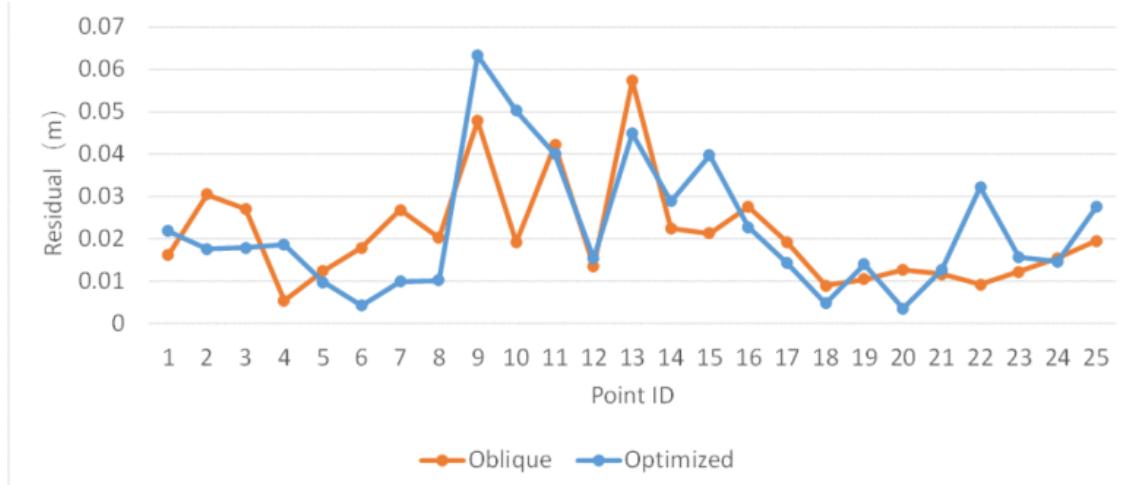
Reverse Engineering beschreibt den Prozess aus einem bestehenden Produkt oder Objekt ein digitales Abbild zu erzeugen. Dabei sind meistens wenig oder keine technischen Details über das Objekt verfügbar. [HL21] Auch wenn Baupläne vorhanden sind, kann es trotzdem notwendig sein, Reverse Engineering zu 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 Frachtmaschine umzubauen. Wie schon erwähnt, wird zur erfolgreichen Weiterbearbeitung ein möglichst genaues digitales Abbild benötigt. Ist dies nicht der Fall, müssen nicht passende Teile erneut hergestellt werden, was die Material-

und Personalkosten deutlich erhöht. Es ist also im wirtschaftlichen Interesse beim ersten Schritt, dem Erstellen der digitalen Version, ein möglichst genaues Ergebnis zu erzielen.

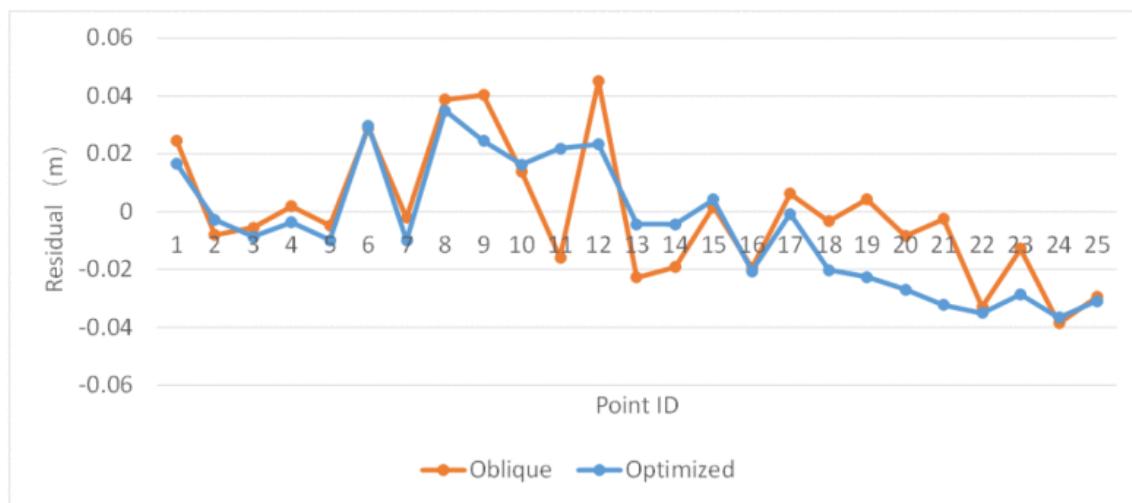
2.4 3D Rekonstruktion

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 Genauigkeit 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⁺¹⁹]. Bei Lidar-Scans eines Sportkomplexes wurde eine Standardabweichung von ± 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 2.2: Genauigkeit der Fotogrammetrie bei Bildern die aus 600 m Höhe aufgenommen wurden [EAA23].

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 angewendetem Verfahren kann dieser Anstieg sogar exponentiell sein [XY09].

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 Genauigkeit, 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 Genauigkeit und Dateigröße beeinflusst werden. Häufig werden hier Floats oder Integer in verschiedener Bittiefe gewählt.

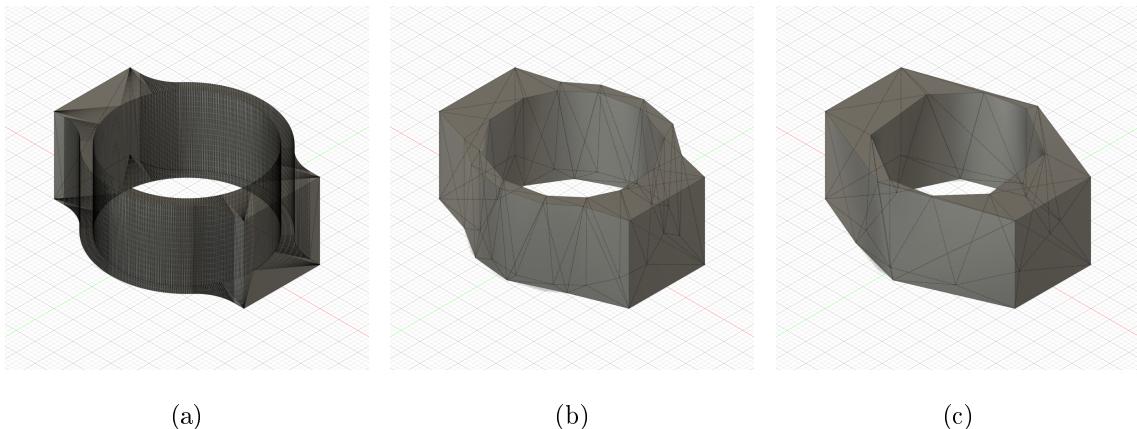


Abbildung 2.3: Genauigkeit einer 3D-Datei ist abhängig von der Anzahl der gespeicherten Eckpunkte am Beispiel des Demonstratorbauteils. (a) 1512 Punkte (b) 52 Punkte (c) 30 Punkte

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 2.4 ist ein Messbereich für den Scanner vom Typ ScanControl-LLT30xx 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 die breiter sind als die maximale Breite der Scanebene, in Abbildung 2.4 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 Scancvorgängen 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.

