

Bachelorarbeit

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

Niklas Thieme

4. 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
1.1 Einleitung und Motivation	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Additive Fertigung	3
2.2 Limitierungen von AF	4
2.3 Reverse Engineering	4
2.4 3D Rekonstruktion	5
2.4.1 Digitales Abbild	6
2.4.2 Scanner und Datenerfassung	7
2.5 ICP-Algorithmus	8
3 Ziel der Arbeit	11
3.1 Einspannproblematik	11
3.2 Erfassung der spannkraftinduzierten Deformation	11
3.3 Verfahren zur optische Spannkraftdeformationserkennung	11
3.4 Vorgehen	12
4 Datenaufbereitung	13
4.1 Pointcloud filtern	13
4.2 Pointcloud in Bild konvertieren	14
5 Stitching	19
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
6 Analyse der spannkraftinduzierten Deformation	27

7 Algorithmus und Software	29
8 Validierung	31
8.0.1 Versuchsaufbau	31
8.1 Zusätzliche Messinstrumente	32
9 Zusammenfassung und Ausblick	35
Abbildungsverzeichnis	37
Algorithmenverzeichnis	39
Literaturverzeichnis	42
Erklärung	42

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Einleitung und Motivation

Kapitel 2

Stand der Technik

2.1 Additive Fertigung

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

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

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

Aufgrund dieser Vorteile wird AF in vielen Industriebereichen genutzt. Die folgende Sektion zeigt einige Fälle in der Automobilindustrie, in denen AF erfolgreich benutzt wird. Die Automobilbranche ist ein Bereich in der AF schon viel und erfolgreich eingesetzt wird: Durch AF können Teile gefertigt werden die leichter, belastbarer und sicherer sind. Die einfache Anpassbarkeit sorgt für geringen Entwicklungszeiten und Kosten. BWM zum Beispiel benutzt für den i8 Roadster viele AF gefertigte Teile. Darunter sind zum Beispiel die Be-

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

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

2.2 Limitierungen von AF

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

2.3 Reverse Engineering

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

Dieses Abbild wird dann benutzt, um die bestehende Struktur zu erweitern und auf ihr aufzubauen. Das wird am Beispiel eines Flugzeugs demonstriert, erst wird der Innenraum gescannt und mit dem originalen Plänen abgeglichen, dann ein 3D Objekt erstellt. Mithilfe dieses 3D-Objekts können dann passgenaue Bauteile hergestellt werden, die es ermöglichen ein ehemaliges Passierflugzeug in eine Frachtmashine umzubauen. Wie schon erwähnt wird zur erfolgreichen Weiterbearbeitung ein möglichst genaues digitales Abbild benötigt. Ist dies nicht der Fall müssen nicht passende Teile erneut hergestellt werden, was die Material- und Personalkosten deutlich erhöht. Es ist also im wirtschaftlichen Interesse beim ersten Schritt, dem Erstellen der digitalen Version, ein möglichst genaues Ergebnis zu erzielen.

2.4 3D Rekonstruktion

Digitale Abbildungen von Flächen, Objekten oder sogar Körperteilen wurden in den letzten Jahren mehr und mehr benutzt. Anwendungen sind zum Beispiel in der 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 laborbasierte 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] Beide Verfahren können auch kombiniert werden. Bei bildbasierten Verfahren, auch Photogrammetrie 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 x zeigt dies anschaulich. Vorteil bei der Photogrammetrie 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 Photogrammetrie zu entscheiden, liegen in der begrenzten Auflösung sowie im signifikant ansteigenden Arbeitsaufwand bei steigenden

Anforderungen an die Genauigkeit des Endergebnisses. Photogrammetrie zeigt jedoch ihre Stärken bei großflächigen 3D-Rekonstruktionen, wie sie beispielsweise bei der Erfassung von Gebäuden, Stadtteilen oder geografischen Strukturen erforderlich sind.

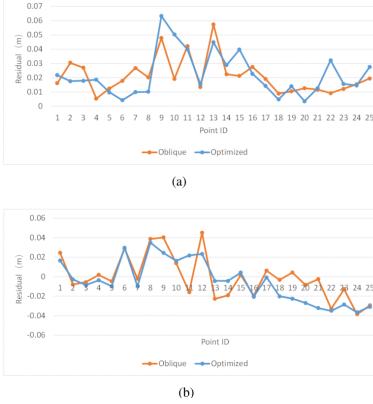


Abbildung 2.1: Accuracy Photogrammetry

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 Bittiefe gewählt.

