

### Institut für Informatik VII Robotik und Telematik

Bachelorar beit

## 3D Scanning für 3D Druck auf nicht flachen Oberflächen

Felix Auinger

März 2022

Erstgutachter: Prof. Dr. Andreas Nüchter

#### Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, räumlich gebundene Modelle von Glaskugeln mithilfe eines Laserscanners zu erstellen. Diese Modelle finden Verwendung bei der Planung von Druckabläufen auf den Oberflächen dieser Glaskugeln. Um zu bestimmen, ob die Glasoberfläche Einfluss auf die Messungen nimmt, wurden die Messergebnisse der Glaskugeln mit und ohne Kreidebeschichtung verglichen. Der Vergleich ergab, dass die Kreideschicht rauschen reduziert, Messfehler vermindert und die Unteroberflächenstreuung reduziert. Im nächsten Schritt wurde die Dicke der Kreideschicht und der Einfluss auf die Messung bestimmt. Mit dem Lasertriangulationssensor wurden die Glaskugeln gescannt, aus den resultierenden Aufnahmen Punktwolken erstellt, Kugeln optimal an diese angepasst und die Kugeln entsprechend den Abweichungen durch die Kreideschicht skaliert. Die Ergebnisse weisen eine Messgenauigkeit von  $\pm 0, 2$  mm zur Glasoberfläche auf und die optimal angepassten Kugeln stimmen in ihren Fehlerbereichen mit den Referenzmessungen mit einem Messschieber überein.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1			
	1.1 Problematik	1			
	1.2 Zielsetzung und wissenschaftlicher Beitrag	1			
	1.3 Aufbau der Arbeit	1			
<b>2</b>	Grundlagen und Hintergründe	3			
	2.1 3D Druck	3			
	2.2 3D Druck in der Medizin	4			
	2.3 Ansätze für freien 3D Druck	5			
	2.4 Laserscanner	6			
	2.4.1 Fehlerquellen beim Scannen mit Lasertriangulationssensoren $\ldots$	8			
	2.4.2 Verwendung von Laserscannern für die Kontrolle des Druckprozesses	10			
	2.4.3 Hand-Auge Kalibrierung	10			
3	Aufbau des Systems1				
4	Experiment und Auswertung	<b>21</b>			
	4.1 Vergleich von Aufnahmen mit und ohne Kreidebeschichtung	21			
	4.2 Bestimmung der Dicke der Kreideschicht	25			
	4.3 Aufnahmen und Modelle der Glaskugeln	26			
5	5 Zusammenfassung und Ausblick				
A	A KUKA Datenblatt				
$\mathbf{Li}_{1}$	Literaturverzeichnis				

### Kapitel 1

## Einleitung

#### 1.1 Problematik

3D Druck ist ein Gebiet, dass sich rapide weiterentwickelt. Der Standarddruck trägt das Druckmaterial in Schichten in einer Ebene auf und ist dadurch in den Anwendungen limitiert. In Bereichen wie medizinischem Druck verursachen Unterstützungsmaterialien Probleme. Manipulatorarme können für die begrenzte Bewegungsfreiheit Abhilfe schaffen und ermöglichen den Druck auf unebenen Oberflächen. Die Schwierigkeit dabei ist, den Druckkopf in einem konstant gleichen, kleinen Abstand zur Oberfläche zu behalten. Dementsprechend sind genaue Modelle der Oberflächen in Bezug zum Roboter notwendig.[9, 11, 17, 24]

#### 1.2 Zielsetzung und wissenschaftlicher Beitrag

Die Arbeit befasst sich mit dem Scannen von Körpern und dem Erstellen von Modellen im Raum in Bezug auf den Roboter und damit mit der Problematik, die bei 3D Druck in mehr Freiheitsgraden entsteht. Dafür scannt man Glaskugeln mit einem Lasertriangulationssensor, der an einem Manipulatorarm befestigt ist. Man betrachtet das Scanverhalten des Sensors auf der Oberfläche, beschäftigt sich mit Methoden diesen Problemen entgegenzuwirken und deren Einfluss auf die erhaltene Oberfläche und erstellt am Ende ein positionsbezogenes Modell aus diesen Aufnahmen.

#### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit beschäftigt sich mit dem Scannen von Glaskugeln. Dabei stellt Kapitel. 2 die Grundlagen in 3D Druck und 3D Scanverfahren, und die Hintergründe, wofür man die Messergebnisse verwenden kann, dar. Kapitel. 3 beschreibt den Aufbau des Experiments und die verwendeten Geräte. Kapitel. 4 geht auf die einzelnen experimentellen Schritte und deren Auswertung ein. Zuerst mit dem Verhalten des Lasers auf der Oberfläche, danach mit Maßnahmen zur Vermeidung von Fehlern, deren Einflüsse auf die Aufnahmen, und zuletzt mit den Vermessungen der Kugeln.

### Kapitel 2

### Grundlagen und Hintergründe

#### 2.1 3D Druck

3D Druck ist ein Verfahren, das zuvor erstellte Modelle von Objekten in einzelnen Schichten druckt[17]. Diese Methodik, die Objekte durch das Auftragen von Material erstellt, bezeichnet man auch als additives Verfahren. Eine Menge aus Einzelschichten kann prinzipiell jedes zusammenhängende dreidimensionale Objekt erstellen. Diese Annahme bestätigt auch Fubini's Theorem. Nach diesem Theorem kann eine Sammlung von n-1 dimensionalen Schichten jedes n-dimensionale Objekt bilden. Die zugrundeliegende Mathematik ist in [6] dargestellt. Die gedruckten Objekte sind aber durch die Genauigkeit des Druckers und die physikalischen Eigenschaften der verwendeten Materialien limitiert<sup>[6]</sup>. Der 3D Druck ist seit den 1980er Jahren kommerzialisiert und verändert die Massenproduktion hin zu einzeln anpassbaren Objekten[17]. Für 3D Druck gibt es unterschiedliche Methoden, die auf dem einzelnen Druck von Schichten basieren. Zu diesen zählt z.B. Material Extrusion, ein Verfahren, das Material im Druckkopf erhitzt und mit Pneumatischem Druck, Kolben oder Schrauben aus einer Düse auf die Oberfläche drückt [21, 29], Binder Jetting, das eine Kombination aus Material Pulver und Klebstoff verwendet [21], Melt Electrowriting, das geschmolzenes leitfähiges Material mit Elektrischer Spannung von einer Düse zu einem Kollektor unterhalb der Druckfläche zieht [14, 25], Powder Bed Fusion, das Materialpulver mithilfe energetischer Strahlung zusammen schmilzt [21], oder Vat Photopolymerization, das photosensitives Material Tropfen für Tropfen aufträgt und über eine Lichtquelle, wie UV Lampen, verhärtet [21]. Alle Verfahren haben unterschiedliche Eigenschaften. Sie unterscheiden sich in der Genauigkeit, der Oberflächenbeschaffenheit, der Geschwindigkeit und den verwendeten Materialien. Jedes Verfahren ist aufgrund seiner Eigenschaften für bestimmte Aufgaben besser geeignet und keines ist den anderen überlegen.

Materialien, die 3D Druck Verfahren verwenden, sind Metalle, die gute physische Eigenschaften besitzen, Polymere, die günstig und flexibel in der Verarbeitung und daher gut für Prototypen geeignet sind, Keramik, das hart, widerstandsfähig und feuerresistent ist, Kompositionen aus unterschiedlichen Materialien, die an gewünschte Eigenschaften anpassbar sind oder auch spezielle Werkstoffe, wie Smart Materials, die ihre Geometrie abhängig von äußeren Einflüssen verändern, Lebensmittel oder Textilien.[21] Die Anwendungsgebiete von 3D Druck sind weit gefächert. Sie kommen in der Raumfahrt zum Einsatz, da sie Freiheiten in Design und Produktion ermöglichen. Die Automobilindustrie profitiert durch schnellere Entwicklung, Prototypen und verbesserte Strukturen. In der Lebensmittelindustrie entstehen personalisierte Nahrungsmittel mit speziell angepassten Nährstoffen. Die Gesundheitsversorgung und Medizin profitieren durch den Druck von Modellen und Prothesen in den Bereichen der Forschung, Bildung, Kommunikation und Versorgung. Auch Architektur, Mode, Elektrik und Elektronik profitieren von anpassbaren Teilen und vereinfachtem Design.[21]

#### 2.2 3D Druck in der Medizin

Die Einsatzgebiete des 3D Drucks wandeln sich von den herkömmlichen und simplen Aufgaben hin zu komplexeren, wie medizinischen Anwendungen. Die Nachfrage nach Ersatzorganen und Geweberegenerationen steigt[9]. 3D Biodruck könnte diesen Mangel lösen. Er druckt mit Biotinte, einer Kombination aus bioaktiven Substanzen, Biomaterialien und lebenden Zellen, oder Biomaterialtinte, bestehend aus Biomaterialien mit oder ohne bioaktiven Komponenten[29]. Diese Tinten imitieren biologische Strukturen über Gerüste mit den notwendigen lebenden Zellen an der entsprechenden Position des originalen Gewebes[6]. Aus der Interaktion dieser Zellen miteinander oder mit dem umliegenden Zielgewebe entstehen voll funktionsfähige Gewebestrukturen oder sie regenerieren Beschädigungen[6, 9]. Das kann in Zukunft die steigende Nachfrage nach Ersatzorganen stillen und Vorteile in der Forschung und Verständigung bringen[5, 9].

