



INSTITUT FÜR INFORMATIK VII  
ROBOTIK UND TELEMATIK

*Bachelorarbeit*

**Triangulationsbasiertes 3D-Laserscannen  
mit Mediumwechsel**

Lukas Veeh

Dezember 2024

Erstgutachter: Prof. Dr. Andreas Nüchter



## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt das Scannen mit einem Mediumswechsel an einer transparenten Schicht mithilfe eines triangulationsbasierten Laserscanners. Der Mediumswechsel tritt zwischen der Umgebungsluft und Gelatine auf. Gelatine und andere Hydrogele werden häufig bei Bioprinting eingesetzt. Die Kontrolle des Gedruckten ist besonders in der Medizin wichtig. Daher ist die Untersuchung der Oberfläche von Drucken und von Objekten innerhalb von Drucken interessant. Um dies zu untersuchen, wurde ein Legostein in Gelatine eingegossen. Es wurde die Oberfläche der Gelatine gescannt. Um die Genauigkeit der Messung zu überprüfen, wurde die Oberfläche danach mit Babypuder bestäubt und erneut gescannt. Durch die Oberfläche der Gelatine wurde ein Legostein gescannt. Die beim Mediumsübergang zwischen Luft und Gelatine auftretende Brechung wurde mithilfe des Lichtschnittverfahrens korrigiert. Um die Genauigkeit der Korrektur zu bestimmen, wurde der Legostein zuvor ohne Gelatine gescannt. Die Arbeit zeigt, dass das Scannen eines Objekts mit einem Mediumswechsel mit einem triangulationsbasierten Laserscanner möglich ist. Beim Scannen der Gelatine treten zwar mehr Fehler auf, als wenn diese mit Babypuder bestäubt ist, die Ebene liegt aber innerhalb der Standardabweichung des Scans mit Puder. Der durch die Lichtbrechung entstandene Fehler kann mit dem Lichtschnittverfahren korrigiert werden. Der Stein wurde von einer Abweichung von 1,379 mm und 1,940 mm auf 0,018 mm und 0,039 mm korrigiert.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung . . . . .	1
1.2 Aufbau der Arbeit . . . . .	1
<b>2 Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 3D-Bioprinting . . . . .	3
2.2 Snelliussches Brechungsgesetz . . . . .	5
2.3 3D-Scanning . . . . .	7
2.3.1 Aktive Scanner . . . . .	8
2.3.2 Passive Scanner . . . . .	11
2.3.3 Scannen von transparenten Objekten . . . . .	11
<b>3 Aufbau</b>	<b>15</b>
3.1 Laserscanner . . . . .	15
3.2 Versuchsaufbau . . . . .	16
3.3 Punktkorrektur . . . . .	18
<b>4 Auswertung der Experimente</b>	<b>23</b>
4.1 Oberfläche der Gelatine . . . . .	23
4.2 Scan des Legosteins . . . . .	25
<b>5 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>33</b>
5.1 Ausblick . . . . .	34
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>35</b>



# Kapitel 1

## Einleitung

3D-Bioprinting ist eine innovative Technologie im Bereich der Pharmazie und Medizin. Durch 3D-Bioprinting können viele Vorteile in der Medizin erreicht werden. Um die Bioprints verbessern zu können, können 3D-Scans hilfreich sein. Mit diesen kann die Genauigkeit der Drucke erhöht und getestet werden. Beim Bioprinting werden jedoch unter anderem auch transparente Materialien eingesetzt. Durch Reflexionen und Lichtbrechung können beim Scannen transparenter Materialien Fehler auftreten. Deshalb ist es notwendig diese Fehler zu vermeiden und zu korrigieren.

### 1.1 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist es die Anwendung eines triangulationsbasierten Laserscanners beim Scannen transparenter Objekte zu untersuchen. Es wird getestet, ob ein solcher Scanner dafür geeignet ist, die Oberfläche von Gelatine zu erkennen. Der dabei erstellte Scan soll mit einer Referenz verglichen werden, um seine Genauigkeit zu untersuchen. Der Einfluss von sich unter der Oberfläche befindenden Objekten soll dabei berücksichtigt werden.