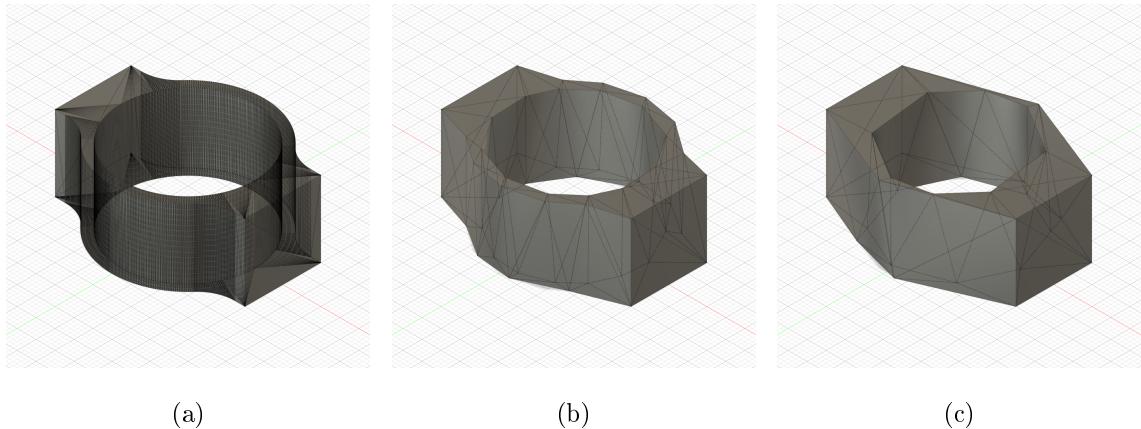


Abbildung 2.2: Akkuranz einer 3D-Datei ist abhängig von der Anzahl der gespeicherten Eckpunkte am Beispiel des Demonstratorbauteils. (a) 1512 Punkte (b) 52 Punkte (c) 30 Punkte

2.4.2 Scanner und Datenerfassung

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 messbare Bereich ist rot markiert. [MES20] Bauteile die breiter sind als die maximale Breite der Scanebene, in Abbildung 2.3 mittig 25mm, 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 Er-

gebnis 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.

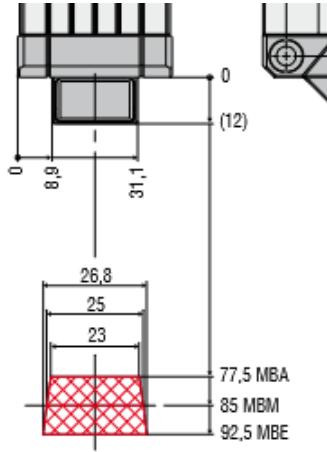


Abbildung 2.3: Funktionsweise eines Laserscanners

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] 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.

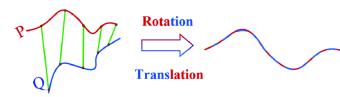


Abbildung 2.4: Prinzip des ICP-Algorithmus

Kapitel 3

Ziel der Arbeit

Wie schon beschrieben müssen additiv gefertigte Bauteile nachbearbeitet werden bevor sie eingesetzt werden können. Um eine korrekte Nachbearbeitung gewährleisten zu können muss das additiv gefertigte Bauteil fixiert werden. Dies kann vorgenommen werden, indem das Bauteil in einen Schraubstock eingespannt wird.

3.1 Einspannproblematik

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

3.2 Erfassung der spannkraftinduzierten Deformation

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

3.3 Verfahren zur optische Spannkraftdeformationserkennung

Um die Deformation des Bauteils erfassen zu können wird das 3D-Objekt benötigt, dass als Grundlage für die AF diente. Zusätzlich werden optische Daten des Bauteils im deformierten Zustand benötigt. Mit diesen beiden Daten kann der Unterschied ermittelt und ausgegeben werden. Um auch minimale Deformationen erkennen zu können müssen die Daten des eingespannten Bauteils hinreichend genau sein. Deswegen wird ein Laserscanner zur Datenerfassung eingesetzt. Wie schon beschrieben ist der Messbereich eines Laserscan-

ners begrenzt. Da das Verfahren nicht auf eine Bauteilgröße beschränkt sein soll, müssen mehrere Scans als Eingabe akzeptiert und damit umgegangen werden.