Das verwendete Biomaterial nimmt starken Einfluss auf die Qualität und Effektivität des Gewebes. Deshalb müssen die Biotinten bestimmte Kriterien erfüllen. Sie müssen hoch biokompatibel, mechanisch stabil und hochauflösend druckbar sein und das Material muss lebende Zellen enthalten[9]. Außerdem müssen die Zellen nach dem Druck noch bioaktiv sein, das Material muss cytokompatibel sein und darf keine Immunreaktion auslösen, und es muss sich mit der gleichen Geschwindigkeit, mit der sich die Zellen des umliegenden Gewebes erneuern, biologisch abbauen[9, 29]. Wichtig ist auch, dass die Struktur nach dem Druck erhalten bleibt und keine Verformungen auftreten[9]. Materialien, die dafür in Frage kommen, sind entweder natürliche oder synthetische Polymere. Natürliche Biomaterialien, wie Collagen [29], Gelatine [29], Fibrin[9, 29], Allignate [9, 29] sind besser geeignet, um die extrazelluläre Matrix zu imitieren und fördern das Zellwachstum besser[29]. Allerdings sind die mechanischen Eigenschaften meist unzureichend. Deshalb verwendet man Kombinationen mit synthetischen Biomaterialien. Diese besitzen bessere und anpassbare mechanische Eigenschaften, außerdem eignen sie sich besser für den Druck[29].

Die Anwendungen in der Medizin sind vielfältig. Mit Röntgen, CT und MRT Scans von betroffenem Gewebe kann man patientenbezogene Modelle erstellen und diese drucken[5]. Damit wären patientenspezifische Modelle auf Abruf verfügbar und es ist möglich, Implantate schnell und präzise herzustellen[5, 9]. Außerdem lassen sich mit diesen Modellen die Eingriffe besser planen und trainieren, ohne die Gefahr von Verletzungen an Patienten. Die Modelle dienen auch der Verbesserung der Kommunikation zwischen Ärzten und Patienten und sind in der Ausbildung anwendbar. Die Forschung kann davon profitieren, da man selten auftretende Konditionen als Modell in Forschungseinrichtungen untersuchen kann. Die Herstellung von künstlichem Gewebe bietet auch die Möglichkeit, neue Eingriffe oder Medikamente am Zielgewebe zu testen, ohne Gefahren an Versuchspersonen oder Tierversuchen. Genau wie Implantate und Gewebe kann man auch Medikamente mit personalisierten Wirkstoffmengen und Abgaben herstellen.[5] Der 3D Druck in der Medizin bietet viele Möglichkeiten. Bisher ist die Technik für kommerzielle Nutzung nicht genug ausgereift[5, 9]. Die Lücken gwischen ochtem anatomischen Cowebe und

Nutzung nicht genug ausgereift[5, 9]. Die Lücken zwischen echtem anatomischen Gewebe und reproduziertem sind zu schließen, sodass die Zusammensetzungen die Eigenschaften des Zielgewebes passend imitieren[5].

Eine große Problematik, die bisher besteht, ist der Einfluss von Stützmaterialien auf das gedruckte Gewebe. Druck ohne sie ist schwierig, da das Biomaterial, vor allem für Überhänge und Hohlräume, zu instabil ist. Die Unterstützungsmaterialien sind teilweise schwer zu entfernen und es können dabei Schäden am umgebenden Gewebe entstehen[11]. Zwischen dem Gewebe und dem Stützmaterial kommt es zu Interaktionen durch Osmose, wenn sich die Wasserkonzentration zwischen diesen unterscheidet, die Veränderungen in der Viskosität und den mechanischen Eigenschaften verursachen[22]. Außerdem hinterlässt das Unterstützungsmaterial Spuren auf der Oberfläche des eigentlichen Drucks, die selbst nach der Entfernung erhalten bleiben[3]. Die Einflüsse sind besonders bei präzisem Gewebe, wie dem Druck einer Netzhaut, hinderlich, da das genaue Anpassungen des Objekts verhindert.

#### 2.3 Ansätze für freien 3D Druck

Die Freiheiten der Möglichkeiten des 3D Drucks sind aber durch die Flexibilität und Größe der Druckverfahren beschränkt. Die Größe des Druckers limitiert die Ausmaße des gewünschten Objekts. Dadurch ist die Maximalgröße durch den Drucker gegeben, sofern man dieses nicht aus kleineren Einzelteilen zusammensetzen kann. Selbst andere Ansätze wie Manipulatorarme zum Führen des Druckkopfes bleiben durch die Reichweite von diesen beschränkt. Von dieser Problematik sind besonders große Projekte wie der Druck von Gebäuden betroffen.[24]

Die Verwendung von mobilen Robotern in Kombination mit Manipulatorarmen, an denen der Druckkopf befestigt ist, kann Abhilfe schaffen. Diese Möglichkeit zeigen Tiryaki et al. in [24]. Roboter fahren in Reichweite und tragen dann an der gewünschten Stelle Material auf. Ihre Beweglichkeit erhöht den Wirkradius des Druckers und ermöglicht somit größere zusammenhängende Strukturen. Dieser Ansatz ist nicht auf den Einsatz mit einem Roboter limitiert. Zhang et al. zeigen in [28], dass der gleichzeitige Einsatz von mehreren mobilen Robotern möglich ist und die Effektivität erhöht.

Die Beweglichkeit des Druckkopfes ist ein weiterer Bereich, der viele Drucker limitiert. Normalerweise erfolgt der Druck Schicht für Schicht in der horizontalen Ebene. Die Drucker sind dementsprechend aufgebaut und ermöglichen eine Bewegung in der horizontalen für den Druck einer Schicht und in der vertikalen für die Abstandsänderung zur nächsten. Rotationen des Druckkopfes und daraus resultierende Veränderungen der Druckebene, die freier Druck benötigt, sind nicht möglich. Diese Limitation beschränkt den Druck auf flache Oberflächen und damit die Vielfältigkeit der Objekte. Druck auf nicht flachen Oberflächen ermöglicht komplexere und instabile Strukturen ohne Unterstützungsmaterialien und eliminiert somit die Probleme, die diese verursachen. Manipulatorarme mit mehr Freiheitsgraden ermöglichen, dass man diese als Grundlage nutzt. Bewegung in jede Richtung und Rotation ermöglicht den Druck von Objekten anhand ihrer Geometrie und nicht aus horizontalen Schichten.[12] Diesen Ansatz zeigen Ishak und Larochelle in [12]. Sie verwenden einen Roboterarm und drucken damit eine Gitterstruktur zuerst in der horizontalen und verändern die Ebene, sobald eine bestimmte Höhe erreicht ist, in die vertikale und drucken an der Seite des Gebildes weiter.

#### 2.4 Laserscanner

Punktwolken verwendet man für die 3D Digitalisierung von Gegenständen und Oberflächen. Sie bestehen aus Einzelpunkten mit jeweiligen X, Y, und Z Koordinaten und können zusätzlich RGB Farbwerte enthalten[27]. Sie entstehen aus der Vermessung von Oberflächen und Objekten mit bestimmten Sensorsystemen. Die Messverfahren sind in drei unterschiedliche, grundlegende Kategorien unterteilt. Zu diesen zählen Triangulationsverfahren, Time-of-Flight Messungen und Modulationstechniken. Die Kategorien schließen sich dabei nicht aus, so ist die Kombination von mehreren Verfahren in einem Sensor möglich.[18] Weiterhin unterteilt man Triangulationsverfahren zusätzlich in aktive und passive Systeme. Die aktiven Sensoren kontrollieren die Belichtung der Umgebung und erzeugen mit z.B. Lasern erkennbare Muster und Merkmale auf der Oberfläche, die der Sensor erkennt. Passive Sensoren beeinflussen die Umgebung nicht, sondern verwenden natürlich auftretende Merkmale.[10]

Beispiele für diese Sensoren sind z.B. 3D Laserscanner. Sie funktionieren entweder nach dem Time-of-Flight Prinzip oder Modulationstechniken und bestimmen Entfernungen über einen Laser. Bei Time-of-Flight senden sie diesen in Richtung der Oberfläche und bestimmen die Zeit, die er benötigt, bis er, von dem Objekt reflektiert, den Sensor erreicht. Die Entfernung berechnet der Sensor dann aus der gemessenen Zeit und der bekannten Geschwindigkeit. Bei Modulationstechniken strahlen die Scanner durchgehende Wellen mit modulierter Amplitude aus. Nach der Reflexion misst der Scanner diese und bestimmt aus der Phasenverschiebung die Distanz. [27] Ein anderes Verfahren ist die Photogrammetry. Sie bezeichnet das Verfahren, dass die reale Position von Merkmalen, aus erkennbaren Informationen in Photographien, berechnet. Dafür nimmt man überlappende Bilder mit Kameras an unterschiedlichen bekannten Positionen auf. In diesen Bildern ermittelt man wiedererkennbare Merkmale und bestimmt dann aus der relativen Position der Kameras und den Merkmalen in ihren Bildern ihre reale Position. Die Berechnung erfolgt über die Positionen der Kamera und die Winkel der Kamera zum jeweiligen Merkmal. Zwischen diesen spannt man ein Dreieck auf und bestimmt mit diesem und dem bekannten Abstand zwischen den Kameras die Distanz zum Merkmal[18]. Die einzelnen Merkmale mit ihrer berechneten Position stellt man in einer Punktwolke dar.[27] Dieses Verfahren fällt in die Kategorie der Triangulation [18]. Auf eine ähnliche Weise funktioniert das Verfahren der Videogrammetry. Diese verwendet keine Bilder, sondern Videoaufnahmen für die Berechnung der Positionen. Die Punktwolke rekonstruiert man als fortschreitenden Prozess, da die Informationen, der vorherigen Frames die Grundlage für die nächsten bilden.[27]

Eine weitere Methode, die Triangulationsverfahren nutzt, sind Stereokameras. Sie enthalten mehrere Linsen und Bildsensoren, deren relative Position zueinander bekannt ist. Aus der bekannten Position und Bildmerkmalen berechnet man die 3D Position in Bezug zur Kamera.[27] Mit diesen Verfahren sind unterschiedliche und vielseitige Ansätze für 3D Messungen gegeben. Eine Gemeinsamkeit, die bei allen auftritt, sind Probleme, die auf spiegelnden, transparenten oder brechenden Oberflächen auftreten[10]. Für die Vermessung von diesen gibt es spezielle Ver-



Abbildung 2.1: Die Abbildung zeigt die Funktion eines Lasertriangulationssensors. Er projiziert den Laser auf die Oberfläche und abhängig von der Distanz verändert sich die Position und der Einfallswinkel auf dem Sensor.[23]

fahren. Für spiegelnde Oberflächen gibt es z.B. Shape from Distortion, für transparente z.B. Shape form Specularity und für brechende Oberflächen z.B. Direct Ray Measurement[10]. Ihrke et al. geben in [10] einen Überblick über diese speziellen Messverfahren und deren Funktionsweise.