Außerdem soll das Verhalten des Scanners beim Scannen von Objekten innerhalb der Gelatine betrachtet werden. Die durch die dabei auftretende Lichtbrechung verfälschten Punkte sollen korrigiert und mit einem Scan ohne Gelatine verglichen werden.

### 1.2 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen behandelt, die dieser Arbeit zugrunde liegen. Dabei wird zuerst auf die Grundlagen von 3D-Bioprinting, sowie die Anwendungsmöglichkeiten und Hindernisse bei der Umsetzung weiterer Ziele eingegangen. Danach wird das Snelliussche Brechungsgesetz vorgestellt, das die Brechung von Licht beim Übergang zwischen zwei Medien beschreibt. Anschließend werden unterschiedliche Methoden des 3D-Scannings vorgestellt. Die Besonderheiten beim Scannen von transparenten Objekten werden dabei gesondert ausgearbeitet.

Kapitel 3 widmet sich dem Aufbau des Versuchs. Zuerst wird der verwendete Laserscanner beschrieben. Daraufhin werden die konkreten Versuche und deren Durchführung erläutert. Es werden die Vorbereitung der Scans und die Anwendung des zuvor vorgestellten Laserscanners behandelt. Danach wird die verwendete Methode zur Korrektur von Punkten, die durch die Lichtbrechung verfälscht sind, erörtert.

In Kapitel 4 werden die zuvor durchgeführten Versuche ausgewertet. Dabei werden zuerst die Scans der Gelatineoberfläche verarbeitet und verglichen. Danach wird der Scan des Legosteins durch Gelatine mit einem Scan ohne Gelatine verglichen. Die zuvor vorgestellte Korrektur des Scans wird durchgeführt und ausgewertet.

# Kapitel 2

## Grundlagen

### 2.1 3D-Bioprinting

3D-Bioprinting ist eine vielversprechende Technologie in der Medizin und Pharmazie. Zur Zukunftsvision von gedruckten Organen, die der Organknappheit entgegenwirken, ist es jedoch noch ein großer Schritt. Aber in den vergangenen Jahren hat sich die Technologie weiterentwickelt. Es gibt außerdem weitere aussichtsreiche Einsatzmöglichkeiten, die weniger komplex sind.

Während man komplexe Organe oder stark beanspruchte Gewebe noch nicht drucken kann, sind einfachere Gewebe wie Blutgefäße schon möglich. Das Drucken von Blutgefäßen ist letztendlich für andere Einsätze auch nötig, da diese eine Voraussetzung für die Versorgung der Zellen mit Nährstoffen und Sauerstoff sind.

Ein weiterer Anwendungsbereich ist das Drucken von Haut. Die Regeneration von Haut ist ein wichtiges Feld, da herkömmliche Transplantate nicht ausreichend verfügbar sind. Außerdem kann es bei diesen zu Immunreaktionen kommen. Michael et al. haben in [18] Haut gedruckt und erfolgreich an Mäusen getestet. Dabei bildeten sich sogar kleine Blutgefäße aus, die aber noch nicht ausreichend waren. Jedoch können die gedruckten Hautgewebe nicht alle Funktionalitäten von Haut, wie etwa Haare, nachbilden [9].

Mehrere gedruckte Gewebe wurden schon in Tiere transplantiert. Dem Menschen wurden dagegen noch keine Gewebe transplantiert, da es dafür keine Genehmigungen gibt. Es wurden aber schon nicht-biologische Gewebe, wie zum Beispiel Metalle zum Knochenersatz, 3D-gedruckt und als Implantate beim Menschen verwendet.

Da gedrucktes Gewebe menschliches Gewebe nachahmen kann, kann man es für Medikamententests einsetzen. Außerdem ist für den Einsatz bei Medikamententests keine Genehmigung notwendig. Somit kann man Medikamententests nahe am tatsächlichen Einsatz und ohne Risiko für Testpersonen oder Tiere durchführen. Außerdem kann man das Medikament gezielt am Einsatzort testen, indem man nur das zu behandelnde Gewebe druckt und die Medikamente beim Drucken präzise platziert. Die Tests sind auf kleinem Raum in großer Stückzahl druckbar, wodurch ein hoher Durchsatz möglich ist. In der Krebsforschung wird versucht gezielt Krebszellen

zu drucken. Anhand der gedruckten Zellen kann man dabei die Bewegung der Zelle oder das Ausbilden von Metastasen beobachten [23].