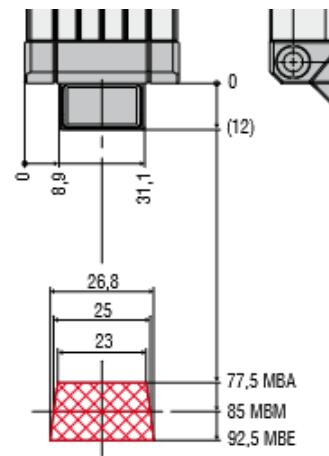


Abbildung 2.4: Funktionsweise eines Laserscanners [todo was ist abgebildet]

2.5 Transformationen

Eine Transformation ist eine Funktion, die eine Menge von Punkten in einem Raum auf eine andere Menge von Punkten in demselben oder einem anderen Raum abbildet. Die-

se Transformationen werden verwendet, um die Lage, Form oder Größe von Objekten zu verändern. Es gibt drei Basis Arten der Transformationen: Translation, Rotation und Skalierung. Die Translation verschiebt alle Punkte um einen bestimmten Vektor in eine bestimmte Richtung. Rotation: Drehen eines Objekts um einen Punkt (in 2D) oder eine Achse (in 3D). Veränderung der Größe eines Objekts durch Multiplikation der Koordinaten mit einem Skalierungsfaktor [XY09].

2.6 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] Der Algorithmus errechnet eine lokale, optimale Transformation, die ein Daten-Set dem anderen annähern kann. [BM92] Um diese Transformation, zu bestimmen werden zuerst die Distanzen von allen Punkten in Daten-Set A zu dem jeweils nächsten Punkt in Daten-Set B aufsummiert. Dann wird eins der Daten-Sets 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 Daten-Sets die sich nur in einer Transformation und Rotation unterscheiden, funktioniert dieser Algorithmus sehr gut. Bei Daten-Sets 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 Daten-Set sollten 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 Daten-Set übereinander gelegt werden. In Abbildung 2.5 ist das Prinzip visuell dargestellt. Die grünen Linien sind jeweils die kürzeste Distanz von Q nach R.

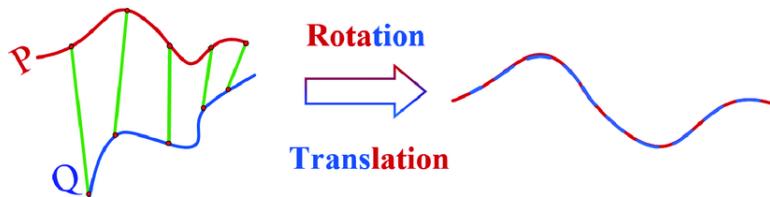


Abbildung 2.5: Prinzip des ICP-Algorithmus

Kapitel 3

Methodik

Wie schon im vorherigen Kapitel beschrieben müssen additiv gefertigte Bauteile nachbearbeitet werden bevor sie eingesetzt werden können. In Abbildung 3.1 ist ein additiv gefertigtes Metallbauteil vor und nach der Nachbearbeitung dargestellt. In der Nachbearbeitung wurden die Stützstrukturen entfernt und die Güte der Oberfläche verbessert. Der Nachbearbeitungsschritt wird nicht nur zur optischen Verbesserung verwendet, sondern auch zur Verbesserung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften. Zum Beispiel kann durch eine Laserbearbeitung der Härtegrad des Bauteils erhöht werden. [MCU⁺22].

Um eine korrekte Nachbearbeitung gewährleisten zu können muss das additiv gefertigte Bauteil fixiert werden, so wird verhindert das sich das Bauteil während der Nachbearbeitung räumlich verschiebt. Durch eine Verschiebung kann das Bauteil oder das, für die Nachbearbeitung verwendete Werkzeug, beschädigt werden. Bei einer händischen Nachbearbeitung kann sogar die Gesundheit der Arbeitskraft in Mitleidenschaft gezogen werden. Eine Option das Bauteil für die Nachbearbeitung zu fixieren, ist ein Schraubstock. Hier wird das Bauteil zwischen zwei Backen eingespannt und so verhindert, dass sich das Bauteil während des Nachbearbeitungsprozesses verschiebt. Durch das Einspannen wirkt eine Kraft auf das Bauteil. Diese Spannkraft kann sich auf die Form des Bauteils auswirken, für die weitere Verwendung des Bauteils ist es nötig, dass das Bauteil genau die geforderte Geometrie, also die des CAD-Designs, hat. Falls dies nicht der Fall ist, kann das Bauteil unter Umständen nicht mehr wie vorgesehen eingesetzt werden.

Für die Beurteilung, ob ein Bauteil noch eingesetzt werden kann, ist es nötig die Deformation die auf das Objekt gewirkt hat zu erkennen. Durch die Analyse der Spannkraft und Deformation eines Bauteils kann anschließend zu der Nachbearbeitung ermittelt werden, ob sich das Bauteil nachhaltig deformiert hat.



Abbildung 3.1: Nachbearbeitung eines AF Metallbauteils [uni23]

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 dient. Zusätzlich werden optische Daten des Bauteils im deformiertem 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 werden.

3.2 Vorgehen

Das Verfahren, um eine Deformation in einem eingespannten additiv gefertigten Bauteil, zu erkennen, soll folgende Schritte umfassen:

- **Aufnahme der Scandaten**

Zu Beginn sollen die Daten, aus denen die Deformation erkannt werden soll, aufgenommen werden. Hierfür soll ein Laserscanner verwendet werden, durch diesen wird das Bauteil im eingespannten Zustand gescannt.

- **Digitalisierung des Bauteils:**

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

- **Stitching Methodik**

Die vorliegenden Bilder sollen nun zu einem einzelnen Bild zusammengefügt werden. Hierfür werden Gemeinsamkeiten in den sich überlappenden Bildern gesucht und eine

Transformation ermittelt, die auf eines von zwei Bildern angewendet werden kann, um sie zusammenzufügen.

- **Deformationserkennung**

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

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 Perspektive 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 eingespannte Bauteil liegen. Die Genauigkeit des Verfahrens profitiert, wenn diese Punkte entfernt werden.

4.1 Pointcloud filtern

[TODO Komplett überarbeiten]

Wie in Abbildung 4.2 zu erkennen ist, streuen nicht alle Punktwolken 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 4.3 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 % ist. Damit werden ausreichend viele Messfehler aus dem Bild genommen, aber trotzdem bleiben Oberflächenstrukturen und Ränder sichtbar, 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 akkurate. 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 4.1 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 Bilderkennungsbibliotheken 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. $\min_{brightness}$ 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.

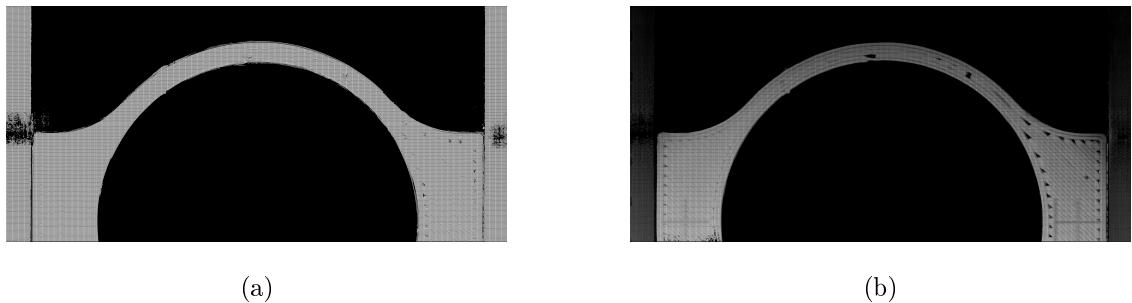


Abbildung 4.1: Resultat der Pointcloud zu Bild Konvertierung. (a) Ohne Filterung der Höhenwerte, (b) Die gleichen Scandaten, aber nur den zehn Prozent häufigsten Höhenwerten.

