

Inhaltsverzeichnis

0.1	Einleitung und Motivation	4
0.2	Stand der Technik	5
0.2.1	Additive Fertigung	5
0.2.2	Limitierungen von AF	5
0.2.3	Reverse Engineering	5
0.2.4	3D Rekonstruktion	5
0.2.5	Digitales Abbild	6
0.2.6	Scanner und Datenerfassung	6
0.2.7	ICP-Algorithmus	7
0.2.8	Zusätzliche Messinstrumente	7
0.3	Ziel der Arbeit	8
0.3.1	Einspannproblematik	8
0.3.2	Erfassung der spannkraftinduzierten Deformation	8
0.3.3	Verfahren zur optische Spannkraftdeformationserkennung	8
0.4	Ausgangssituation	9
0.4.1	Pointcloud filtern	9
0.4.2	Pointcloud in Bild konvertieren	10
0.5	Stitching	12
0.6	Analyse der spannkraftinduzierten Deformation	13
0.7	Algorithmus und Software	14
0.8	Zusammenfassung und Ausblick	15
0.9	Validierung	16
0.9.1	Versuchsaufbau	16

Inhaltsverzeichnis

0.1 Einleitung und Motivation

0.2 Stand der Technik

0.2.1 Additive Fertigung

Additive Fertigung, unabhängig von dem Werkstoff, ist ein Bereich im dem viel geforscht und innoviert wird. In fast jedem Industriebereich wird versucht ein bestehendes Design oder Modell zu optimieren und verbessern.

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

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

Aufgrund dieser Vorteile wird AF in vielen Industriebereichen genutzt. Die folgende Sektion zeigt einige Fälle in denen AF erfolgreich benutzt wird. Die Automobilbranche ist ein Bereich in der AF schon viel und erfolgreich eingesetzt wird: Durch AF könne 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 die Befestigung für das Soft-Top, die 44% leichter als das Spritzgussteil ist, und dennoch 10 Mal steifer.

Auch bei älteren Fahrzeugen kann additive Fertigung Verwendung finden. Gerade bei älteren Fabrikaten sind Ersatzteile häufig nicht mehr vom Erstzulieferer zu beschaffen oder mit konventionellen Herstellungsmethoden wirtschaftlich herzustellen. Hier wurde zum Beispiel die rechte Kotflügelhalterung für ein Matra 530 aus 1973 erfolgreich hergestellt, nachdem auch nach längerem suchen kein Originalteil gefunden wurde

0.2.2 Limitierungen von AF

AF kann trotz seiner Vorteile nicht überall eingesetzt werden. Limitierungen in der Materialvielfalt, hohe Material und Anschaffungskosten, begrenzte Bauraumgröße, verminderte Oberflächenqualität und aufwändige Nachbearbeitung können einen Einsatz von AF verhindern.

0.2.3 Reverse Engineering

Reverse Engineering beschreibt den Prozess aus einem bestehenden Produkt oder Objekt ein digitales Abbild zu erzeuge

0.2.4 3D Rekonstruktion

Digitale Abbildungen von Flächen, Objekten oder sogar Körperteilen wurden in den letzten Jahren mehr und mehr benutzt. Anwendungen sind zum Beispiel in der geometrischem Dokumentation, Inspektion, Navigation, Visualisierung und Objekterkennung zu finden

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

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

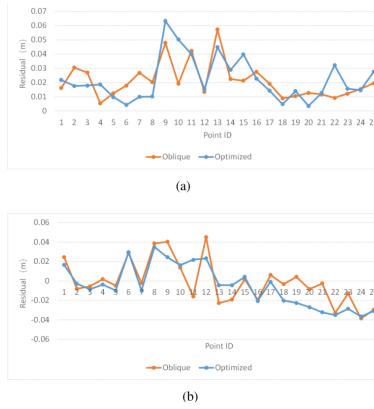


Abbildung 1: Accuracy Photogrammetry

Je mehr Punkte vorliegen, desto genauer wird das Ergebnis, allerdings steigt auch die vorhandene Datenmenge mit, ab einem Punkt kann der verfügbare Speicher ein limitierender Faktor sein. Außerdem steigt die Rechenzeit auch mit der Datenmenge, je nach anschließendem Verfahren sogar exponentiell.

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

0.2.5 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 Akkurate 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).