Bei 3D-Bioprinting wird Biotinte verwendet, um daraus ein dreidimensionales biologisches Konstrukt zu erzeugen [23]. Biotinten sind das Material, mit dem gedruckt wird. Sie bestehen aus lebenden Zellen und Biomaterialien. Durch den Einsatz unterschiedlicher Biotinten kann man verschiedene Eigenschaften des letztendlichen Produkts erhalten. Biotinten kann man in gerüstbasierte und gerüstlose einteilen. Bei gerüstbasierten Tinten werden die Zellen in ein Material eingebettet, dass die Struktur für den Druck vorgibt. Ohne ein solches Gerüst werden die Zellen so gedruckt, dass sie später selbst die Struktur und Stabilität ausbilden. Als Gerüst werden meistens Hydrogele verwendet. Hydrogele bestehen aus Stoffen, die viel Wasser binden können und in Verbindung damit eine feste Struktur bilden. Beispiele dafür sind Gelatine, Alginat oder Collagen.

Um ein dreidimensionales Konstrukt zu erstellen, verwenden Bioprinter verschiedene Techniken, die man in extrusionsbasierte, laserbasierte und tröpfchenbasierte Techniken einteilen kann.

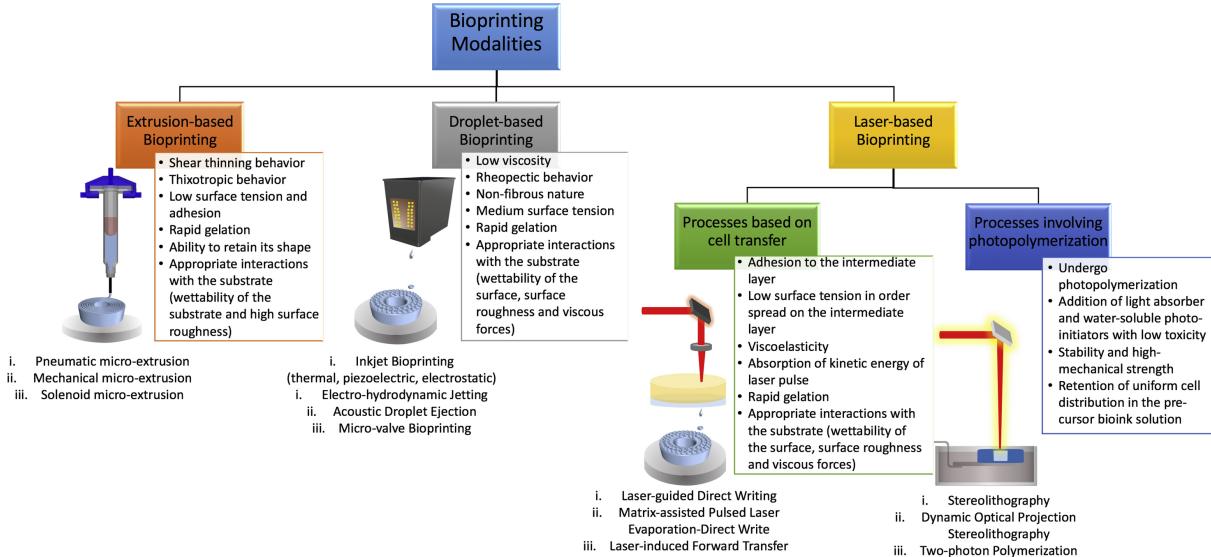
*Extrusionsbasierte Techniken* sind die simpelste und kostengünstigste Technologie. Sie drucken, indem die Biotinte schichtweise durch eine Düse aufgetragen wird. Die Technik ist für viele Biotinten anwendbar, erlaubt jedoch keine hohe Genauigkeit und ist langsam.

*Tröpfchenbasierte Techniken* funktionieren ähnlich wie handelsübliche Tintenstrahldrucker. Sie tragen die Biotinte tröpfchenweise auf. Durch Kontrolle und Aussortieren von Tröpfchen kann man sicherstellen, dass sich eine gewünschte biologische Zelle in einem Tropfen befindet. Dadurch kann man anders als bei Extrusion die Verteilung der Zellen genauer festlegen. Beim Drucken mehrerer Proben nebeneinander kann es jedoch durch die Tröpfchen zu Kreuzkontamination kommen.