Wie man in Abbildung 4.1 sehen kann, sind kaum Helligkeitsveränderungen im Bild sichtbar. Das liegt an derselben Problematik, an der der ICP-Algorithmus 2.6 häufig scheitert. Reale Datensets spiegeln die Realität nicht ganzheitlich korrekt wider, sondern beinhalten Messfehler und Streuungen.

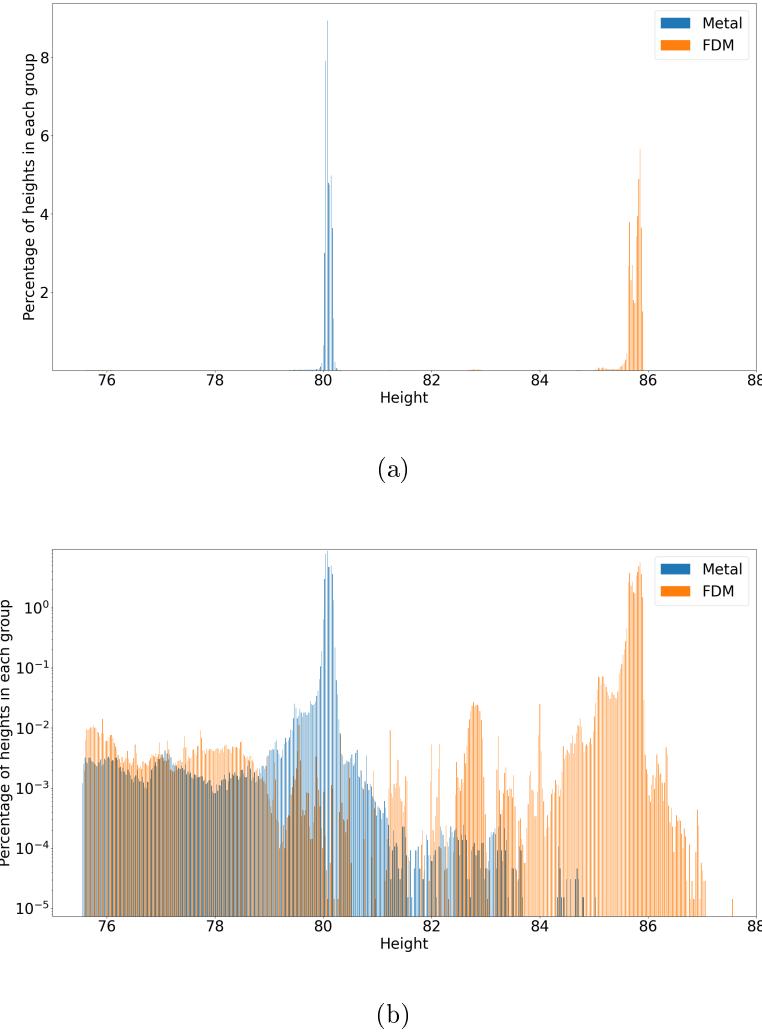


Abbildung 4.2: Auftreten der Höhenwerte in den Scandaten der Demonstratorbauteile. (a): Das Histogramm ist nicht skaliert. (b): Logarithmische Skalierung der Höheninformationen. Hier ist zu sehen das viele kleine Werte vorliegen.

Abbildung 4.2 zeigt die Häufigkeit der gleichen Höhenwerte einer Pointcloud von dem Demonstratorbauteil [TODO Erklärung 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 mm beziehungsweise 85 mm auf, sie gehören zu den Punkten, die auf dem Demonstratorbauteil liegen, es treten allerdings auch Werte



Abbildung 4.3: Metallteil gefiltert

darunter und darüber auf. Die in 4.1 vorgestellte Formel benutzt allerdings die absoluten Minimum und Maximum Werte. Alle Punkte die tatsächlich auf dem Bauteil werden also entsprechend wenig berücksichtigt. Dies kann verhindert 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 4.1

Ränder und Oberflächenstrukturen 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 die Bilder im weiteren Schritt 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 Bild zu erhalten. Als Voraussetzung ist gegeben, dass alle Bilder Überlappungen enthalten.

Diese Überlappung kann benutzt werden, um die Bilder zu einem Bild zusammenzufügen. Für das Stitching von Bilddateien existieren schon mehrere Verfahren, die in Bibliotheken für viele Programmiersprachen implementiert sind. Der schon beschriebene ICP-Algorithmus 2.6 ist eines dieser Verfahren. Das Problem mit diesen Verfahren ist, dass zwei Datensätze registriert werden, indem auf ein Datensatz so lange eine Transformation (vgl. 2.5) 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 kann eine Transformation berechnet werden, die nicht der Realität entspricht, gesucht ist eine Transformation die ausschließlich aus einer Translation in zwei Achsen besteht.

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 Bildausschnitt müssen gemeinsame Bereiche in beiden Bildern erkannt werden. Diese gemeinsamen Bereiche können anschließend miteinander verglichen werden. Bereiche, die verglichen werden können, sind Ränder oder Farbunterschiede im Bild und werden im folgenden als Features bezeichnet.

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 entsprechend 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 5.2 Messfehler des Laserscanners zu sehen. Diese werden auch als Features in Abbildung 5.1 erkannt. Diese müssen entfernt werden, damit die Bilder korrekt zusammengefügt werden können. Erfolgt dies nicht werden diese Fehler miteinander verglichen, was das Ergebnis verfälscht.

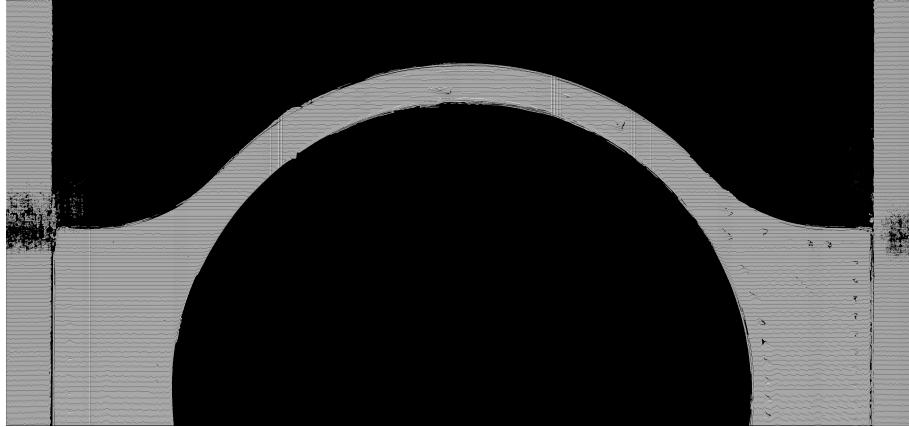


Abbildung 5.1: Oberes Bild eines Scavorgangs, FDM Bauteil

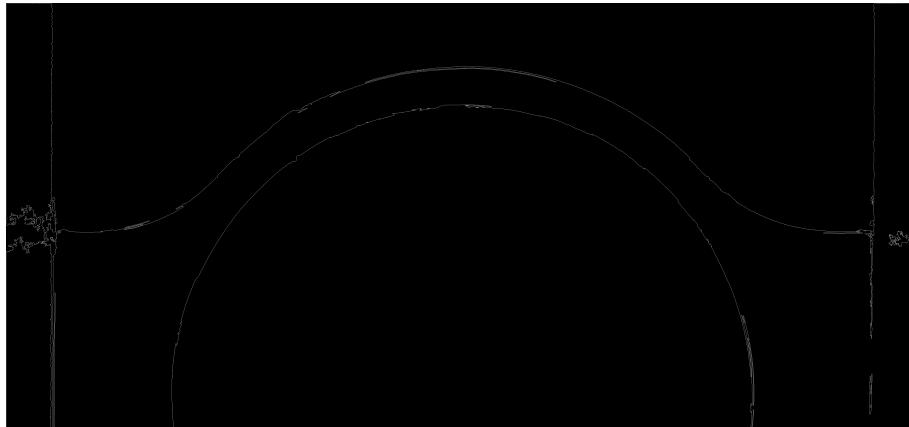


Abbildung 5.2: Extrahierte Konturen des Bildes ohne Pre-Processing [TODO besseres Bild einfügen]

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

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 mi-



Abbildung 5.3: Extracted contours of the image without previous filtering, cut out on the overlapping area [TODO better image to insert]

nimiert. 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 Punktpaar 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 den ‚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.