Eine weitere Gemeinsamkeit, die bei den vorherigen Methoden vorkommt, ist die Komplexität im Aufbau oder der Auswertung. Ein simples Verfahren für Oberflächenvermessung bietet Laserlinientriangulation. Sie projiziert einen Laser auf die Oberfläche und erzeugt damit künstliche Merkmale, die ein Sensor erkennt. Sie zählen zu den aktiven Sensoren und sind in eine Laserquelle und einen Sensoren unterteilt[10]. Der Abstand zwischen diesen ist bekannt und bleibt, wie der Winkel zwischen dem Laser und der Verbindungslinie zwischen Sensor und Empfänger, konstant[16]. Diese Annahmen sind notwendige Voraussetzungen für die Abstandsberechnung. Den Aufbau und das Messprinzip stellt Abbildung. 2.1. Die Laserquelle erzeugt eine Linie auf

object type	surface / volume type class image formation
opaque	surface, rough (1) diffuse or near diffuse reflectance
	surface, glossy 2 mixed diffuse and specular reflectance
	surface, smooth 3 ideal or near ideal specular reflectance
translucent	surface, sub-surface scattering ④ multiple scattering underneath surface
transparent	surface, smooth (5) ideal or near ideal specular refraction
	volume, emission / absorption 6 integration along viewing ray
	volume, single scattering 🧻 integration along viewing ray
	volume, multiple scattering 8 full global light transport without occluders
inhomogeneous	mixed scenes, containing g full global light transport many / all of the above

Abbildung 2.2: Die Abbildung beschreibt die unterschiedlichen Veränderungen die auftreten, wenn Licht auf eine Oberfläche trifft. Die grün markierten zeigen undurchsichtige Oberflächen, auf denen in 1 perfekte diffuse und in 2 eine Kombination aus diffuser und spiegelnder Reflexion auftritt. Die gelbe Markierung beschreibt die Reflexionen auf transparenten Oberflächen. 3 stellt ideal spiegelnde Reflexion dar, 4 vielfache Brechung unter der Oberfläche, 5 die Brechung die auftritt, wenn das Licht in das Material eindringt. Die restlichen beschreiben Phänomene, die in Volumen und nicht auf Oberflächen auftreten, wie Absorption, Streuung und Kombinationen aus allen. Außerdem gibt es fluoreszierende Farbe, die Strahlung absorbieren und auf einem niedrigeren Energieniveau abstrahlen.[10, 19]

der Oberfläche des zu vermessenden Objekts, die Reflexion von dieser, die auf der Oberfläche entsteht, trifft im Empfänger auf eine Sensormatrix, die den Einfallswinkel bestimmt[1, 16]. Dieses Verfahren vermisst die Merkmale auf einer 2D Linie, die es auf die Oberfläche projiziert und bestimmt die Position dieser bezüglich zur Scannerposition. Damit 3D Aufnahmen entstehen, bewegt man den Sensor. Die Sensorposition ist währenddessen bekannt, andernfalls entspricht die Position der Linienaufnahmen nicht der Wirklichkeit[1, 26]. Sensoren, die dieses Verfahren verwenden, sind kompakt, mit wenig Außenverkabelung, da die Berechnung innerhalb des Sensors stattfindet[2]. Sie bieten eine bezahlbare, relativ zuverlässig und genaue Messmethode für schnelle Vermessung, die hohe Profilauflösungen und Profilraten ermöglicht[2, 26]

#### 2.4.1 Fehlerquellen beim Scannen mit Lasertriangulationssensoren

Das Triangulationsverfahren liefert eine simple und effektive Methode für die Vermessung von Oberflächen. Bestimmte Oberflächen- und Messeigenschaften verschlechtern allerdings die Qualität der Messungen. Zu diesen zählen reflektierende, transparente und spiegelnde Oberflächen[26]. Für eine korrekte Messung muss die Oberfläche das Licht direkt auf den Sensor reflektieren. Diffuse Reflexionen sind dafür am besten geeignet. In der Realität treten meistens keine rein diffusen Reflexionen, sondern eine Kombination mit spiegelnder auf.[26] Abbildung. 2.2 stellt die unterschiedlichen Phänomene, die die Beschaffenheit bei der Reflexion auslöst, dar. Dabei können auch mehrere auftreten, wie Eindringen in das Material und annähernde Spiegelung an der Oberfläche. Auf spiegelnden und reflektierenden Gegenständen ist nur wenig diffuse Reflexion erhalten. Trifft das zurückgeworfene Licht, aufgrund des Abstrahlungswinkels, nicht auf den Sensor, entstehen Messfehler. Auf transparenten Oberflächen treten Reflexionen nicht nur auf der Oberfläche, sondern auch unterhalb auf, da die Strahlung in das Material eindringt. Das verfälscht die bestimmte Entfernung, und verschlechtert die Qualität der Messung, da das scheinbare Reflexionszentrum innerhalb der Oberfläche liegt[13]. Das Auftragen einer dünnen Staub- oder Materialschicht auf die Oberfläche oder das Besprühen mit Farbe verhindert diese Fehler[26]. Es vermeidet das Eindringen der Strahlung in das Material und die Oberfläche streut das zuvor gespiegelte Licht. Die Veränderung der Geometrie und Struktur des Messobjekts, vor allem die Dicke der Schicht, muss man bei der Auswertung beachten[26].

Auf diese Probleme sind auch Suntornnond et al. in [22], bei der Vermessung von Marmorfiguren gestoßen. Marmor besteht aus vielen, kleinen, teilweise transparenten Kristallen, die das Licht nicht direkt an der Oberfläche reflektieren[13]. Besonders stark betroffen sind polierte Oberflächen, da die Verschmutzungen und Unebenheiten, die auf den nicht polierten auftreten, eine bessere Oberflächenreflexion gewährleisten und verhindern, dass die Strahlung in die Oberfläche eindringt. Das verringert oder verhindert die Unteroberflächenreflexion. Die Verschmutzungen erzielen den gleichen Effekt wie eigens aufgetragene Materialien und verbessern somit die Qualität der Aufnahmen.[13]

Die Farbe der Oberfläche ist ein weiteres Kriterium, dass Probleme verursachen kann. Bei unpassender Färbung absorbiert sie das Licht im Wellenbereich des Lasers und verhindert dadurch eine Reflexion. Die richtige Farbwahl beeinflusst die Messung positiv, da sie das Licht von Fremdquellen absorbiert und somit Störungen eliminiert. [26] Farben mit fluoreszierenden Eigenschaften sind auch möglich. Diese absorbieren die einfallende Strahlung und strahlen danach auf einem niedrigeren Energieniveau. Der Laser misst das abgestrahlte Licht. Die Messung erfolgt also nicht über eine Reflexion, sondern Absorption und wieder Abstrahlung. Die Fluoreszenz ist so anpassbar, dass sie mit hoher Leuchtdichte und Farbkontrast die Qualität der Messung erhöht. [19, 20]

Der Einfallswinkel und die Entfernung des Sensors beeinflussen auch die Qualität[13, 26]. Der Winkel verändert die Reflexion auf der Oberfläche, sodass sie Lichtstrahlen schlechter, oder gar nicht auf den Sensor reflektiert[26]. Positionen mit senkrechtem Einfallswinkel sind am besten geeignet[13]. Steigende Entfernung verschlechtert die Auflösung, da sie den Triangulationswinkel verkleinert und somit das Rauschen durch Störeinflüsse verstärkt[25]. Außerdem sinkt die Auflösung mit der steigenden Entfernung, da der Scanner einen größeren Bereich misst.[26].

Eine, von der Oberflächenbeschaffenheit unabhängige Störgröße ist die Sensortemperatur. Die thermalen Veränderungen, die bei Betrieb des Sensors entstehen, verändern die internen Maße des Sensors und somit das Messergebnis[25].