*Laserbasierte Techniken* werden seltener genutzt, da sie teurer und arbeitsintensiver sind. Eine Möglichkeit ist es das Biomaterial mit einem Laser gezielt zu verfestigen. Diesen Vorgang nennt man Photopolymerisation. Das ist ähnlich wie bei handelsüblichen SLA-Druckern. Eine weitere Möglichkeit ist es, die Zellen mithilfe eines Lasers zu bewegen, um damit die gewünschte Form zu erreichen. Außerdem kann man Laser einsetzen, um Tröpfchen aus einer Zwischenschicht zu lösen, die dann an der gewünschten Stelle heruntertropfen. Die Genauigkeit der Methode ist hoch. Da die Biotinte nicht durch eine Düse ausgegeben werden muss, werden die Zellen in der Biotinte weniger beansprucht.

Ein Problem beim Bioprinting ist die fehlende Autonomie. Denn anders als beim konventionellen 3D-Druck sind die verwendeten Materialien weder vor, noch nach dem Druck stabil. Die Biotinten sind nach dem Druck nicht starr, sondern immer noch flexibel. Durch leichte Verformungen während des Druckens können daher Fehler entstehen, die sich, wenn die Biotinte nach einem fest vorgegebenen Pfad aufgetragen wird, summieren können. Außerdem verändern sich ihre Eigenschaften mit der Zeit, sich ändernder Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit. Durch diese Fehler ist das Anpassen des Druckpfades und der Druckparameter während des Druckens nötig.

Armstrong et al. haben eine solche direkte Prozesskontrolle entwickelt [4]. Verwendet wurde ein extrusionsbasierter 3D-Bioprinter. Gedruckt wurde Calciumphosphatkemik für die Anwendung zur Knochenreparatur und Regeneration. Am Druckkopf des Druckers wurde ein 2D-



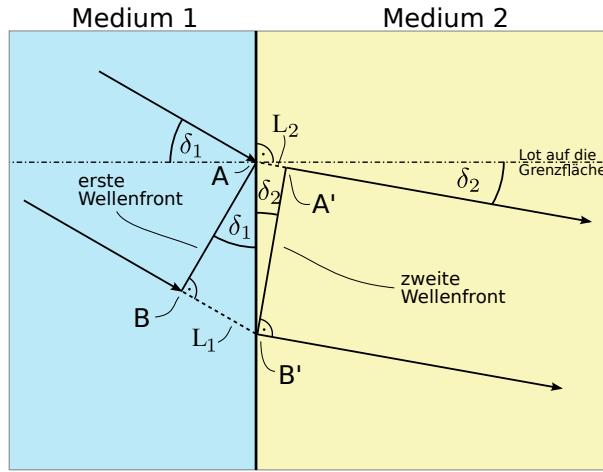
**Abbildung 2.1:** Schema der verschiedenen Arten von Bioprintern [23]. Links sieht man das extrusionsbasierte Drucken. In der Mitte sieht man das tröpfchenbasierte Drucken. Das laserbasierte Drucken ist rechts in Zelltransfer und Photopolymerisation eingeteilt. Beim Zelltransfer sieht man das Prinzip, bei dem mithilfe eines Lasers Tröpfchen erzeugt werden. Daneben ist veranschaulicht, wie Biotinte mit Photopolymerisation verfestigt wird.

Laserlinienscanner angebracht, um das Gedruckte Schicht für Schicht zu scannen. Der Scan wurde analysiert und mit dem geplanten Modell verglichen. Anhand des Fehlers wurde der weitere Pfad des Druckers angepasst. Dadurch erreichten sie eine höhere Präzision.

Bei dieser Methode kann aber nur die Oberfläche des Gedruckten aufgenommen werden. Deshalb nutzen Yang et al. Optische Kohärenztomographie (OCT) um das Gedruckte zu scannen [27]. Dadurch können sie mehrere Millimeter in den Druck hinein scannen. Sie scannen ebenso nach jeder aufgetragenen Schicht und fügen die einzelnen Scans zu einem 3D-Modell zusammen. Das Modell wird danach mit einem Micro-CT Scan verglichen, um die Genauigkeit des OCT-Scans zu überprüfen. Micro-CT kann man aber nicht während des Drucks einsetzen. Der Einsatz von Röntgenstrahlung beim Micro-CT erfordert außerdem den Einsatz von Abschirmungen. Bei lebenden Zellen kann es deshalb nicht angewendet werden. Der Vorteil von OCT ist, dass auch Unregelmäßigkeiten innerhalb des Materials gemessen werden.