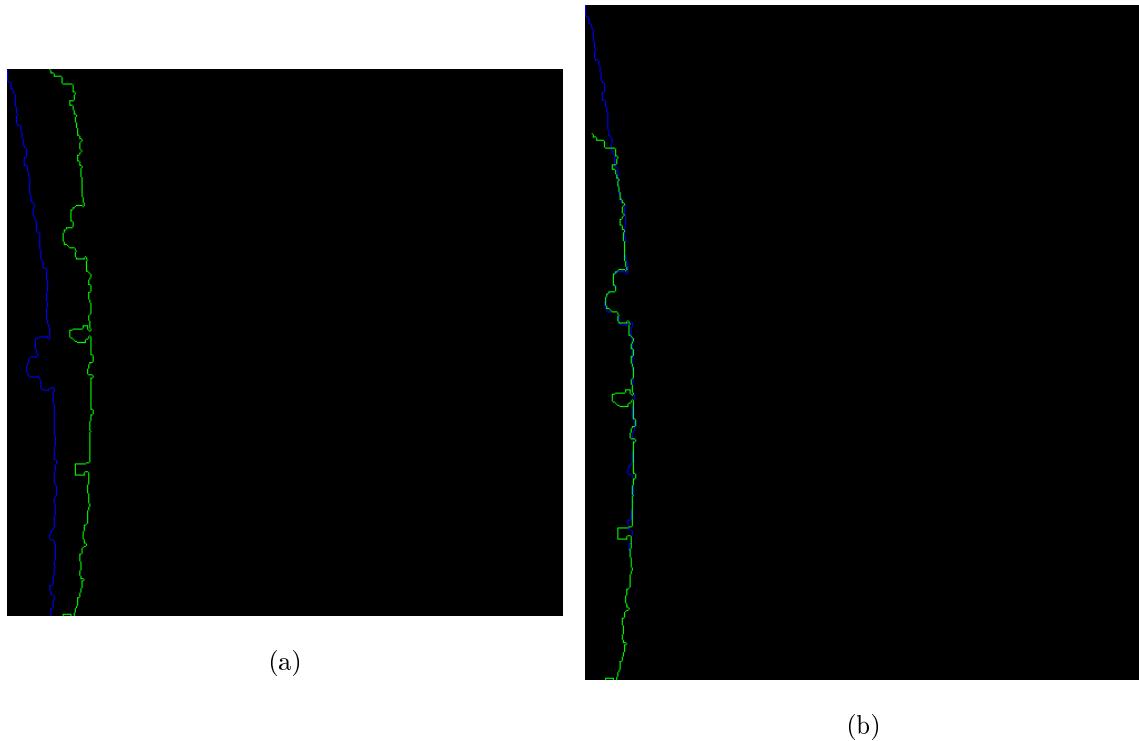


Abbildung 5.4: (a) Konturen K1 und K2 so positioniert wie sie in den Ursprungsbildern gefunden wurde. (b) Konturen, transformiert mit größter Überlappung, Grad der Überlappung: 24,26 %

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.

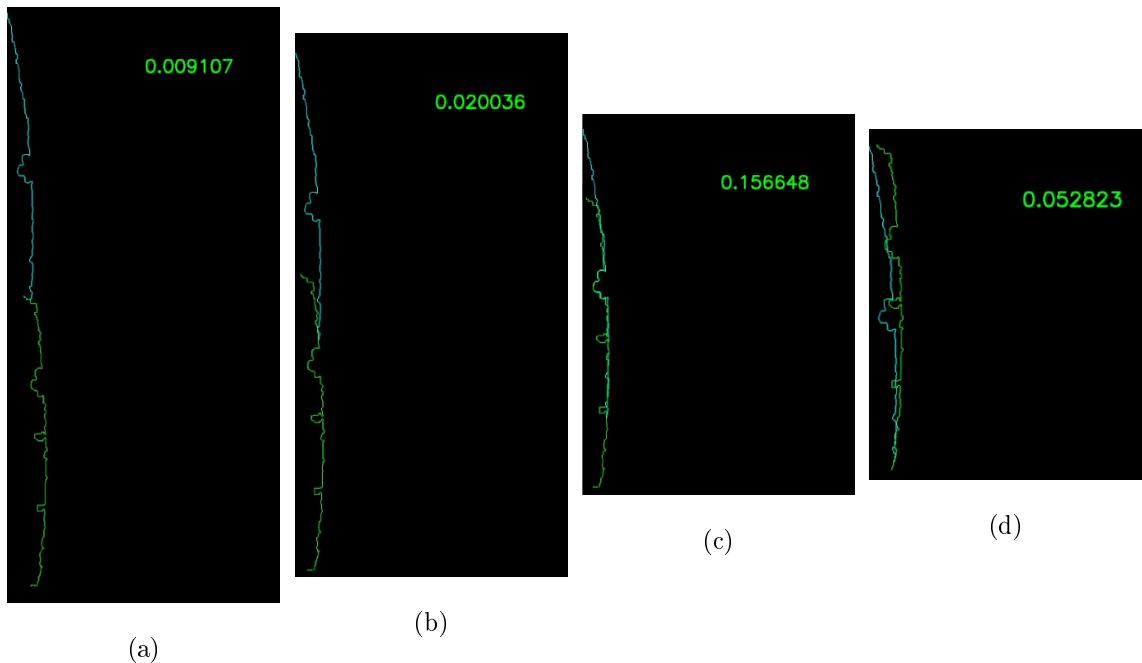


Abbildung 5.5: Verfahren im Verlauf dargestellt, a zu Beginn, b nach n-durchgängen, c bei einem guten Match, d Kontur K2 komplett über K1 geschoben, am Ende der Durchgänge.

5.5 Bilder zusammenfügen

Nachdem 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.