Damit man Messungen mit diesen Sensoren optimal ausführt, muss man verschiedene Faktoren beachten. Die Oberfläche sollte einfarbig und im Spektrum des Lasers reflektierend sein. Materialien mit diffuser Reflexion sind dabei bevorzugt. Bei zusätzlich aufgetragenem Material oder Farbe muss man die Dicke, die Geometrie- und Strukturveränderung beachten. Den Laser sollte man während der Messung senkrecht und so nahe an der Oberfläche wie möglich positionieren. Dadurch erkennt man Details besser und mit weniger Fehlern. Die Samplerate des Sensors sollte man möglichst hoch einstellen, da das das Rauschen verringert. Die Stärke des Lasers sollte man minimal einstellen und den Grenzwert des Sensors dementsprechend anpassen. Damit die Temperaturveränderung des Sensors keinen Einfluss auf die Messung nimmt, sollte man diesen sowohl vor der Kalibrierung als auch vor der Nutzung auf die Betriebstemperatur erwärmen. Die Berücksichtigung dieser Schritte vermiedet die meisten Messfehler.[25, 26]

#### 2.4.2 Verwendung von Laserscannern für die Kontrolle des Druckprozesses

Man kann Laserscanner auch in Kombination mit 3D Druck verwenden, um die Qualität über aktive Prozesskontrolle zu verbessern. Die genaue Platzierung der einzelnen Schichten aufeinander garantiert die Genauigkeit und Funktionalität von gedruckten Objekten. Leichte Unregelmäßigkeiten im Druck führen zu kleinen Abweichungen, die die Genauigkeit der nächsten Schicht beeinflussen. Es gibt unterschiedliche Ansätze, die Abhilfe von dieser Problematik schaffen. Entweder simuliert man den Druck und versucht somit die Abweichungen und die genaue Materialposition vorherzusagen. Dabei tritt die Schwierigkeit auf, dass der Materialausstoß nicht gleichmäßig, vor allem bei Druck mit unterschiedlichen Materialien, und somit nicht ausreichend vorhersagbar ist. Oder man überwacht den Druck aktiv mit Sensoren und korrigiert die nächste Schicht entsprechend den Messergebnissen. Dafür befestige man einen Scanner, z.B. Lasertriangulationssensor, an dem Druckkopf, der die gedruckten Schichten überwacht. Armstrong et al. verwenden in [7] dieses Verfahren und verbessern damit die Genauigkeit des Druckverfahrens. Sie scannen die neu gedruckten Schichten, verarbeiten die Ausgabe zu einem Modell und ermitteln dessen Position in den Referenzkoordinaten des Druckers. Der Unterschied dieser Ist zu der Soll Position bestimmt die Verschiebung der nächsten Schicht. Das angewendete Verfahren liefert Verbesserungen, aber schöpft das Potential der Korrektur nicht vollständig aus, da es nur in einer Ebene scannt und korrigiert. Mehrere Sensoren in unterschiedliche Ebenen ermöglichen weitere Verbesserungen, wie die Anpassung des Materialflusses in bestimmten Regionen, wie Uberschneidungen, damit man den Abstand zur Druckebene genau bestimmen kann, oder die Höhe konstant hält. Aktive Prozesskontrolle ermöglicht auch die Korrektur während und nicht erst nach dem Auftragen einer Schicht.<sup>[7]</sup>

#### 2.4.3 Hand-Auge Kalibrierung

Die Kalibrierung von Werkzeugen an Robotern erfolgt normalerweise nach einfacher 3-Punkt Kalibrierung für den tool center point. Bei optischen Sensoren kann man diesen aber nicht gezielt an einem Referenzpunkt platzieren, da er innerhalb des Sensors liegt und man die genaue Position nicht ausmachen kann. Deshalb verwendet man für diese Sensoren Hand-Auge Kalibrierungsverfahren. Diese verwendet ein Referenzobjekt, dessen Position im Raum bekannt ist, und bestimmt die Position des Sensors über Messungen von diesem. Die Berechnung löst die Gleichung AX = XB, wobei A und B die relative Position des Sensors und des Roboterflansches und X die gesuchte Kalibrierungsmatrix beschreibt.[15]

Der folgende Abschnitt beschreibt eine Kombination von 2 Verfahren der Hand-Auge-Kalibrierung, die eine Kugel mit bekanntem Radius als Kalibrierungsobjekt verwenden. Als Erstes bestimmt man den Kugelmittelpunkt, da die Transformationsberechnung diesen benötigt. Dafür führt man Teilmessungen der Kugel durch. Die Scanebene bildet als Schnittmenge mit der Kugel ein Kreissegment und hat die Eigenschaft, dass der Normalenvektor immer senkrecht zum Kugelmittelpunkt steht, wenn man ihn im Zentrum des Schnittkreises platziert. Aus dem bekannten Radius der Kugel und des Kreises berechnet man den Abstand zum Mittelpunkt mit dem Satz



Abbildung 2.3: Berechnung des Kugelmittelpunkts relativ zum Scanner aus einer Profilmessung.[15]

des Pythagoras.[15]

$$h^2 = r_E^2 - r_S^2$$

Abbildung. 2.3 stellt die entsprechende Messung zur Berechnung dar. Aus mehreren dieser Messungen bestimmt man die genaue Position des Mittelpunktes. Dabei muss man beachten, dass die Messung die Seite, auf der sich der Mittelpunkt befindet, nicht definiert. Dafür benötigt man zusätzliche Informationen von externen Sensoren oder vorher festgelegten Mustern, auf welcher Seite sich der Mittelpunkt befindet.[15]

Anschließend berechnet man die Transformation. Die Berechnung der Rotation und Translation erfolgen unabhängig voneinander. Zuerst bestimmt man die Rotation, da diese für die Berechnung der Translation erforderlich ist. Die Rotationsberechnung erfolgt nach dem Verfahren, das Challis in [8] darstellt und die Translationsberechnung nach [15] von Lisak et al..

Die Rotationsberechnung erfolgt aus drei Aufnahmen, bei denen man den Sensor in den drei Achsen über die Kugel bewegt und deren Mittelpunkt relativ zum Sensor berechnet. Dabei zeichnet man die Bewegung des Roboterflansches auf. Die Minimierung der Punktabstände des Roboterflansches und dem entsprechenden Mittelpunkt im Sensorkoordinatensystem bestimmt die relative Rotation[8].

Die Translationsberechnung nutzt das Wissen über die Rotation des Sensors und Segmentaufnahmen, wie sie die Berechnung des Mittelpunktes verwendet. Aus mehreren Messungen bestimmt man über die Minimierung der Abstände aus dem Kugelmittelpunkt im Sensorkoordinatensystem und der Position des Flansches die Translation zwischen diesen. Die Kalibrierungsmatrix setzt sich aus der Rotation und Translation zusammen. Die Berechnung mit diesem Verfahren erreicht eine Genauigkeit von  $\pm 0,1$ mm entlang der Achsen für die Translation und  $\pm 0,1^\circ$  für die Rotation.[15]

### Kapitel 3

### Aufbau des Systems

Das folgende Kapitel beschreibt den Aufbau der einzelnen Komponenten und den allgemeinen Aufbau des Experiments. Der verwendete Sensor ist der Lasertriangulationssensor scanCONTROL 2900-25 der Marke MICRO-EPSILON, sichtbar in den Abbildungen in 3.1.

ScanCONTROL 2900-25 der Marke MICRO-EI SHON, sichtbar in den Abbildungen in 3.1. Sein Messbereich umfasst 25 mm von 53,5 mm bis 78,5 mm Entfernung. Laut den Angaben des Herstellers besitzt er eine Referenzauflösung von 2  $\mu$ m und eine Linearität von ±0,10% des Messbereiches. Mit einem Öffnungswinkel von 20° beträgt die Breite des Laserstrahls auf der Oberfläche 23,4 – 29,1 mm und er nimmt bis zu 1280 Punkte pro Profil auf. Die verwendete Lichtquelle des Sensors ist ein roter Halbleiter Laser mit einer Wellenlänge von 658 nm. Das maximal zulässige Fremdlicht während der Messung beträgt 10000 lx.[4] Der verwendete Roboter ist das Modell KR 16 der Marke KUKA, Abbildung. 3.2, mit der KR C2 Steuerung. Er ist für eine Traglast von 16 kg ausgelegt und wiederholt vorgegebene Pfade mit einer Genauigkeit von ±0,05 mm. Der Roboter besitzt 6 Achsen und kann sich mit 6 Freiheitsgraden bewegen. Anhang. A beschreibt die Daten des Roboters. Die 3D-gedruckten Halterung, Abbildung. 3.3 befestigt den Scanner, Abbildung. 3.4, an dem Roboter. Mit diesem Aufbau scannt man zwei unterschiedlich große Glaskörper. Bei diesen handelt es sich um Lampenschirme aus weißem Glas, Abbildung. 3.5. Sie besitzen eine Halterung und Öffnung an der Unterseite und, abgesehen von dieser, einen sphärischen Körper. Diese Kugeln positioniert man für die Vermessung auf einem Dreibeinständer, Abbildung. 3.6. Den kompletten Aufbau zeigt Abbildung. 3.7.

Für die Wiederholbarkeit der Messungen an der gleichen Position, ist sowohl die Position des Dreibeins am Boden, Abbildung. 3.8, als auch die Position der Glaskörper auf dem Dreibein, Abbildung. 3.9, markiert. Die jeweilige Position ist dabei so gewählt, dass der Sensor die, in Richtung des Roboters zeigende, Oberfläche der Kugel mit hinreichendem Abstand, in seinem Arbeitsbereich, misst. Die Position ist dabei nahe am Roboter gewählt, damit der Sensor besseren Zugang zu der vom Roboter abgewandten Seite der Kugel hat, ohne dass Messfehler auf der dem Roboter zugewandten Seite auftreten. Dadurch vermisst man einen möglichst großen Teil der Oberfläche. Für eine vollständige Messung reicht der Bewegungsradius des Roboters nicht aus. Bevor man den Sensor für Aufnahmen der Kugel verwendet, muss man diesen kalibrieren. Die Kalibrierung erfolgt nach dem Hand-Auge-Kalibrierungsverfahren aus Kapitel. 2.4.3. Das dafür verwendete Kalibrierungsobjekt ist eine Metallkugel, Abbildung. 3.10 b), die an einer im



Abbildung 3.1: Der verwendet Scanner in einer Seiten-, a) und Frontansicht, b).