3.4 Vorgehen

Das Verfahren, um eine Deformation in einem eingespannten additiv gefertigten Bauteil, zu erkennen umfasst folgenden Schritte:

- **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 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. Nur so kann es mit einem anderen Modell verglichen werden. Das Verfahren soll die Deformation nur in einer zweidimensionalen Ansicht erkennen. Das ist weniger komplex, hat aber zur Folge, dass Bauteile mit unterschiedlichen Oberflächenhöhen nicht korrekt analysiert werden können. 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 Akkuranz des Verfahrens profitiert, wenn diese Punkte entfernt werden.

4.1 Pointcloud filtern

Wie in Abbildung 4.1 zu erkennen ist, streuen nicht alle Punktewolken 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:

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

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-

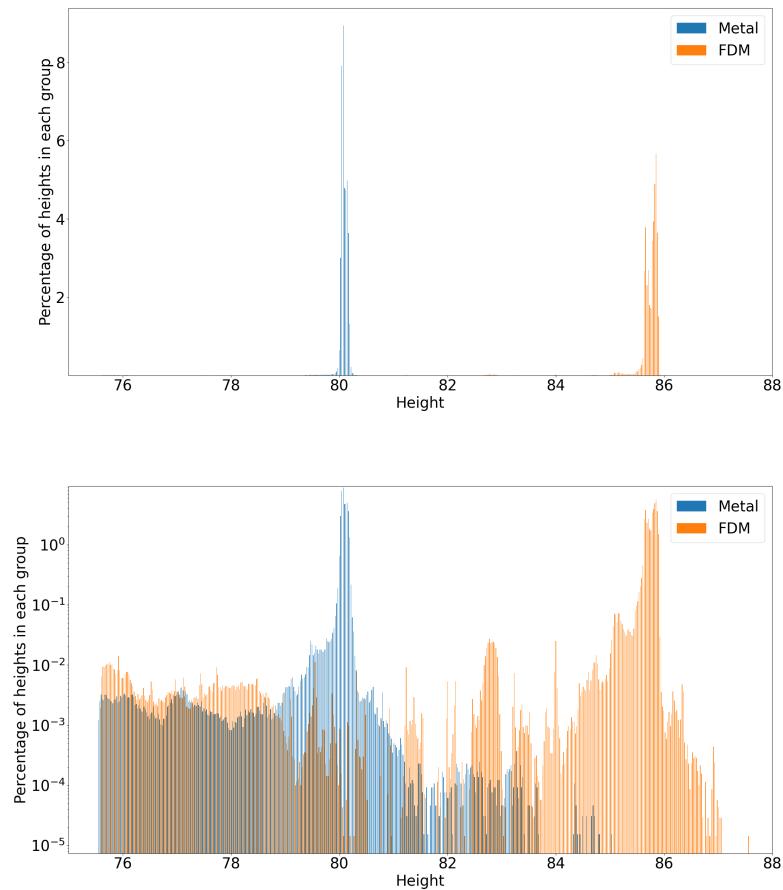


Abbildung 4.1: Auftreten Höhe



Abbildung 4.2: Metallteil gefiltert

Koordinate, diese werden gebraucht um die Helligkeit relativ zu der Höhe zu berechnen. \min_b und \max_b sind die gewünschten Grenzen der Helligkeit. In unserem Fall sind $\min_b = 0$ und $\max_b = 255$ da ein 8 Bit Bild verwendet wird.

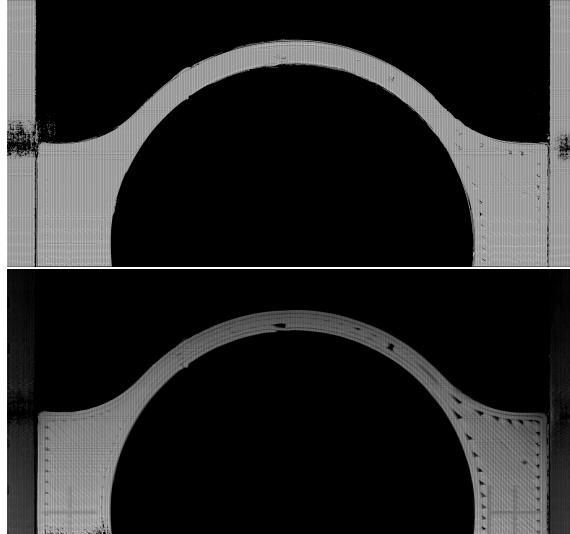


Abbildung 4.3: Konvertierung Pointcloud zu Bild, Oberhalb ohne Filter, unterhalb mit den zehn Prozent häufigsten Höhenwerten

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 ?? 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.