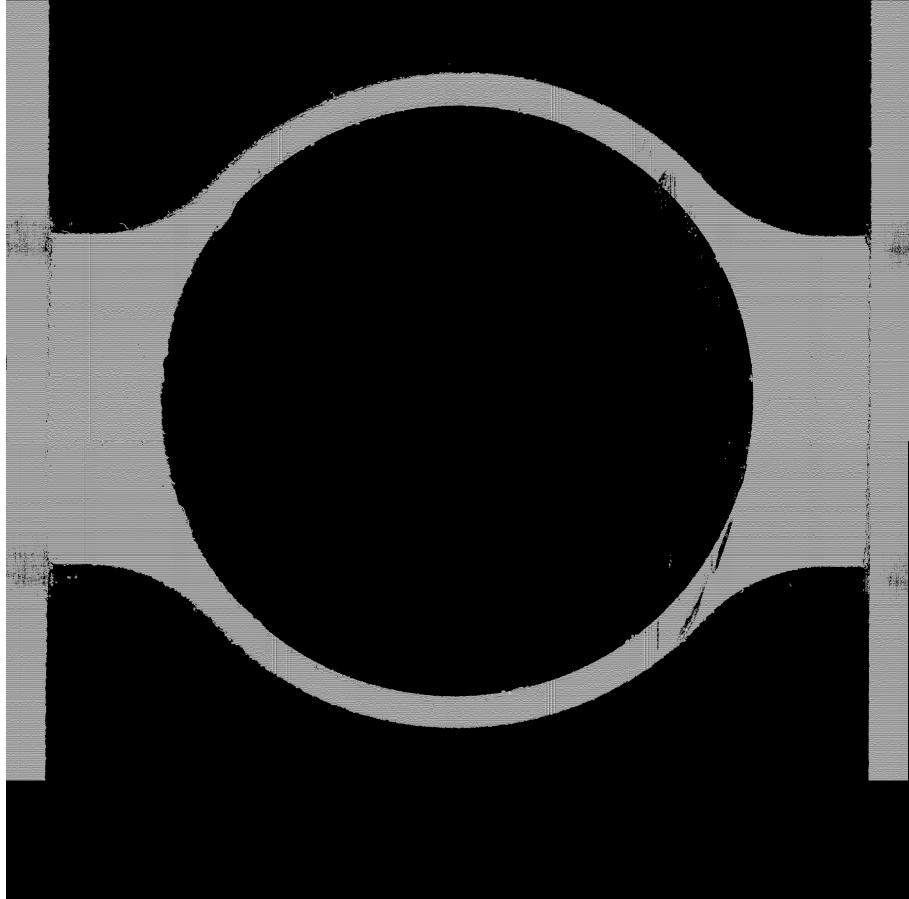


Abbildung 5.6: Zusammengefügtes Bild

5.6 Probleme und Lösungen im Verfahren

Durch die Funktionsweise treten am Randbereich der Scandaten 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 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 mit fünf Pixeln in einer anderen Sequenz mit 500 Pixeln 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 (In Kapitel 5.1 beschrieben) 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.

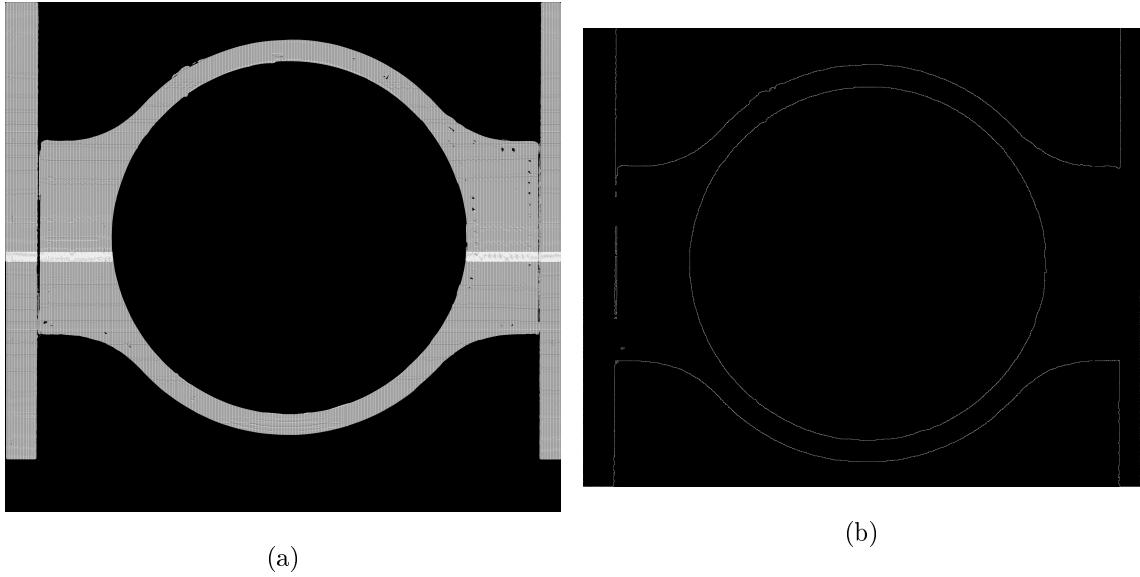


Abbildung 6.1: (a) Zusammengefügtes Bild des FDM Demonstratorbauteils, Spannungsstufe 0
 (b) Randgeometrie von (a), die zur Erkennung der Deformation genutzt wird

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.

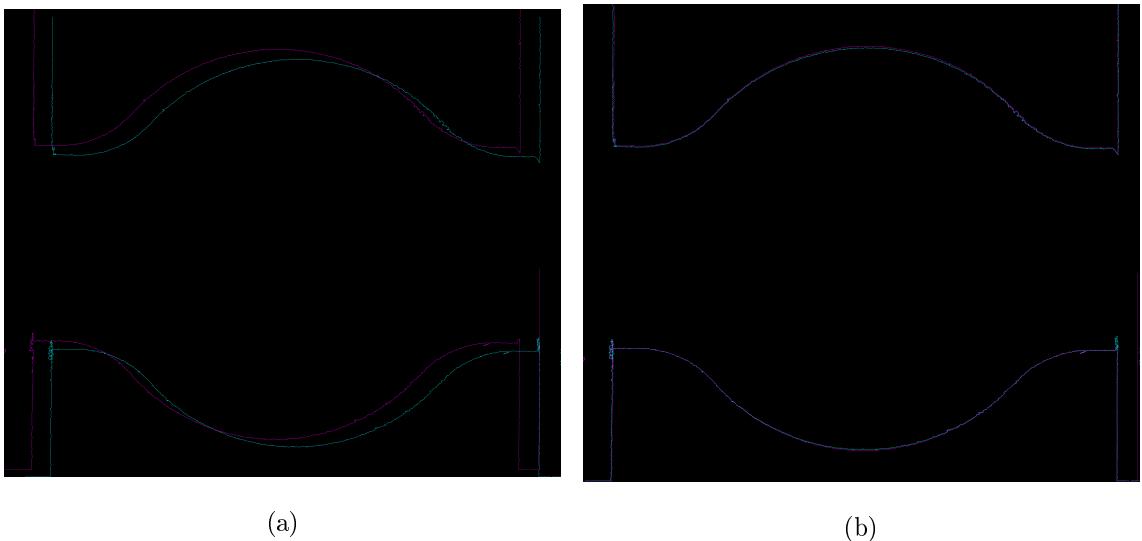


Abbildung 6.2: (a) Kontur des Bauteils AM2 bei Spannungsstufe null, vor dem übereinanderlegen mit der Kontur von Spannungsstufe drei. (b) Die Konturen von AM2 bei Spannungsstufen null und drei. Vollständig Übereinander gelegt.

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 blaue 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.

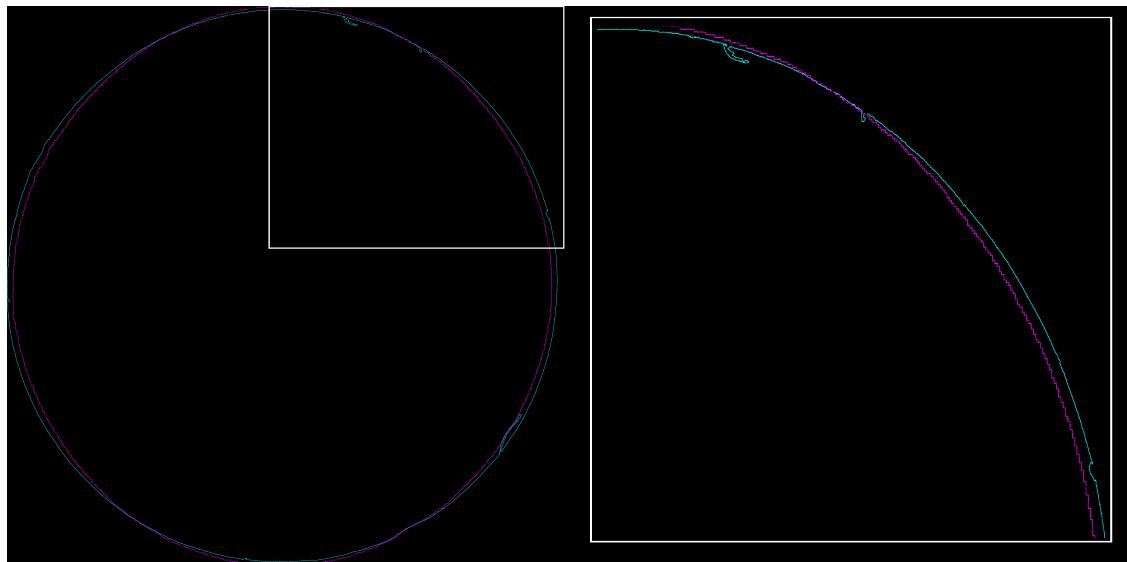


Abbildung 6.3: Deformation der inneren Bauteilgeometrie des Demonstratorbauteils visuell dargestellt