Raum bekannten Position, Abbildung. 3.10 a) positioniert ist.

Für die Vermessung fährt der Sensor die Kugeln auf einem manuell aufgenommenen Pfad ab. Dabei bewegt er sich in linearen Bewegungen, mit überlappenden Messbereichen, über die Oberfläche der Kugel und erzeugt daraus sequenzielle Abschnitte der Oberfläche. Im Anschluss verarbeitet CloudCompare v.2.11.3 diese Abschnitte.



Abbildung 3.2: Der verwendet Manipulatorarm von KUKA.



Abbildung 3.3: Die Bilder zeigen die Halterung zur Befestigung des Sensors am Roboter.



Abbildung 3.4: Die Abbildungen zeigen den Sensor, der mit der Halterung an dem Manipulatorarm des KUKA Roboters befestigt ist.

3D Scanning für 3D Druck auf nicht flachen Oberflächen



Abbildung 3.5: Die Lampenschirme sind die verwendeten Messobjekte. Auf der linken Seite der kleine, mit einem angegebenen Durchmesser von 15 cm und auf der rechten Seite der große mit 20 cm.



Abbildung 3.6: Das Dreibein für die Positionierung der Lampenschirme



Abbildung 3.7: Die Abbildung zeigt den Aufbau des Experiments mit dem Sensor an dem Roboter und einem auf dem Ständer platzierten Lampenschirm.

3D Scanning für 3D Druck auf nicht flachen Oberflächen



**Abbildung 3.8:** Die Abbildung zeigt a) die Markierungen des Ständers am Boden, damit man ihn erneut an dieser positionieren kann. In b) zeigt eine Nahaufnahme eines einzelnen Beines mit der Klebebandmarkierung.



**Abbildung 3.9:** Die Abbildungen zeigen die Positionsmarkierungen der Lampenschirme auf dem Ständer. In a) sieht ist die Standfläche auf dem Ständer zu sehen. Die aufgezeichneten Kreise markieren die Position der Kugel. Bild b) zeigt den großen Lampenschirm an der passenden Position, Bild c) den kleinen. Die Striche am Rand der Kreise und an den Kugeln sind Indikatoren für die Ausrichtung der Kugel, damit eine Platzierung an der gleichen Position mehrfach möglich ist.



**Abbildung 3.10:** Bild a) zeigt den für die Kalibrierung verwendeten Aufbau. Abbildung. b) stellt die verwendete Kalibrierkugel auf ihrer Halterung dar.

### Kapitel 4

### **Experiment und Auswertung**

#### 4.1 Vergleich von Aufnahmen mit und ohne Kreidebeschichtung

Die beiden Glaskugeln bestehen aus weißem Glas. Dieses Material ist sowohl transparent als auch reflektierend und verursacht dadurch Ungenauigkeiten in der Messung. Die genauen Problematiken, die durch diese Oberflächenbeschaffenheiten entstehen sind in Kapitel. 2.4.1 dargestellt. Das Auftragen von nicht transparentem Material, in diesem Fall Kreide, reduziert diese Fehler. Man sprüht sie in flüssigem Zustand auf die Kugeln und verstreicht sie mit einem Pinsel. Das verhindert Luftblasen in der Kreideschicht und erzielt eine möglichst gleichmäßige Verteilung. So ist eine regelmäßige Abweichung zur echten Oberfläche gewährleistet. Die Dicke der Kreideschicht verfälscht die wahre Oberfläche und verursacht dadurch Abweichungen, die man berücksichtigen muss.

Im Folgenden vergleicht man Aufnahmen der Kugel mit und ohne Kreideschicht in CloudCompare v.2.11.3. Der Vergleich verwendet Linienaufnahmen der gleichen Position mit unterschiedlichen Einfallswinkeln. Der Scanner ist für diese Aufnahmen in unterschiedlichen Winkeln positioniert, damit man dessen Einfluss auf die Messung beobachten kann. Der erste Vergleich bezieht sich auf Aufnahmen, bei denen der Laser annähernd senkrecht auf die Kugel auftrifft. In Abbildung. 4.1 a) ist die Position des Scanners über der Kugel zu sehen. Die in dieser Position entstandenen Aufnahmen zeigt 4.1 b). Der farbig markierte Teil entspricht dabei den Aufnahmen auf der mit Kreide bestrichenen Kugel, die weißen Punkte gehören zu der Aufnahme ohne Kreide. Beim Vergleich der beiden Aufnahmen fällt auf, dass die Scans der mit Kreide bedeckten Kugel oberhalb der Aufnahmen ohne Kreide liegen. Der Abstand, den die beiden Aufnahmen zueinander haben, variiert, abhängig vom Abschnitt der Aufnahme. Diese Verteilung, die die farbliche Markierung darstellt, ist auch in Diagramm. 4.2 dargestellt. Der mittlere Abstand beträgt hier 1,09060 mm und schwankt, mit einer Standardabweichung von 0.042567 mm zwischen 0,95 mm und 1,18 mm. Am größten ist dieser Abstand im mittleren Bereich der Aufnahme, an den Rändern verringert er sich. Dieser Abstand überschreitet die Dicke der Kreideschicht, dementsprechend misst der Scanner nicht die Oberfläche, sondern das Licht, das in diese eindringt, und verfälscht dadurch die Messung. Abbildung. 4.3 zeigt diese unterschiedlichen Reflexion auf der Oberfläche. In 4.3 a) ist die Linie auf der unbeschichteten Kugel zu sehen. Diese ist nicht



Abbildung 4.1: Abbildung a) zeigt die Position des Sensors für eine Einzelaufnahme, mit und ohne Kreide. Bild b) stellt den Vergleich der beiden Aufnahmen dar. Die farbige Linie ist die Aufnahme der mit Kreide beschichteten Kugel und die Farbverteilung stellt die Distanz zwischen diesen entsprechend den Farben in Diagramm. 4.2 dar.



Abbildung 4.2: Das Diagramm zeigt die Verteilung der Abstände zwischen den Scans in Abbildung. 4.1. Dabei ist die Anzahl der Punkte für die jeweiligen Abstandsbereiche dargestellt. Die Farben entsprechen der Färbung der Punktwolke in Abbildung. 4.1 b).



**Abbildung 4.3:** Die Bilder zeigen einen Vergleich der Projektion der Laserlinie auf die Kugeloberfläche. Bild a) stellt sie auf der Glasoberfläche, b) auf der mit Kreide beschichteten dar.

eindeutig definiert und der Bereich des Lasers auf der Oberfläche streut stark. Abbildung. 4.3 b) stellt die Linie auf der Kreideschicht dar. Diese ist deutlicher definiert und zeigt weniger Reflexion in Bereichen um die eigentliche Laserlinie. Daraus wird ersichtlich, dass die Laserposition auf der unbedeckten Kugel ungenauer ist. Der Scanner nimmt dadurch eine verfälschte und verrauschte Oberfläche wahr. Die Ungenauigkeiten ist auch innerhalb der einzelnen Scans zu sehen und bei der vergrößerten Ansicht in 4.4 besonders deutlich. Bei den Aufnahmen mit Kreide sind sie auf die ungleichmäßige Verteilung dieser zurückzuführen, allerdings weniger stark ausgeprägt als bei der unbeschichteten Kugel. Die Fehler auf dieser entstehen durch die Spiegelung und Transparenz der Oberfläche. Für den Einfallswinkel in Abbildung. 4.5 a), sind die Aufnahmen in b) zu sehen. Der Scan auf der Kreideschicht liegt auch hier oberhalb des Scans auf der Glasoberfläche. Auch die Verteilung der Abstände zeigt ähnliche Verhältnisse. So ist der Abstand im mittleren Bereich am größten und nimmt zu den Seiten hin ab. In Abbildung. 4.6 sieht man die Verteilung der Abstände in den entsprechenden Farben der Abweichung. Der mittlere Abstand ist bei einem steileren Einfallswinkel höher als bei der senkrechten Aufnahme. Die mittlere Entfernung beträgt hier 2,048597 mm und die Standardabweichung 0,073676 mm. Der Einfallswinkel in Abbildung. 4.7 a) verursacht erneut das gleiche Ergebnis. Abbildung. 4.7 b) zeigt die Scans mit den entsprechenden Abständen in Abbildung. 4.8. Hier beträgt der mittlere Abstand 2,249094 mm und die Standardabweichung 0,085709 mm. Diese Messungen zeigen,



Abbildung 4.4: Das Bild zeigt eine Nahaufnahme der Scans aus Abbildung. 4.1.



**Abbildung 4.5:** Die Darstellung a) zeigt die Position des Scanners über der Kugel für einen Einzelscanvergleich mit und ohne Kreide. Die beiden Aufnahmen stellt Abbildung b) dar. Die farbliche Markierung, entsprechen den Farben aus 4.6, steht für den Abstand der Punkte zu denen des Glasscans.

3D Scanning für 3D Druck auf nicht flachen Oberflächen



Abbildung 4.6: Die Abbildung zeigt die Verteilung der absoluten Distanzen, die die Punkte des Scans mit Kreide von dem ohne Kreide, aus Abbildung. 4.5 b), aufweisen.

dass die Abstände zwischen den Messungen mit und ohne Kreide auftreten und mit steilerem Einfallswinkel ansteigen. Auf der Glasoberfläche treten außerdem Messfehler auf, die Lücken in der Aufnahme oder Streuungen um die Oberfläche verursachen. Diese Fehler zeigt Abbildung. 4.9. Sie entstehen, wenn der Sensor Merkmale auf der transparenten und spiegelnden Oberfläche nicht feststellt.