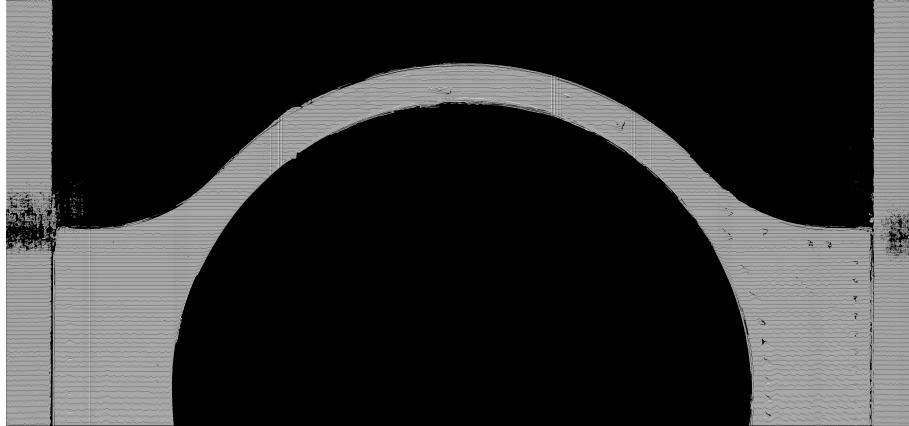


Abbildung 5.1: Oberes Bild eines Scavorgangs, FDM Bauteil

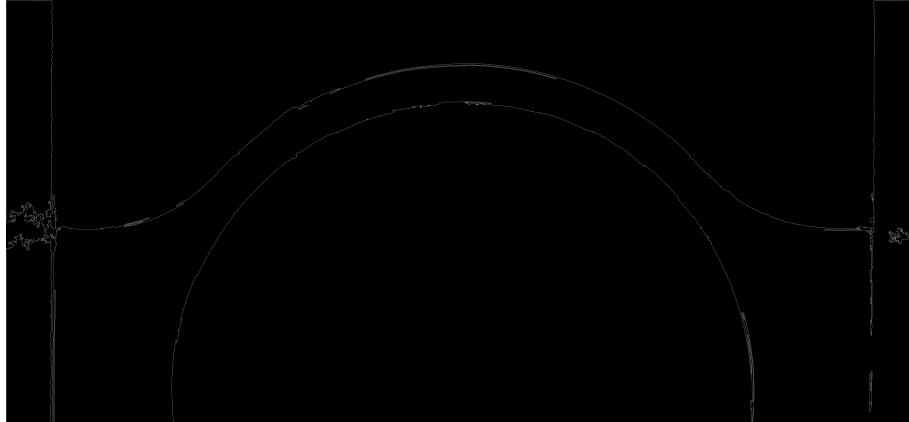


Abbildung 5.2: Extrahierte Konturen des Bildes ohne Pre-Processing

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.