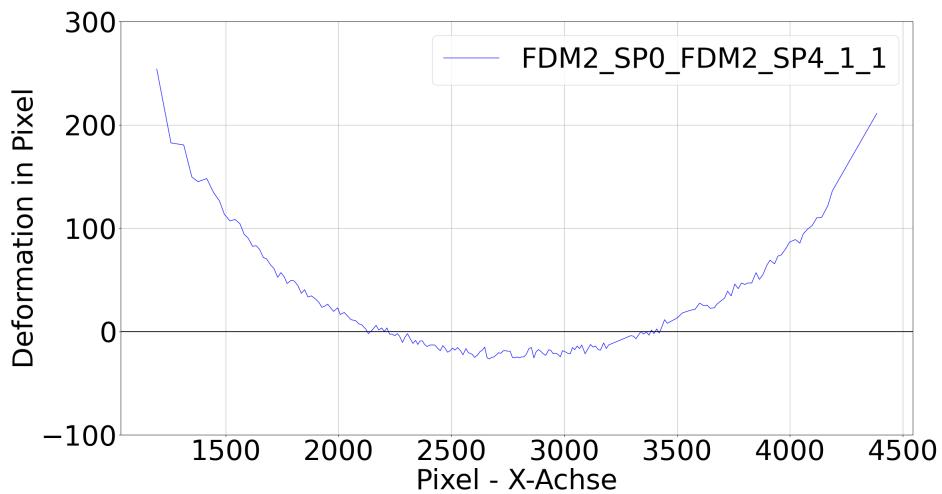


Abbildung 6.4: Deformation der inneren Bauteilgeometrie des Demonstratorbauteils als Graph

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 Abbildung 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.

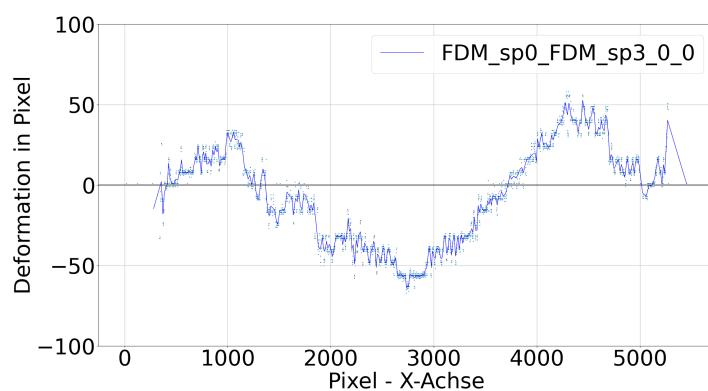


Abbildung 6.5: Differenz von zwei Spannungsstufen bei einem FDM Bauteil, äußere Bauteilgeometrie.

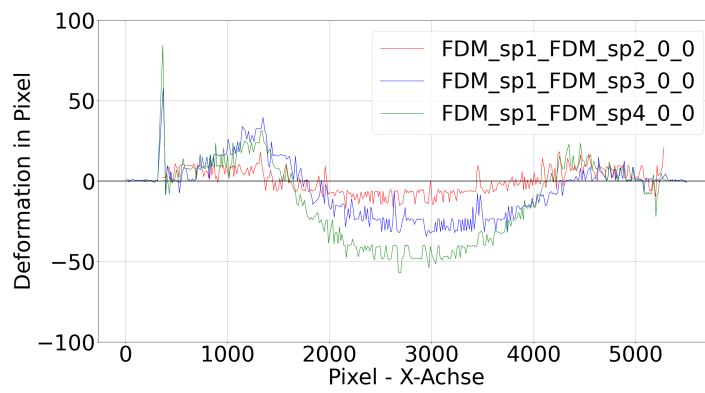


Abbildung 6.6: Differenz von mehreren Spannungsstufen bei einem FDM Bauteil

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.

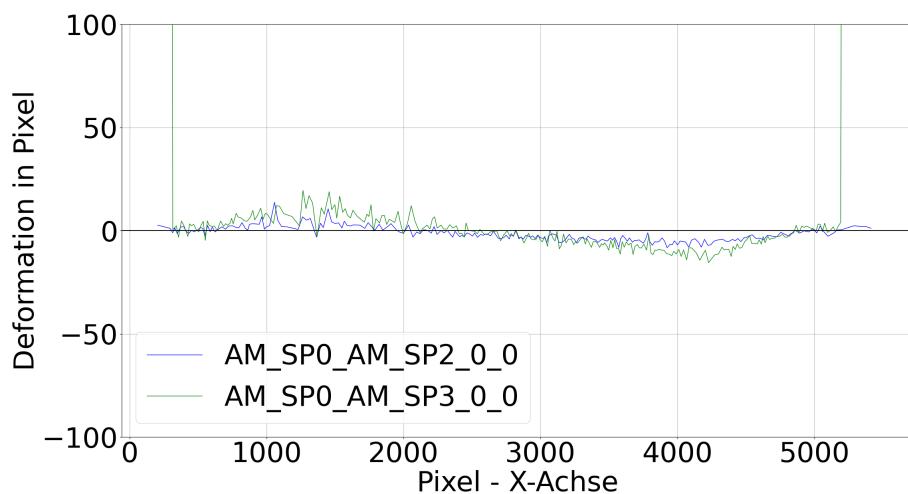


Abbildung 7.1: Differenz von mehreren Spannungsstufen bei einem AM Metall Bauteil

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.

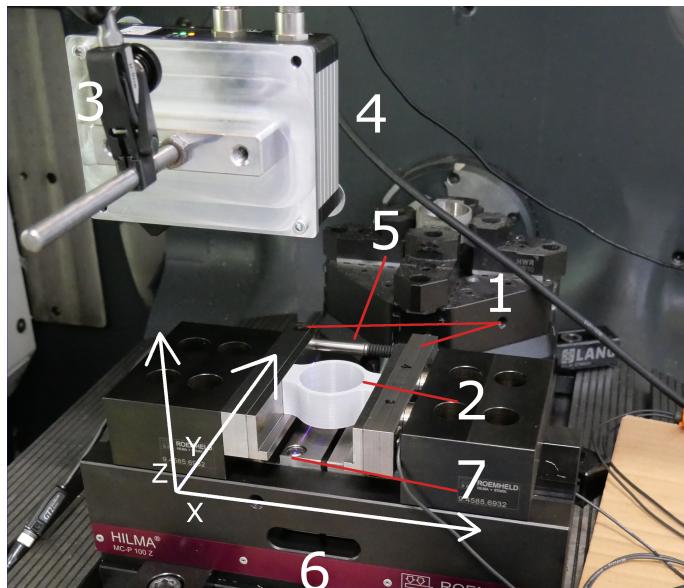


Abbildung 7.2: Versuchsaufbau

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, BaTiO₃) 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.