Da die Abstände der Scans die Dicke der Kreideschicht überschreiten und Rauschen und Messfehler auftreten, beschichtet man die Oberflächen der Kugeln für die kommenden Aufnahmen.

#### 4.2 Bestimmung der Dicke der Kreideschicht

Die Messungen der Kugeln erfolgen mit einer Beschichtung aus Kreide. Deshalb ist die Dicke dieser für die Auswertung zu berücksichtigen. Die Dicke bestimmt man aus Aufnahmen einer flachen Oberfläche, die gute Messeigenschaften aufweist, mit und ohne Kreidebedeckung. Man befestigt sie an einer bestimmten Position und nimmt einen Abschnitt auf, trägt eine Schicht Kreide auf, ohne die Oberfläche zu bewegen, und wiederholt die Aufnahme. Die Oberfläche sieht man in Abbildung. 4.10 a) ohne Kreide und in b) mit Kreide. Die Aufnahmen für die Berechnung der Dicke erfolgen unter einem senkrechten Einfallswinkel. Die genaue Einstellung des Sensors ist in Abbildung. 4.11 dargestellt. Der Abstand der Punktwolken der beiden Aufnahmen beschreibt die Dicke. Die Distanz ist in Abbildung. 4.12 a) zu sehen, die farbliche Verteilung entspricht den Abständen in Diagramm. 4.12 b). Der mittlere Abstand beträgt hier 0, 163 mm und variiert mit einer Standardabweichung von 0, 025 mm. Die einzelnen Punkte liegen in einem Bereich von 0, 1 mm bis 0, 21 mm. Die stärksten Abweichungen treten hier an den Rändern der Aufnahme auf. In diesen Bereichen nimmt die Dichte der Punkte des Scans ohne Kreide ab,



Abbildung 4.7: Die Abbildung zeigt in a) die Aufnahmeposition des Sensors für eine weitere Aufnahme für die Untersuchung der Kreideschicht. Bild b) stellt die entsprechenden Linienaufnahmen dar. Die farbliche Markierung steht für den Abstand der kreidebedeckten Aufnahme von der Glasoberfläche, entsprechend den Farben in Abbildung. 4.8.

da der Scanner weniger Merkmale erkennt. Die geringere Verteilung der Punkte nimmt Einfluss auf die berechneten Abstände. Außerdem ist es wichtig, wie die Punktwolke des Scans mit Kreideschicht von der Beschaffenheiten der zugrundeliegenden Oberfläche abweicht. Dafür untersucht man die Verteilung innerhalb der Punktwolken beider Scans. Die Vergleichsgrundlage bildet die Schwankungen um eine optimal an die Punkte angepasste Ebene. Die Abweichungen der Punktwolke ohne Kreide sind in 4.13 a) dargestellt. Die farbliche Verteilung entspricht hier den Abständen, die in der Grafik. 4.13 b) markiert sind. Die Ebene spiegelt den Mittelwert der Aufnahme, mit einem mittleren Abstand von 0,000001 mm wieder. Die Abstände schwanken dabei in einem Bereich von -0.16 mm bis 0, 12 mm um diese Ebene. Die Punkte bei der Messung mit Kreide, die Abbildung. 4.14 darstellt, weisen die gleiche Verteilung auf. Auch hier liegt die Ebene mittig mit einem mittleren Abstand von 0,000001 mm und weicht in dem gleichen Bereich von -0, 16 mm bis 0, 12 mm von dieser ab. Die farbliche Verteilung entspricht in beiden Punktwolken den gleichen Abständen. Der Vergleich der beiden Aufnahmen verdeutlicht, dass die Abweichungen an die angepasste Ebene in gleichen Bereichen in gleichem Ausmaß auftreten. Das lässt darauf schließen, dass die Form der zugrundeliegenden Schicht die Abweichung der Punkte innerhalb des Scans verursacht.

#### 4.3 Aufnahmen und Modelle der Glaskugeln

Die Aufnahmen der Kugeln erfolgen, wie in Kapitel. 3 beschrieben, nach einem vorgegebenen Pfad aus linearen Messungen. Aus den Aufnahmen resultieren die Punktwolken, die in Abbildung. 4.15 zu sehen sind. Dabei ist a) die Aufnahme des großen Lampenschirms und b) die



Abbildung 4.8: Die Abbildung ordnet den Punkten des Scans mit Kreide aus Abbildung. 4.7 b), die Abstände von dem ohne Kreide zu.

des kleinen. Beide Punktwolken weisen fehlerhafte Messungen, mit einer Distanz zu den restlichen Messpunkten, auf. Diese entstehen, da der Sensor an den Enden der linearen Abschnitte am Rand seines Messbereiches agiert und der Einfallswinkel des Sensors dort steiler ist. Das, in Kombination mit Reflexionen, die im unteren Bereich durch Spiegelung auf der Oberfläche des Dreibeins, Abbildung. 4.16, auftreten, verursacht fehlerhafte Aufnahmen. Für eine präzise Betrachtung der Geometrie der Glaskörper entfernt man diese Fehler. Die daraus resultierenden, bereinigten Punktwolken zeigt Abbildung. 4.17 a) und b). Sie repräsentieren die gemessenen Oberflächen der Kugeln im Roboter Basiskoordinatensystem. Die Form der Lampenschirme und Unebenheiten der Oberfläche in den Aufnahmen verdeutlicht der Vergleich der Aufnahmen mit Kugeln, die CloudCompare an die Punktwolken anpasst. Der berechnete Radius des großen Lampenschirms von 100,01 mm weist nur geringe Abweichungen zum angegebenen Durchmesser von 200 mm auf. Die mittlere Entfernung der Punktwolke zu der Kugel beträgt -0,023845 mm. Der Mittelpunkt (x; y; z) = (-18, 4788 mm; 1048, 23 mm; 550, 162 mm) repräsentiert somit das Zentrum des Lampenschirms genau. Die Oberfläche weist aber einen ungleichmäßigen Abstand zum Zentrum auf. So variiert der Abstand der Punktwolke zur Oberfläche der Kugel in einem Bereich von -1,35 mm bis +1,00 mm, mit einer Standardabweichung von 0,420 mm. Diese Verteilung ist in Abbildung. 4.18 zu sehen. Hier ist in a) die Punktwolke allein und in b) mit der positionierten Kugel dargestellt. Die farbliche Verteilung entspricht den in den entsprechenden Farben markierten Abständen, die Abbildung. 4.19 darstellt. Die Abstände der Abweichungen sind dabei nicht zufällig über die Oberfläche verteilt, sondern an den Bereich der Kugel gebunden. So sind die Oberseite und Unterseite, nahe an der Halterung, meist näher am Zentrum der Kugel, wohingegen der mittlere Bereich eine höhere Distanz aufweist. Beim kleinen Lampenschirm treten ähnliche Merkmale auf. Der Radius der angepassten Kugel beträgt hier 75, 3171 mm und



Abbildung 4.9: Die Abbildungen zeigen eine Lücke und Verschiebungen der Punkte, die durch Messfehler auf der Glasoberfläche auftreten.

ist damit minimal größer als der Durchmesser von 150 mm. Auch in diesem Fall spiegelt die Kugel die Oberfläche des Lampenschirms im Allgemeinen gut wider. Der mittlere Abstand zwischen den Beiden beträgt -0,009297 mm. Deshalb entspricht die Position des Mittelpunktes, (x; y; z) = (-17, 4842 mm; 1029, 03 mm; 520.239 mm) in den Roboterkoordinaten, der des Zentrum des Lampenschirms. Die Punkte streuen auch hier, mit einer Standardabweichung von 0,344105 mm, um die Oberfläche in einem Bereich von  $\pm 0, 8 \text{ mm}$ . Diese Verteilung ist auch in Abbildung. 4.20 a) ohne Kugel und b) mit Kugel zu sehen und entspricht den Abständen aus Abbildung. 4.21. Die Punktwolke ist wie beim großen Lampenschirm an der Ober- und Unterseite abgeflacht und in der Mitte ausgedehnt.

Die Dicke der Kreideschicht verfälscht beide Modelle. Damit sie näher an der originalen Kugeloberfläche liegen skaliert man sie. Die folgende Formel berechnet den Skalierungsfaktor, x, aus dem entsprechenden Radius der optimal angepassten Kugel,  $r_{opt}$  und der mittleren Kreidedicke,  $d_K$ , aus Kapitel. 4.2:

$$x = \frac{r_{opt} - d_K}{r_{opt}}$$

Die mittlere Kreidedicke beträgt 0, 1631 mm, der Radius des großen Lampenschirms 100, 01 mm und der des kleinen 75, 3171 mm. Mit diesen Werten ergibt die Formel für die große Kugel einen Skalierungsfaktor von  $x_G = 0,99836916$  und für die kleine  $x_K = 0,997835449$ . Die daraus resultierenden kleineren Radien betragen  $r_{Groß} = 99,8469$  mm und  $r_{Klein} = 75,1540$  mm.

Die Aufnahmen der Kugeln unterliegen diversen Abweichungen. Die Ungenauigkeit des Sensors von  $\pm 0,025$  mm aus der Linearität und dem Messbereich in Kapitel. 3, die Abfahrgenauigkeit des Roboters von  $\pm 0,05$  mm, Kapitel. 3, die Standardabweichung der Dicke der Kreideschicht von 0,025 mm, Kapitel. 4.2 und die Kalibrierung des Sensors von  $\pm 0,1$  mm, Kapitel. 2.4.3, beeinflussen die Genauigkeit. Das Gewicht des Sensors in Kombination mit der Halterung von 523 g liegt im unteren Bereich der angegebenen Traglast des Roboters von 16 kg und beeinflusst deshalb die Genauigkeit des Roboters nicht. Der einzige beeinflussbare Faktor von diesen, ist die Unregelmäßigkeit der Kreideschicht. Die anderen Faktoren sind durch die verwendeten Geräte und Verfahren gegeben. Die Punkte unterliegen einer beeinflussbaren Schwankung von  $\pm 0,025$  mm



**Abbildung 4.10:** In der Abbildung sieht man das Messobjekt, in a) ohne Kreide und b) mit Kreide, das man für die Berechnung der durchschnittlichen Kreidedicke verwendet.