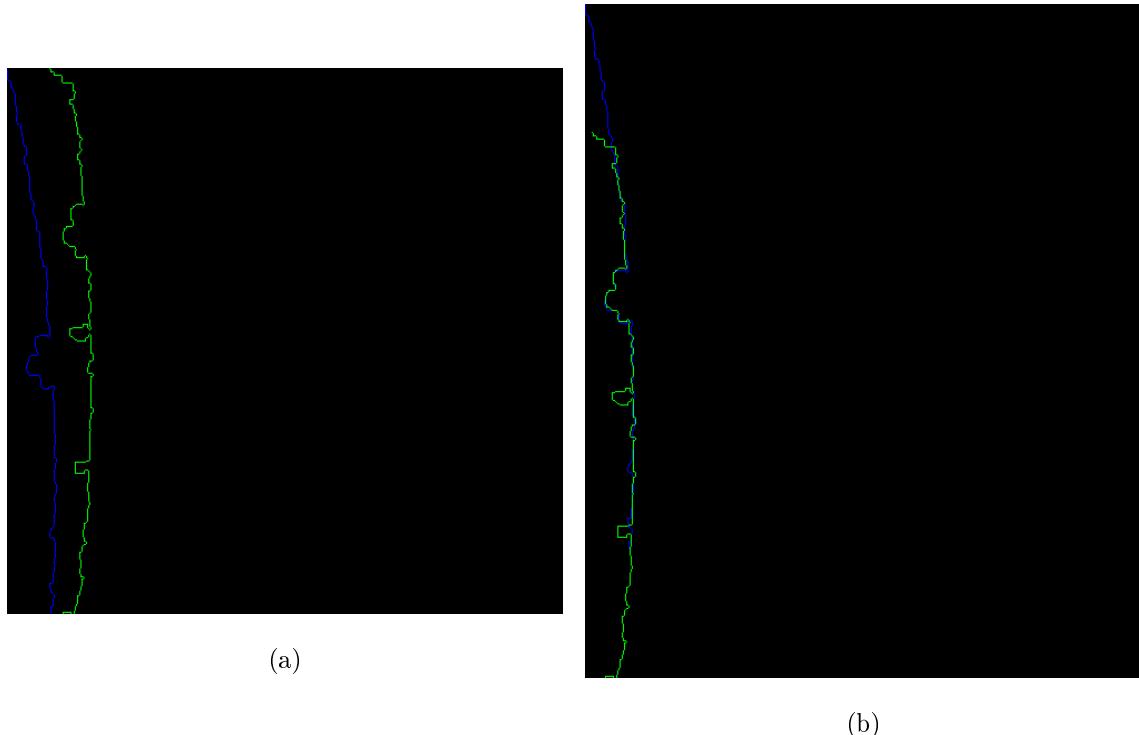


Abbildung 5.4: (a) Konturen K1 und K2 so positioniert wie sie in den Ursprungsbildern gefunden wurde. (b) Konturen, transformiert mit größter Überlappung, Grad der Überlappung: 24,26%

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.

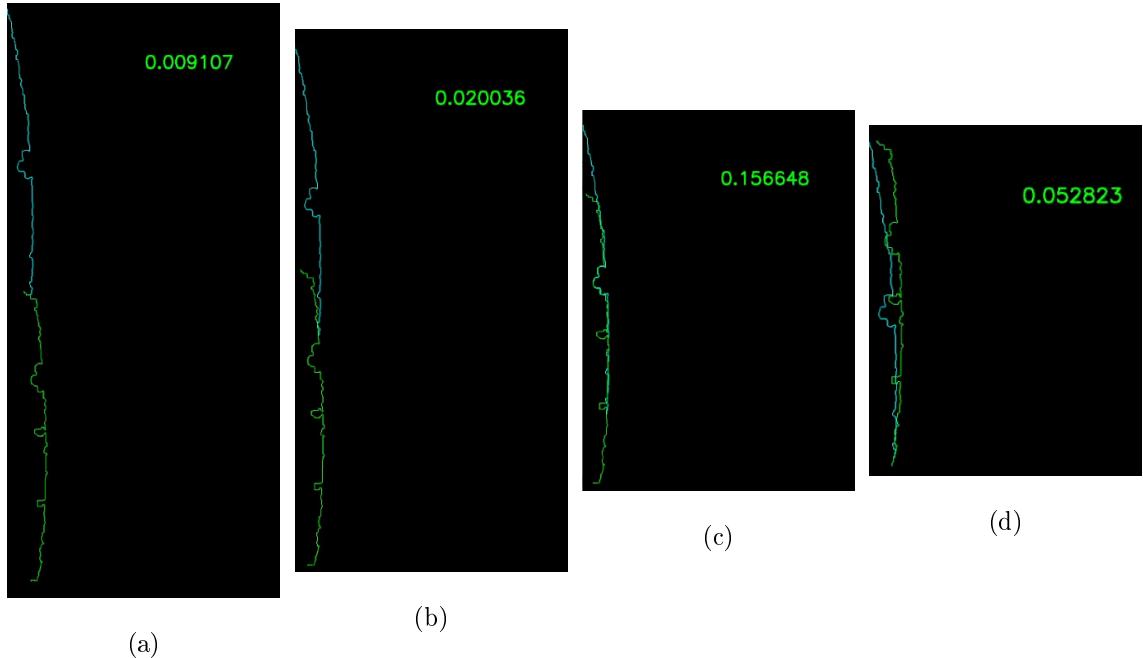


Abbildung 5.5: Verfahren im Verlauf dargestellt, a am Anfang, b nach n-durchgängen, c bei einem guten Match, d Kontur K2 komplett über K1 geschoben.