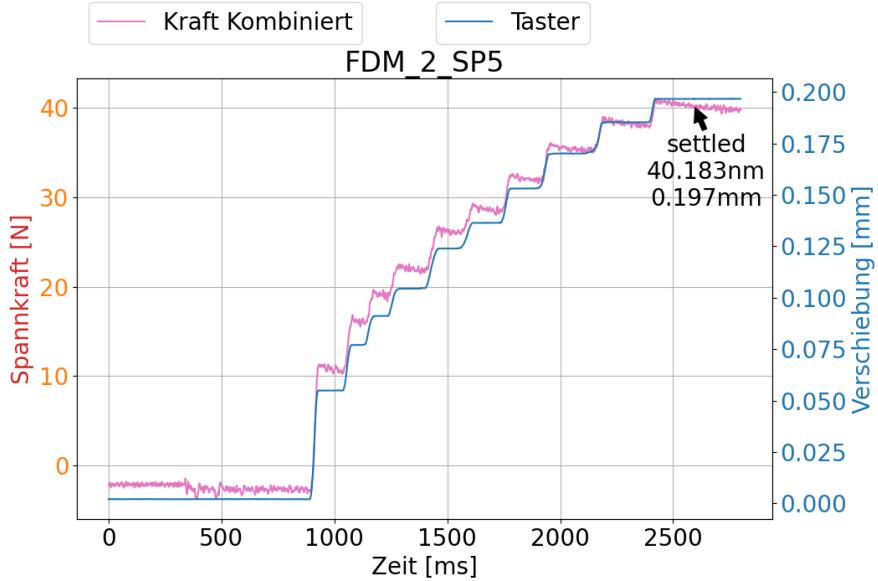


Abbildung 7.3: Kraft- und Verschiebung der Spannungsstufe fünf bei einem FDM Bauteil

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.

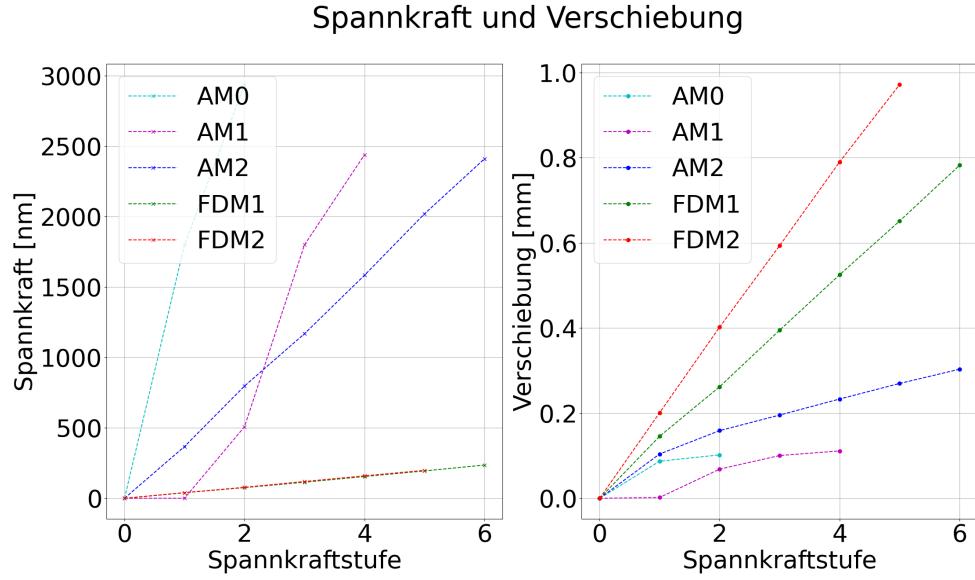


Abbildung 7.4: Akkumulierte Kraft- und Verschiebung jedes Bauteils

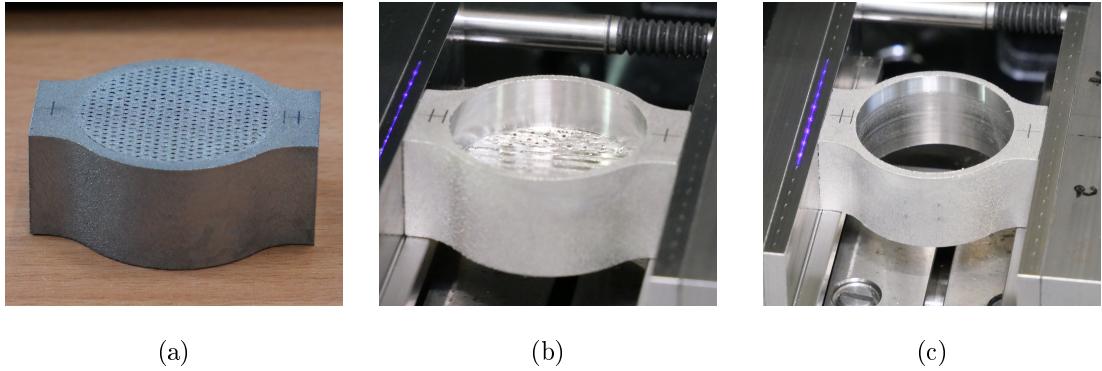


Abbildung 7.5: (a): AF Metallbauteil mit voller Stützstruktur, Bezeichnung: AM0. (b): AF Bauteil mit der halben Stützstruktur ausgebohrt, Bezeichnung: AM1. (c): AF Bauteil ohne Stützstruktur, Bezeichnung: AM2

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.