Abbildung 4.11: Die Aufnahme zeigt die Position des Scanners über der flachen, für die Aufnahmen der Kreidedicke Berechnung verwendeten Oberfläche.



Abbildung 4.12: Die Darstellung zeigt in a) Die Punktwolke der Aufnahme der mit Kreide bedeckten Platte. Die Färbung stellt dabei den Abstand zu der Aufnahme ohne Kreide dar. Die Farben entsprechen denen des Diagramms in b) dass die Anzahl der Punkte in den jeweiligen Abstandsbereichen zeigt.

und einer unbeeinflussbaren von  $\pm 0,175$  mm. Die Position der Messpunkte schwankt somit um  $\pm 0,2$  mm um die reale Oberfläche. Da man den Radius der optimalen Kugel aus diesen Punkten berechnet besitzt er auch diese Genauigkeit. Außerdem kann verstärktes Rauschen auftreten, da der Sensor nicht immer den gleichen Abstand und senkrechten Winkel zur gemessenen Oberfläche einhält.

Der Vergleich der Durchmesser mit entsprechenden Messungen der Lampenschirme mit einem Messschieber beurteilt die Qualität der Aufnahmen. Der Messschieber bestimmt den Durchmesser entlang verschiedener Linien, die die Halterung an der Unterseite nicht berücksichtigen. Die Messungen für die große Kugel ergeben  $d_{g1} = 199, 6$  mm;  $d_{g2} = 199, 4$  mm;  $d_{g3} = 199, 4$  mm;  $d_{g4} = 199, 5$  mm;  $d_{g5} = 200, 0$  mm. Der daraus berechnete mittlere Durchmesser beträgt  $d_{mGroß} = 199, 58$  mm. Bei der kleinen Kugel ergeben die Messungen  $d_{k1} = 150, 0$  mm;  $d_{k2} = 150, 0$  mm;  $d_{k3} = 150, 0$  mm;  $d_{k4} = 150, 0$  mm;  $d_{k5} = 150, 0$  mm und somit einen mittleren Durchmesser von  $d_{mKlein} = 150, 0$  mm. Die Genauigkeit des Messschiebers beträgt  $\pm 0, 05$  mm.

Anschließend vergleicht man die gemessenen Durchmesser der beiden Messmethoden für beide Lampenschirme. Dafür bestimmt man den Unterschied der Messchiebermessungen zu den Durchmessern der optimal angepassten Kugeln. Aus den Radien berechnet man für den großen Lampenschirm einen Durchmesser von  $d_{Gro\beta} = 199,6928$  mm und für den kleinen  $d_{Klein} =$ 150,3080 mm. Der daraus berechnete Unterschied für die große Kugel ergibt 0,1128 mm. Der Unterschied bei der kleinen beträgt 0,3080 mm. Für den Durchmesser der Kugeln dupliziert man den Radius und somit auch den Fehler. Deshalb beträgt diese für den Durchmesser  $\pm 0,40$  mm. Dementsprechend stimmen die Durchmesser der optimal angepassten Kugeln in ihren Fehlerbereichen mit den Messungen mit dem Messschieber überein. Die Verteilung der Einzelpunkte, die im Bereich von -1,35 mm bis 1 mm um die angepassten Kugeln liegen, überschreitet diesen Fehlerbereich. Da die Verteilung dieser Abweichungen nicht zufällig ist, sondern bei den Aufnahmen der beiden Kugeln das Gleiche Muster aufweist, ist davon auszugehen, dass Unregelmäßigkeiten im Messvorgang die Abweichung verursachen. Aus diesen Ergebnissen kann man schließen, dass



Abbildung 4.13: Die Darstellung zeigt in a) den Scan der Aufnahme ohne Kreide auf einer flachen Oberfläche. Die Farbverteilung stellt die Schwankung der Punkte um eine optimale, an die Punktwolke angepasste, Ebene entsprechend der Färbung des Diagramms in b), dar. Dieses zeigt die Anzahl der Punkte mit dem jeweiligen Abstand.

die angepasste Kugel eine näherungsweise korrekte Repräsentation der eigentlichen Kugel bildet, während die Einzelmessungen stärkeren Schwankungen als der berechneten Abweichung, unterliegen. Die optimal angepassten Kugeln bilden somit die Modelle, die die geringste Abweichung zu den realen Oberflächen aufweisen.



Abbildung 4.14: Die Darstellung zeigt in a) die Punktwolke der mit Kreide beschichteten flachen Oberfläche. Die Farben spiegeln die Verteilung der Punkte um eine optimal angepasste Ebene wider und entsprechen den Farben des Diagramms in b). Dieses stellt die Anzahl der Punkte mit dem jeweiligen Abstand dar.



**Abbildung 4.15:** Die Abbildung zeigt die bereinigten Punktwolken der Aufnahmen des, in a) großen und in b) kleinen Lampenschirms.



Abbildung 4.16: Die drei Bilder zeigen die Reflexion des Lasers von der Kugeloberfläche auf das Dreibein.



**Abbildung 4.17:** In den Abbildungen sieht man die bereinigten Punktwolken des in a) großen und in b) kleinen Lampenschirms.



Abbildung 4.18: In den Abbildungen sieht man die bereinigte Punktwolke des großen Lampenschirms, die farblich in den Abständen zu der optimalen, an die Punktwolke angepassten, Kugel. Die Farbverteilung entspricht der in Abbildung. 4.19. Bild b) zeigt diese optimale Kugel innerhalb der Punktwolke.



Abbildung 4.19: Die Darstellung gibt die Verteilung der Abstände, der Punkte des großen Lampenschirms zu der optimalen Kugel, farblich wider. Diese Punktwolke sieht man in Abbildung. 4.18



Abbildung 4.20: Die Abbildung zeigt die bereinigte Punktwolke des kleinen Lampenschirms mit den farblich dargestellten Abständen zu der optimal in die Punktwolke angepassten Kugel, die in b) innerhalb der Punktwolke liegt. Die farbliche Verteilung entspricht den Abständen in Diagramm. 4.21.



Abbildung 4.21: Die Graphik zeigt die Anzahl der Punkte des kleinen Lampenschirms, mit den jeweiligen Abständen zu der optimalen Kugel, die Abbildung. 4.20 darstellt, mit der entsprechenden Färbung.

### Kapitel 5

### Zusammenfassung und Ausblick

Zielsetzung der Arbeit war die Erstellung von räumlich gebundenen Modellen von Glaskugeln. Dafür hat man diese mit einem an einem Roboterarm montierten Laserscanner vermessen. Aus den aus den Messungen erhaltenen Punktwolken wurden optimale Kugeln bestimmt, die die Oberfläche der Kugeln repräsentieren. Für die Aufnahmen der Kugeln wurde Kreide auf die Oberflächen aufgetragen um Rauschen und Messfehler, die die Glasoberflächen verursachen, zu reduzieren. Die Skalierung der Modelle kompensiert den Einfluss der Kreideschicht auf die Messergebnisse. Die Modelle spiegeln die wahren Ausmaße und Position der Lampenschirme mit einer Genauigkeit von  $\pm 0, 2$  mm wider und stimmen in den Fehlerbereichen mit Referenzmessungen mit einem Messschieber überein. Die verwendete Hardware und der Kalibrierungsalgorithmus verursachen eine Abweichung von  $\pm 0, 175$  mm. Die restliche Schwankung von  $\pm 0, 025$  mm sind der Unregelmäßigkeit der Kreideschicht zuzuordnen.

In Zukunft können zusätzliche Maßnahmen die Qualität der Messungen verbessern. Ein Algorithmus, der den Aufnahmepfad des Roboters plant, sodass der Sensor einen konstanten Abstand und durchgehend senkrechte Winkel zur Oberfläche einhält, vermindert das Messrauschen. Eine Verbesserung des Auftrageverfahrens der Kreideschicht sowie alternative Materialien können Messschwankungen reduzieren. Ein Roboter mit größerem Wirkradius könnte die Vollständigkeit der Messung verbessern, da er Zugang zu größeren Teilen der Oberfläche ermöglicht. Eine Verbesserung der Sensorkalibrierung würde Vorteile schaffen, da diese die Hälfte der auftretenden Abweichungen verursachen. Andere Sensoren oder Verfahren, die Glasobjekte besser vermessen können, vgl. Kapitel. 2.4, bieten eine andere Alternative, die die Messung verbessert. Die Wiederholbarkeit der Positionierung, für erneute Messung oder anderweitige Verwendung der Modelle, ist durch die manuelle Platzierung der Kugel und des Dreibeins beeinflusst. Exakte Wiederholungen würden eigene Befestigungen erfordern, die keine Abweichung zulassen. Mit diesen Maßnahmen würde man Ungenauigkeiten vermindern, Rauschen reduzieren und genaue Wiederholbarkeit ermöglichen und dadurch die Qualität der Modelle Verbessern.