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

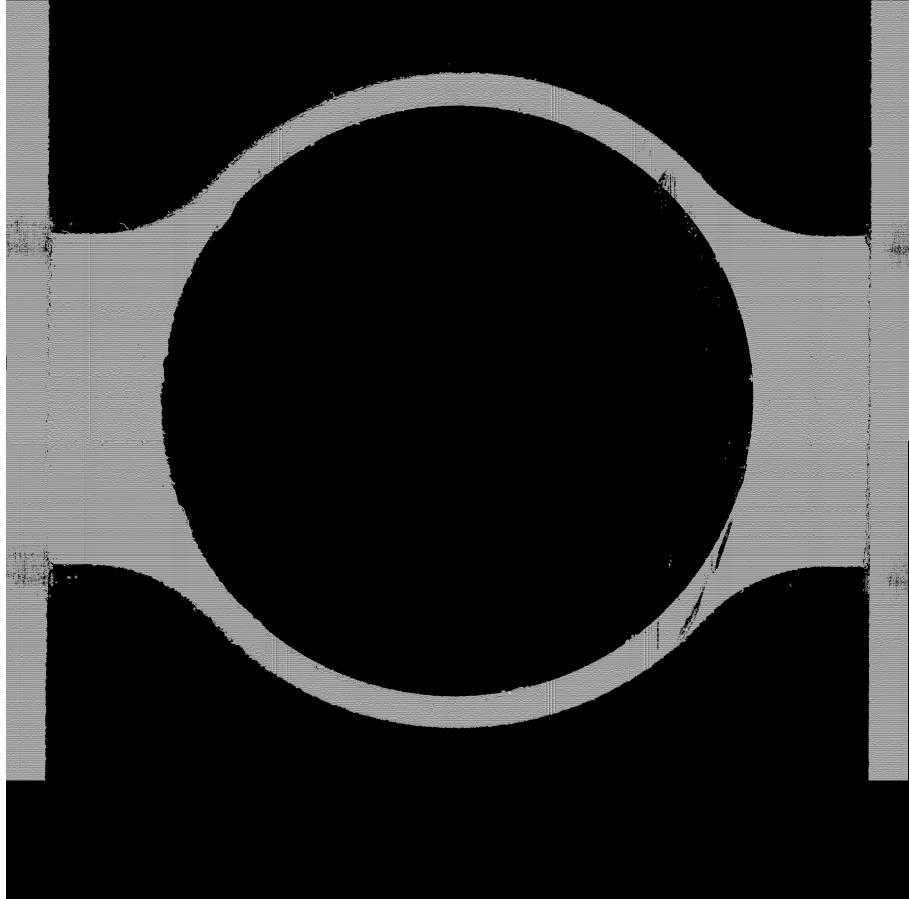


Abbildung 5.6: Zusammengefügtes Bild

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

Analyse der spannkraftinduzierten Deformation

Im folgenden Kapitel wird die Methode zur Erkennung und Analyse von durch Spannkraft induzierter Deformationen beschrieben. Ziel ist es, aus zwei zusammengefügten Bildern von zwei verschiedenen Spannungsstufen, eine Deformation zu erkennen und auszugeben. Als Deformation wird eine äußerliche Veränderung des betrachteten Bauteils bezeichnet, die äußere Veränderung ist hierbei über den Unterschied der Ränder der Bauteile definiert. Bevor also eine Deformation erkannt werden kann, muss die Randgeometrie von beiden abgebildeten Bauteils erfasst werden. Vorerst werden in einem Schritt immer nur zwei Spannungsstufen miteinander verglichen und die Deformationsdaten anschließend abgespeichert. Die Auswertung der resultierenden Daten erfolgt in einem separaten Schritt, so können auch mehrere Spannungsstufen untereinander verglichen werden, ohne die Deformationserkennung komplexer zu machen.

6.1 Deformation zwischen zwei Spannungszuständen

Wie schon erwähnt ist die Deformation zwischen zwei Bauteilen als Differenz der Randgeometrie deformiert. Um die Randgeometrie eines Bauteils zu ermitteln, kann wieder die Kontursuche angewendet werden. Die gefundenen Konturen bilden dann das Bauteil ab. So werden äußere aber auch innere Geometrie abgebildet und zum Vergleich vorbereitet.