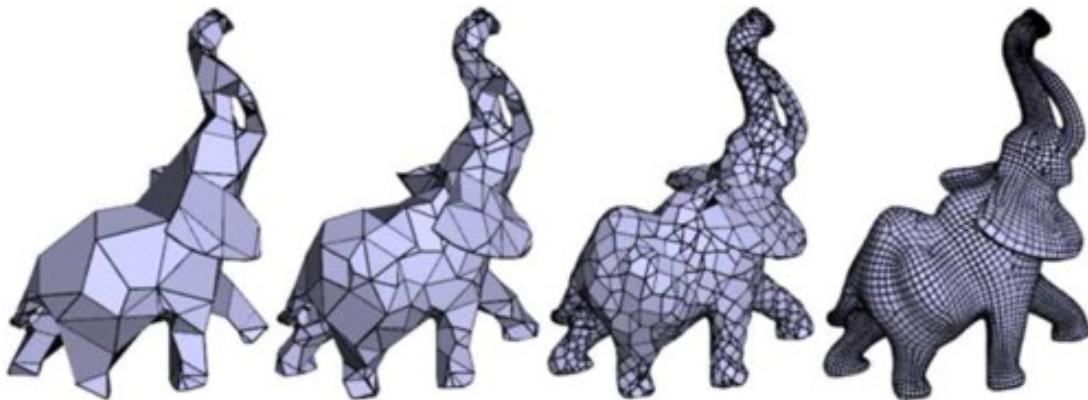


Abbildung 2: Akkurate des 3D Objekts ist abhängig von der Anzahl der Polygone

0.2.6 Scanner und Datenerfassung

Datenerfassung durch einen Laserscanners. Der Scanner hat Abhängig vom Modell und der angebrachten Höhe einen limitierten Bereich den er erfassen kann. In unserem Fall wurde der Scanner 'LLT 30x0-25' verwendet der eine mittleren Messbreite von 25 mm bietet. In Abbildung 3 ist dieser Messbereich sichtbar. Mittig kann in einer Tiefe von 85 mm eine Linie mit der Länge 25 mm gemessen werden. Der komplette messbare Bereich ist rot markiert.

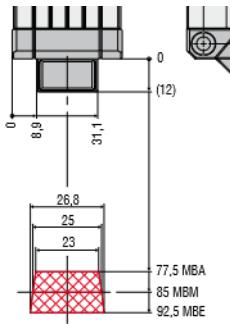


Abbildung 3: Funktionsweise eines Laserscanners

0.2.7 ICP-Algorithmus

Dieser Algorithmus existiert schon seit dem Beginn der 90er Jahre und ist die klassische Methode, wenn es um die Registrierung von Pointclouds und anderen Punkt-Sets geht.

0.2.8 Zusätzliche Messinstrumente

Zusätzlich zu dem Scanner werden noch mit weiteren Messinstrumenten Daten erfasst. In Abbildung 10 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 Piezkristalle (z. B. Quarz, Bariumtitatnat, 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.



Abbildung 4: Taster

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

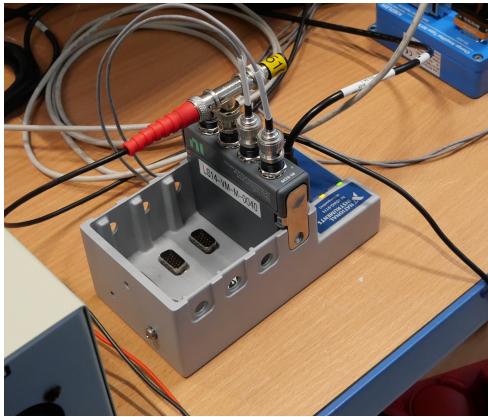


Abbildung 5: Spannungswandler

0.3 Ziel der Arbeit

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

0.3.1 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.

0.3.2 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.

0.3.3 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 deformierter Zustand benötigt. Mit diesen beiden Daten kann der Unterschied ermittelt und ausgegeben werden. Um auch minimale Deformationen erkennen zu können müssen die Daten des eingespannten Bauteils hinreichend genau sein. Deswegen wird ein Laserscanner zur Datenerfassung eingesetzt. Wie schon beschrieben ist der Messbereich eines Laserscanners begrenzt. Da das Verfahren nicht auf eine Bauteilgröße beschränkt sein soll, müssen mehrere Scans als Eingabe akzeptiert und damit umgegangen werden.