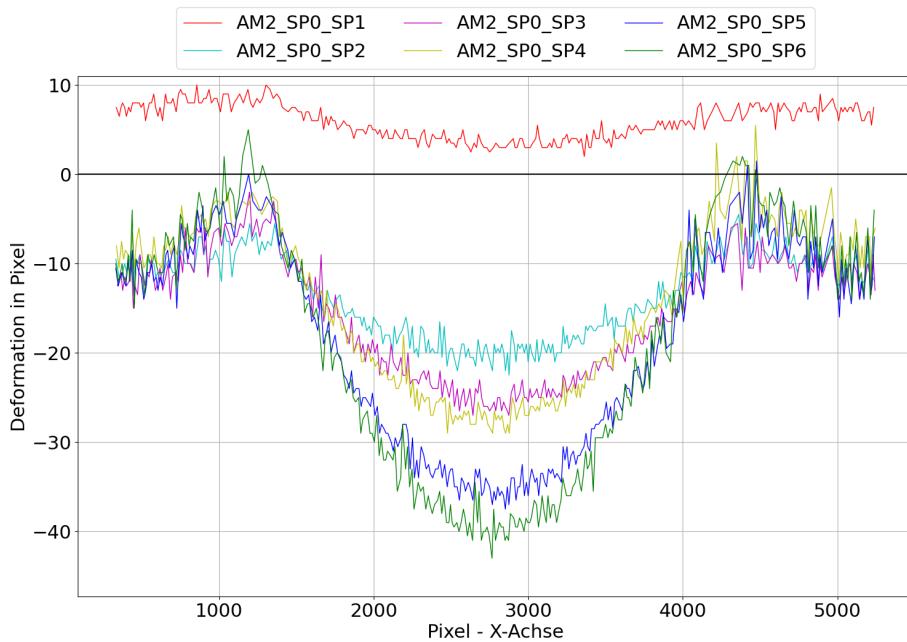


Abbildung 7.6: Sechs Deformationsstufen bei einem AM Bauteil von 0 bis 2500 nm

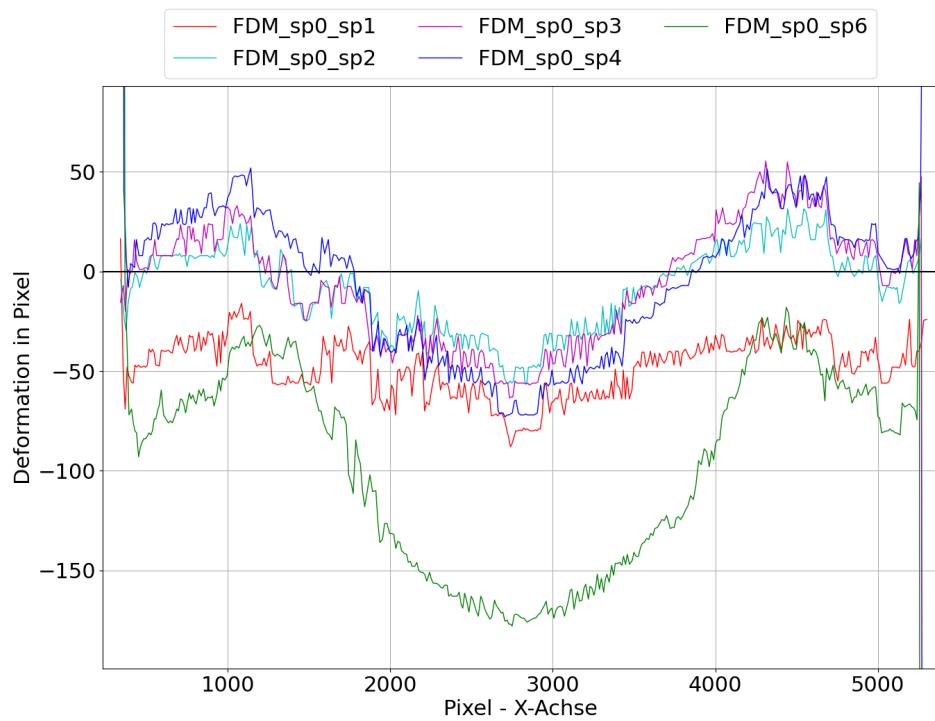


Abbildung 7.7: Fünf Deformationsstufen bei einem FDM Bauteil von 0 bis 250 nm

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"

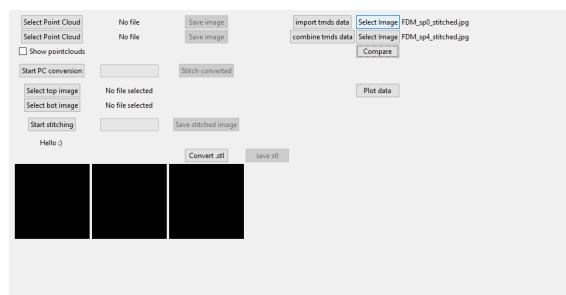


Abbildung 8.1: Anwendungsoberfläche

[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	Überhangtests mit unterschiedlichen Resultaten und Oberflächenqualitäten in sieben verschiedenen Winkeln [MZQ ⁺ 20]	5
2.2	Genauigkeit der Fotogrammetrie bei Bildern die aus 600 m Höhe aufgenommen wurden [EAA23].	7
2.3	Genauigkeit 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
2.4	Funktionsweise eines Laserscanners [todo was ist abgebildet]	9
2.5	Prinzip des ICP-Algorithmus	10
3.1	Nachbearbeitung eines AF Metallbauteils [uni23]	12
4.1	Resultat der Pointcloud zu Bild Konvertierung. (a) Ohne Filterung der Höhenwerte, (b) Die gleichen Scandaten, aber nur den zehn Prozent häufigsten Höhenwerten.	17
4.2	Auftreten der Höhenwerte in den Scandaten der Demonstratorbauteile. (a): Das Histogramm ist nicht skaliert. (b): Logarithmische Skalierung der Höheninformationen. Hier ist zu sehen das viele kleine Werte vorliegen.	18
4.3	Metallteil gefiltert	19
5.1	Oberes Bild eines Scanvorgangs, FDM Bauteil	22
5.2	Extrahierte Konturen des Bildes ohne Pre-Processing [TODO besseres Bild einfügen]	22
5.3	Extrahierte Konturen des Bildes ohne vorheriges filtern, zugeschnitten auf den überlappenden Bereich [TODO besseres Bild einfügen]	23
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 %	24
5.5	Verfahren im Verlauf dargestellt, a zu Beginn, b nach n-durchgängen, c	25
5.6	Zusammengefügtes Bild	26

6.1	(a) Zusammengesetztes Bild des FDM Demonstratorbauteils, Spannungsstufe 0 (b) Randgeometrie von (a), die zur Erkennung der Deformation genutzt wird	30
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.	31
6.3	Deformation der inneren Bauteilgeometrie des Demonstratorbauteils visuell dargestellt	32
6.4	Deformation der inneren Bauteilgeometrie des Demonstratorbauteils als Graph	33
6.5	Differenz von zwei Spannungsstufen bei einem FDM Bauteil, äußere Bauteilgeometrie.	33
6.6	Differenz von mehreren Spannungsstufen bei einem FDM Bauteil	34
7.1	Differenz von mehreren Spannungsstufen bei einem AM Metall Bauteil	35
7.2	Versuchsaufbau	36
7.3	Kraft- und Verschiebung der Spannungsstufe fünf bei einem FDM Bauteil	38
7.4	Akkumulierte Kraft- und Verschiebung jedes Bauteils	39
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	39
7.6	Sechs Deformationsstufen bei einem AM Bauteil von 0 bis 2500 nm	40
7.7	Fünf Deformationsstufen bei einem FDM Bauteil von 0 bis 250 nm	41
8.1	Anwendungsoberfläche	43

Literaturverzeichnis

- [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.
- [BAB20] Vincent Benoit, Lionel Arnaud, and Maher Baili. A new method of design for additive manufacturing including machining constraints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111:1–12, 11 2020.
- [BGH⁺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.
- [CM23] Flaviana Calignano and Vincenza Mercurio. An overview of the impact of additive manufacturing on supply chain, reshoring, and sustainability. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 7:100103, 2023.
- [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.
- [Gar23] Leroy Gardner. Metal additive manufacturing in structural engineering – review, advances, opportunities and outlook. *Structures*, 47:2178–2193, 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.
- [MCU⁺22] Muhammad Arif Mahmood, Diana Chioibasu, Asif Ur Rehman, Sabin Mihai, and Andrei C. Popescu. Post-processing techniques to enhance the quality of metallic parts produced by additive manufacturing. *Metals*, 12(1):77, 2022.
- [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.
- [MZQ⁺20] Liang Meng, Weihong Zhang, Dongliang Quan, Guanghui Shi, Lei Tang, Yuliang Hou, Piotr Breitkopf, Jihong Zhu, and Tong Gao. From topology optimization design to additive manufacturing: Today's success and tomorrow's roadmap. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(3):805–830, 2020.
- [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⁺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.
- [uni23] unionfab. From rough to refined: Post-processing methods to elevate metal parts. *Unionfab*, 22.08.2023.
- [VBĆ⁺17] Aleksandar Vranić, Nebojsa Bogojević, Snežana Ćirić Kostić, D. Croccolo, and G. Olmi. Advantages and drawbacks of additive manufacturing. *0354-6829*, 2017.
- [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.
- [XY09] Xiaolei Du and Yong Zhuo. A point cloud data reduction method based on curvature. pages 914–918, 2009.
- [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.