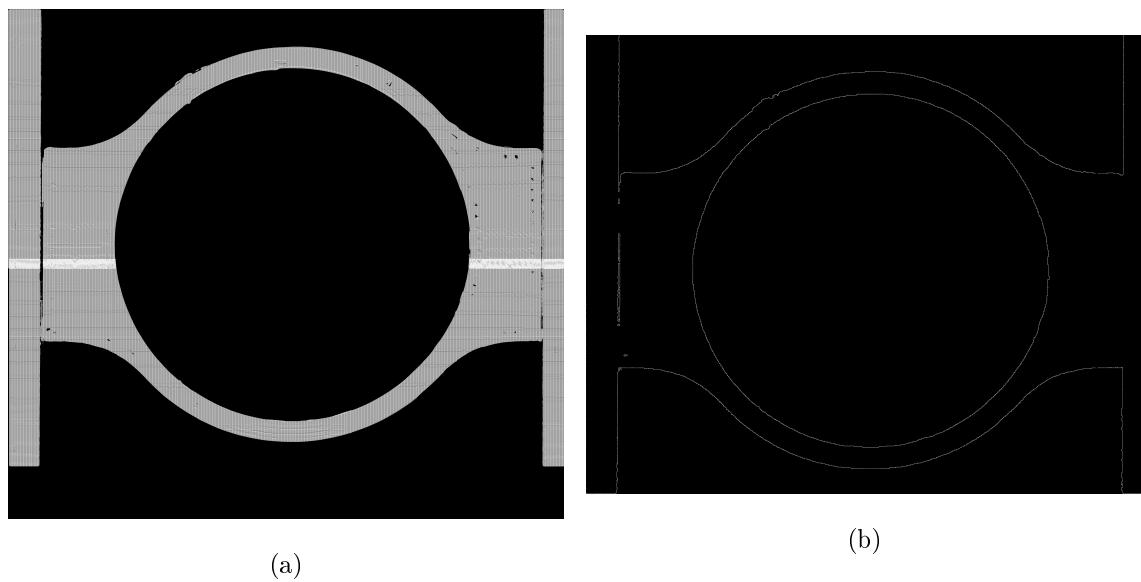


Abbildung 6.1: (a) Zusammengefügtes Bild des FDM Demonstratorbauteils, Spannungsstufe 0
(b) Randgeometrie des Bildes in a

Kapitel 7

Algorithmus und Software

Kapitel 8

Validierung

8.0.1 Versuchsaufbau

In Abbildung 8.1 ist der Versuchsaufbau zur Datenerfassung zu sehen. Alle wichtigen Bestandteile sind nummeriert. Es folgt eine kurze Benennung aller vorhandenen und notwendigen Teile:

- 1: Schraubstock Backen
- 2: Demonstratorbauteil
- 3: Scannerhalterung
- 4: Scanner LLT 30x0-25
- 5: Verschiebungsmesser
- 6: Laserlinie (Lila)
- 7: Schraubstock mit Kraftmesser

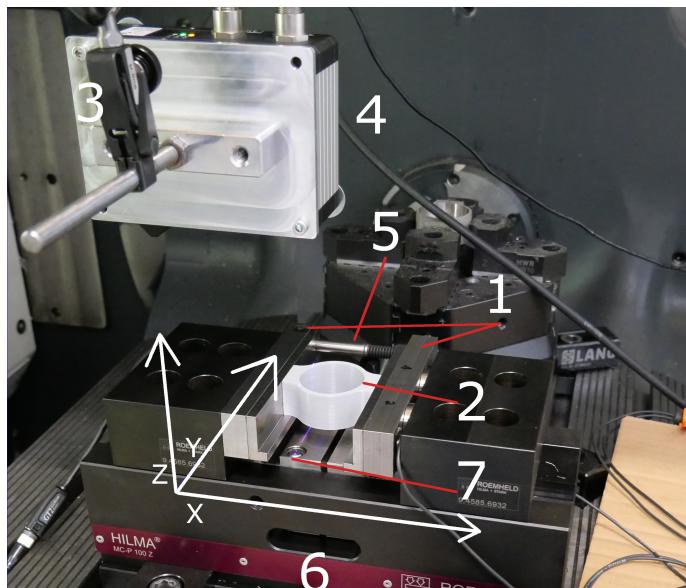


Abbildung 8.1: Versuchsaufbau

X: x-Achse

Y: y-Achse

Z: z-Achse

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

8.1 Zusätzliche Messinstrumente

Zusätzlich zu dem Scanner werden noch mit weiteren Messinstrumenten Daten erfasst. In Abbildung 8.1 unter der Nummer 5 ist ein mechanischer Verschiebungsmesser zu sehen. Dieser misst die Verschiebung der Backen des Schraubstocks. Der Schraubstock misst zusätzlich mit viel Kraft die Backen aufeinander pressen.