## Anhang A

# **KUKA** Datenblatt







Mounting flange A 6



Traglast / Payload:	16 kg		
Zusatzlast Arm / Schwinge / Karussell Supplementary load on arm / link arm / rotating column:	10 kg / variabel/variable / 20 kg		
Max. Gesamtlast / Total distributed load:	46 kg		
Anzahl der Achsen / Number of axes:	6		
Handvariante / Wrist variant:	Zentralhand 16 kg / In-line wrist 16 kg		
Handvariante / Wrist variant:	Zentralhand 16 kg F/ In-line wrist 16 kg F (foundry)		
Anbauflansch A 6 / Mounting flange A 6:	DIN ISO 9409-1-A50		
Einbaulage / Mounting position:	Boden, Wand, Decke / Floor, wall, ceiling		
Wiederholgenauigkeit (ISO 9283) / Repeatability (ISO 9283):	± 0,05 mm		
Steuerung / Controller:	KR C2		
Gewicht (ohne Steuerung) ca. / Weight (excl. controller) approx .:	235 kg		
Arbeitsraumvolumen / Work envelope volume:	14,5 m <sup>3</sup> <sup>1)</sup>		
Achsdaten / Axis data:	Bereich (Software) / Range (software)	Geschwindigkeit / Speed	
Achse / Axis 1 (A 1) Achse / Axis 2 (A 2) Achse / Axis 3 (A 3) Achse / Axis 4 (A 4) Achse / Axis 5 (A 5) Achse / Axis 6 (A 6)	$\begin{array}{l} \pm 185^{\circ} & 2) \\ + 35^{\circ} / - 155^{\circ} \\ + 154^{\circ} / - 130^{\circ} \\ \pm 580^{\circ} \\ \pm 130^{\circ} \\ \pm 330^{\circ} \\ \pm 350^{\circ} \end{array}$	156°/s 156°/s 156°/s 330°/s 330°/s 615°/s	

1) Bezogen auf Schnittpunkt Achse 4/5. / Referred to intersection of axes 4 and 5.

2) Einschränkung des Bewegungsbereiches bei Wandmontage / Limitation of the range of motion in case of wall mounting

Antriebssystem elektro-mech. mit bürstenlosen AC-Servomotoren. / Drive system electromechanical, with brushless AC servomotors.

• Wegmesssystem digital-absolut. / Position sensing system digital-absolute.

Angaben über die Beschaffenheit und Verwendbarkeit der Produkte stellen keine Zusicherungen von Eigen-schaften dar, sondern dienen lediglich Informationszwecken. Maßgeblich für den Umfang unserer Lieferun-gen und Leistungen ist der jeweilige Vertragsgegenstand. Technische Daten und Abbildungen unverbindlich für Lieferung. Anderungen vorbehalten. Specifications regarding the quality and usability of the products do not constitute a warranty of properties. They are intended to serve informative purposes only. Solely the respective contract of sale shall be binding in respect of the extent of our supplies and services. No liability accepted for errors or omissions.

www.kuka.com

KUKA Roboter GmbH, Germany

0

WM-Nr.841612-70/D+E/6/09.09

### Literaturverzeichnis

- Laser-Linien-Triangulation Micro-Epsilon. https://www.micro-epsilon.de/service/ glossar/Laser-Linien-Triangulation.html,
- [2] Laser-Scanner zur 2D/3D-Profilmessung Micro-Epsilon. https://www.micro-epsilon. de/2D\_3D/laser-scanner/,
- [3] Material Extrusion (FFF) 3D Printing Technology Industrial 3D Printing. https://apiumtec.com/en/material-extrusion-fff-3d-printing,
- [4] scanCONTROL 29xx. https://www.micro-epsilon.de/download/manuals/ man--scanCONTROL-29xx--de.pdf,
- [5] AIMAR, Anna; PALERMO, Augusto; INNOCENTI, Bernardo: The role of 3D printing in medical applications: a state of the art. In: *Journal of healthcare engineering* 2019 (2019)
- [6] ANASTASIOU, Athanasios; TSIRMPAS, Charalambos; ROMPAS, Alexandros; GIOKAS, Kostas; KOUTSOURIS, Dimitris: 3D printing: Basic concepts mathematics and technologies. In: 13th IEEE International Conference on BioInformatics and BioEngineering IEEE, 2013
- [7] ARMSTRONG, Ashley A.; NORATO, Julian; ALLEYNE, Andrew G.; JOHNSON, Amy J W.: Direct process feedback in extrusion-based 3D bioprinting. In: *Biofabrication* 12 (2019), Nr. 1, S. 1–18
- [8] CHALLIS, John H.: A procedure for determining rigid body transformation parameters. In: Journal of biomechanics 28 (1995), Nr. 6, S. 733–737
- [9] GOPINATHAN, Janarthanan; NOH, Insup: Recent trends in bioinks for 3D printing. In: Biomaterials research 22 (2018), Nr. 1, S. 1–15
- [10] IHRKE, Ivo; KUTULAKOS, Kiriakos N.; LENSCH, Hendrik P.; MAGNOR, Marcus; HEIDRICH, Wolfgang: Transparent and specular object reconstruction. In: *Computer graphics forum* Bd. 29 Wiley Online Library, 2010

- [11] IONITA, Ciprian N.; MOKIN, Maxim; VARBLE, Nicole; BEDNAREK, Daniel R.; XIANG, Jianping; SNYDER, Kenneth V.; SIDDIQUI, Adnan H.; LEVY, Elad I.; MENG, Hui; RUDIN, Stephen: Challenges and limitations of patient-specific vascular phantom fabrication using 3D Polyjet printing. In: *Medical Imaging 2014: Biomedical Applications in Molecular, Structural, and Functional Imaging* Bd. 9038 SPIE, 2014
- [12] ISHAK, Ismayuzri; LAROCHELLE, Pierre: Robot arm platform for additive manufacturing: 3D lattice structures. In: 30th Florida Conference on Recent Advances in Robotics, 2017
- [13] LEVOY, Marc; PULLI, Kari; CURLESS, Brian; RUSINKIEWICZ, SZYMON; KOLLER, David; PEREIRA, Lucas; GINZTON, Matt; ANDERSON, Sean; DAVIS, James; GINSBERG, Jeremy u.a.: The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues. In: Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 2000
- [14] LIASHENKO, Ievgenii; HRYNEVICH, Andrei; DALTON, Paul D.: Designing outside the box: Unlocking the geometric freedom of melt electrowriting using microscale layer shifting. In: Advanced Materials 32 (2020), Nr. 28, S. 1–6
- [15] LISKA, Jindrich; VANICEK, Ondrej; CHALUS, Michal: Hand-eye calibration of a laser profile scanner in robotic welding. In: 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) IEEE, 2018
- [16] MALHOTRA, Akash; GUPTA, Kunal; KANT, Kamal: Laser triangulation for 3D profiling of target. In: International Journal of Computer Applications 35 (2011), Nr. 8, S. 47–50
- [17] MALIK, Ms N.; SAINI, Bindu: The Effect and Application of 3D Printing Technology. In: Mukt Shabd Journal 9 (2020), S. 3449–3454
- [18] MASSOT-CAMPOS, Miquel; OLIVER-CODINA, Gabriel: Optical sensors and methods for underwater 3D reconstruction. In: Sensors 15 (2015), Nr. 12, S. 31525–31557
- [19] RANTOSON, Rindra; STOLZ, Christophe; FOFI, David; MERIAUDEAU, Fabrice: Optimization of transparent objects digitization from visible fluorescence ultraviolet induced. In: Optical Engineering 51 (2012), Nr. 3, S. 1–14
- [20] SCHIEBER, Frank: Modeling the appearance of fluorescent colors. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Bd. 45 SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 2001
- [21] SHAHRUBUDIN, Nurhalida; LEE, Te C.; RAMLAN, Rhaizan: An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. In: *Proceedia Manufacturing* 35 (2019), S. 1286–1296

- [22] SUNTORNNOND, Ratima; AN, Jia; CHUA, Chee K.: Roles of support materials in 3D bioprinting-Present and future. In: International Journal of Bioprinting 3 (2017), Nr. 1, S. 1–4
- [23] SWOJAK, Natalia; WIECZOROWSKI, Michał; JAKUBOWICZ, Michał: Assessment of selected metrological properties of laser triangulation sensors. In: *Measurement* 176 (2021), S. 1–27
- [24] TIRYAKI, Mehmet E.; ZHANG, Xu; PHAM, Quang-Cuong: Printing-while-moving: a new paradigm for large-scale robotic 3D Printing. In: 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) IEEE, 2019
- [25] VAN GESTEL, Nick; CUYPERS, Steven; BLEYS, Philip; KRUTH, Jean-Pierre: A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs. In: Optics and lasers in engineering 47 (2009), Nr. 3-4, S. 336–342
- [26] VUKAŠINOVIĆ, Nikola; BRAČUN, Drago; MOŽINA, Janez; DUHOVNIK, Jože: The influence of incident angle, object colour and distance on CNC laser scanning. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 50 (2010), Nr. 1, S. 265–274
- [27] WANG, Qian; TAN, Yi; MEI, Zhongya: Computational methods of acquisition and processing of 3D point cloud data for construction applications. In: Archives of computational methods in engineering 27 (2020), Nr. 2, S. 479–499
- [28] ZHANG, Xu; LI, Mingyang; LIM, Jian H.; WENG, Yiwei; TAY, Yi Wei D.; PHAM, Hung; PHAM, Quang-Cuong: Large-scale 3D printing by a team of mobile robots. In: Automation in Construction 95 (2018), S. 98–106
- [29] ZHANG, Yi; KUMAR, Piyush; LV, Songwei; XIONG, Di; ZHAO, Hongbin; CAI, Zhiqiang; ZHAO, Xiubo: Recent advances in 3D bioprinting of vascularized tissues. In: *Materials & Design* 199 (2021), S. 1–16

# Erklärung

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

Würzburg, März 2022