0.4 Ausgangssituation

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

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

0.4.1 Pointcloud filtern

Wie man in Abbildung 6 sehen kann streuen nicht alle Pointclouds gleich, abhängig von dem Werkstoff des Bauteils werden die Laserstrahlen unterschiedlich reflektiert und mehr oder weniger Ausreißer sind zu sehen. Man sieht das Metallteil deutlich mehr in beide Richtungen streut, während das FDM gedruckte Bauteil weniger nach oben, aber mehr nach unten streut. Es muss also eine Filtermethode gewählt werden die für alle Fertigungsverfahren anwendbar ist und nicht bei einer Methode besser funktioniert wie bei einer anderen. Werden zum Beispiel die 10 Prozent häufigst auftretenden Höhenwerte bei einem Metallteil benutzt kommt folgendes Bild heraus.

Man sieht vor allem auf der rechten Seite, dass Ränder nicht mehr klar erkennbar sind, da sie durch die Filterung Lücken aufweisen. Praxistest haben gezeigt das ein ausreichend gut funktionierender Filterwert 50 Prozent ist. Damit werden genug Messfehler aus dem Bild

genommen aber trotzdem bleiben Oberflächenfeatures und Ränder sichtbar genug um ein korrektes Zusammenfügen zu gewährleisten. Dieses Filtern bezieht sich aber nur auf 2 dimensionale Bildinformationen. Um bei dem Konvertieren noch weniger Punkte die nicht auf dem Bauteil liegen nicht in das Bild zu übernehmen, kann auch noch die Pointcloud gefiltert werden. Hier kann ein einzelner Punkt relativ zu seinem Nachbarn im 3 dimensionalen Raum betrachtet werden, um so Ausreißer zu erkennen. Dafür sind in der Open-Source Bibliothek 'Open3D' 2 Methoden vorhanden: Radius basiert oder auf Basis von statistischen Werten, erste Methode eignet sich gut, wenn die Maße des Objekts bekannt sind. Hier wird um jeden Punkt eine Kugel gebildet und die Punkte die weniger als einen konfigurierbare Menge an Punkten in ihrer Kugel haben werden entfernt. Da das hier zu entwickelnde Verfahren sich nicht auf eine Bauteilgeometrie beschränken ist dieses Verfahren nicht geeignet. Stattdessen wird das andere benutzt. Hier werden die Punkte entfernt die weiter von ihren benachbarten Punkten entfernt sind als der durchschnittliche Abstand der Punkte in der gesamten Pointcloud. Hier kann die Menge der benachbarten Punkte die betrachtet werden sollen und ein Limit für den Abstand von der Standardabweichung. Umso mehr benachbarte Punkte betrachtet werden, umso mehr Zeit braucht die Filterung, aber die Filterung wird auch akkurate. Im Praxistest haben sich hier 50 Nachbarpunkte bewährt. Mit diesem Wert werden bei Pointclouds in unserem Datensatz jeweils ca. 2 Prozent der Punkte

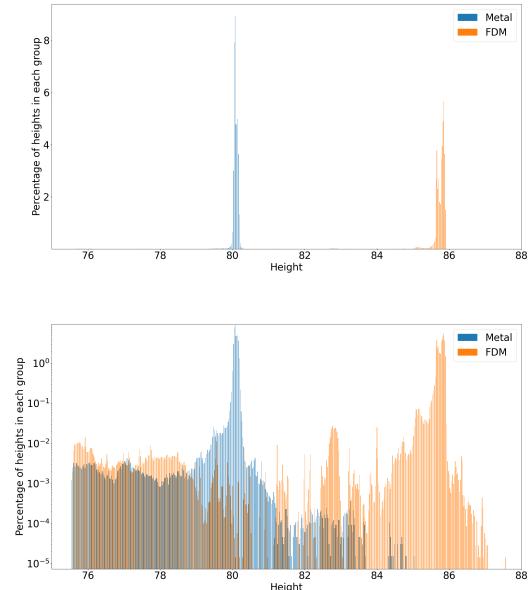


Abbildung 6: Auftreten Höhe

entfernt. So kann das resultierende Bild gut genug umgewandelt werden, um eine erfolgreiche Zusammenführung von verschiedenen Bildern zu gewährleisten. Ein Nachteil bei der Filterung in Abbildung 9 links und rechts mittig zu sehen. Hier sind schwarze Punkte sichtbar. Diese treten auf, weil der Scanner hier über dem Bauteil Punkte erkannt hat. Durch das Filtern wurden diese Punkte entfernt beziehungsweise bei der Konvertierung nicht berücksichtigt. Da diese Punkte dann fehlen bleiben sie im resultierenden Bild schwarz. Das ist zwar etwas unschön anzuschauen, beeinträchtigt das zusammenfügen aber nicht weiter.