Hierzu wird die piezoelektrische Kraftmesstechnik verwendet. Bei Krafteinwirkung auf Piezokristalle (z. B. Quarz, Bariumtitanat, 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] Dieser ist in Spannungsverstärker ist in Abbildung 8.2 unten zu sehen.

Damit die Scanner Ergebnisse überprüft werden können, wird die Bauteilgeometrie zusätzlich nach dem Scavorgang noch mit einem Taster abgetastet. Hierfür wird der Werkzeugkopf gewechselt und der Scanner entfernt. Dann wird der Taster in die CNC-Maschine eingesetzt und das Bauteil abgetastet. In Abbildung 8.2 ist das Tasterwerkzeug zu sehen.



Abbildung 8.2: Taster

Die rote Kugel am Ende des Tasters erkennt, sobald eine Berührung zu dem Bauteil erfolgt ist und benachrichtigt den Steuerungsrechner. Dieser speichert die aktuelle Position dann in einer Protokolldatei.

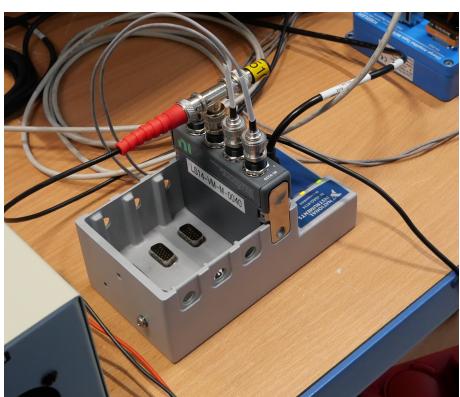


Abbildung 8.3: Spannungswandler

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

Abbildungsverzeichnis

2.1	Accuracy Photogrammetry	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	7
2.3	Funktionsweise eines Laserscanners	8
2.4	Prinzip des ICP-Algorithmus	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 Scavorgangs, 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
8.1	Versuchsaufbau	31
8.2	Taster	32
8.3	Spannungswandler	33

Algorithmenverzeichnis

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.
- [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. *IEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2):239–256, 1992.
- [BTP13] Sofien Bouaziz, Andrea Tagliasacchi, and Mark Pauly. Sparse iterative closest point. *Computer Graphics Forum*, 32(5):113–123, 2013.
- [CD20] Horst Czichos and Werner Daum. Messgrößen und messverfahren. In Beate Bender, Dietmar Göhlich, and Heinrich Dubbel, editors, *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*, pages 693–732. Springer Vieweg, Berlin, 2020.
- [DPRV] Ivan Dokmanic, Reza Parhizkar, Juri Ranieri, and Martin Vetterli. Euclidean distance matrices: Essential theory, algorithms, and applications.
- [EAA23] Ahmed Elaksher, Tarig Ali, and Abdullatif Alharthy. A quantitative assessment of lidar data accuracy, 2023.
- [HL21] Robin H. Helle and Hirpa G. Lemu. A case study on use of 3d scanning for reverse engineering and quality control. *Materials Today: Proceedings*, 45:5255–5262, 2021.
- [KP08] Kenton Mchenry and Peter Bajcsy. *An overview of 3D data content, file formats and viewers*. 2008.

- [MES20] MICRO-EPSILON MESSTECHNIK. Präzision. - scancontrol // 2d/3d laser-profil-sensoren, 2020. <https://www.micro-epsilon.de/fileadmin/download/products/cat--scanCONTROL--de.pdf> [Accessed: 26.02.2024].
- [MSS21] Stephan Mönchinger, Robert Schröder, and Rainer Stark. Automated 3d scan based cad-repositioning for design and verification in one-off construction. *Procedia CIRP*, 100:530–535, 2021.
- [Sch06] Roman Schwartz. Kraft, masse, drehmoment. In Hans-Jürgen Gevatter, editor, *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*, VDI-Buch, pages 55–92. Springer, Berlin [u.a.], 2006.
- [VGRH21] Ana Vafadar, Ferdinando Guzzomi, Alexander Rassau, and Kevin Hayward. Advances in metal additive manufacturing: A review of common processes, industrial applications, and current challenges. *Applied Sciences*, 11(3):1213, 2021.
- [VI23] Styliani Verykokou and Charalabos Ioannidis. An overview on image-based and scanner-based 3d modeling technologies. *Sensors*, 23(2):596, 2023.
- [ZYD22] Juyong Zhang, Yuxin Yao, and Bailin Deng. Fast and robust iterative closest point. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 44(7):3450–3466, 2022.

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

Dortmund, den 4. August 2024

Muster Mustermann