0.4.2 Pointcloud in Bild konvertieren



Abbildung 7: Metallteil gefiltert

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

Hier kann also jede Pixel einen Wert zwischen 0 und 255 annehmen. Der entsprechende Wert kann wie folgt berechnet werden:

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

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

Abbildung 8: Berechnung Pixelwert

Wie man in Abbildung 9 sehen kann, sind kaum Helligkeitsveränderungen im Bild sichtbar. Das liegt an derselben Problematik, an der der ICP-Algorithmus häufig scheitert. Reale Datensets wie wir es vorliegen haben sind nicht perfekt, sondern beinhalten Messfehler und Streuungen.

Abbildung 6 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

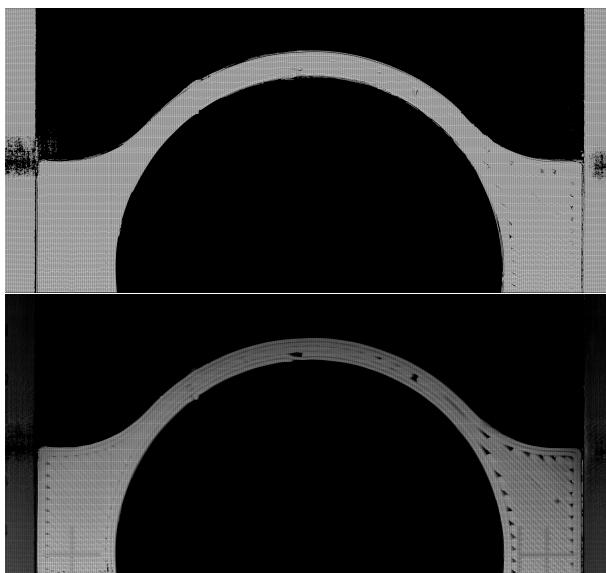


Abbildung 9: Konvertierung Pointcloud zu Bild

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 8 vorgestellte Formel benutzt allerdings die absoluten Minimum und

Maximum Werte. Alle Punkte die tatsächlich auf dem Bauteil werden also entsprechend wenig berücksichtigt. Dem kann Abhilfe geschaffen werden, indem Werte, die weniger häufig auftreten entfernt werden. Sortiert man alle Höhenwerte nach der Häufigkeit ihres Auftreten in der Pointcloud und entfernt den n-ten Prozentsatz können Ausreißer entfernt werden. Wenn nur die häufigsten 10 Prozent übernommen werden erhält man das untere Bild in Abbildung 9

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

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

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

Inhaltsverzeichnis

0.5 Stitching

0.6 Analyse der spannkraftinduzierten Deformation

0.7 Algorithmus und Software

0.8 Zusammenfassung und Ausblick

0.9 Validierung

0.9.1 Versuchsaufbau

In Abbildung 10 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.

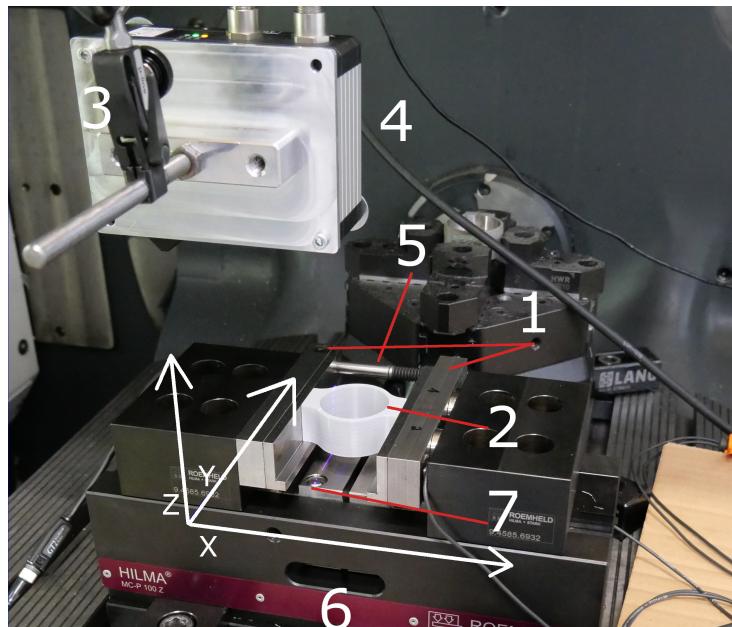


Abbildung 10: Versuchsaufbau

Literaturverzeichnis