## 2.2 Snelliussches Brechungsgesetz

Beim Übergang einer Welle zwischen zwei Medien wird diese an der Grenzfläche gebrochen. Ausgelöst wird die Brechung durch die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle in den beiden Medien. Nach dem Huygenschen Prinzip gilt, dass von jedem Punkt einer Wellenfront eine neue Elementarwelle ausgeht [16]. Die Überlagerung dieser Elementarwellen bildet wiederum eine neue Wellenfront. Wenn man dieses Prinzip auf die Grenzfläche zwischen zwei Medien anwendet, erhält man die in Abbildung 2.2 dargestellten Wellenfronten. Da  $L_i$  die Wellenlänge



**Abbildung 2.2:** Darstellung der Wellenfronten beim Übergang zwischen zwei Medien [2].

im jeweiligen Medium ist, lässt sich diese aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium  $c_i$  und der Periode der Welle T darstellen. Die Periode ist dabei in beiden Medien gleich. Wenn man die beiden aus Wellenlänge, Wellenfront und Grenzfläche gebildeten Dreiecke jeweils mit dem Sinussatz beschreibt, erhält man:

$$\sin \delta_1 = \frac{L_1}{|AB'|} = \frac{c_1 \cdot T}{|AB'|} \quad (2.1)$$

$$\sin \delta_2 = \frac{L_2}{|AB'|} = \frac{c_2 \cdot T}{|AB'|} \quad (2.2)$$

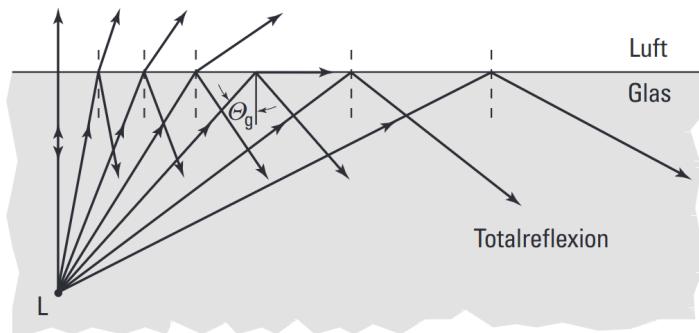
Durch Teilen der beiden Gleichungen kürzen sich Periode und Grenzfläche und man erhält das Snelliussche Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin \delta_1}{\sin \delta_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.3)$$

Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit in allen Stoffen kleiner ist als im Vakuum, ist der Brechungsindex  $n_{Medium}$  eines Mediums das Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum c und im Medium  $c_{Medium}$ :

$$n_{Medium} = \frac{c}{c_{Medium}} \quad (2.4)$$

Ein Medium nennt man optisch dichter als ein anderes, wenn sein Brechungsindex größer ist. Beim Übergang einer Welle von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium wird diese vom Lot weg gebrochen. Dies sieht man in Abbildung 2.3 am Beispiel vom Übergang von Glas in Luft, wobei Glas optisch dichter als Luft ist. Deshalb kann es passieren, dass ab einem Einfallwinkel  $\Theta_g$  der Brechungswinkel laut dem Brechungsgesetz  $90^\circ$  beträgt und entlang der Grenzfläche gebrochen wird. Für Einfallwinkel  $\Theta > \Theta_g$  kann man den Ausfallwinkel nicht reell mit dem Brechungsgesetz (2.3) berechnen. Den Winkel  $\Theta_g$  nennt man Grenzwinkel der Totalreflexion, da die Welle für alle Einfallwinkel  $\Theta > \Theta_g$  nicht in das optisch dünneren Medium eintritt,



**Abbildung 2.3:** Beispiel für das Verhalten, wenn Licht aus einem Medium mit höherer optischen Dichte (Glas) auf ein Medium mit geringerer optischen Dichte (Luft) trifft [24].

sondern vollkommen reflektiert wird. Den Grenzwinkel  $\Theta_g$  kann man mithilfe des Snelliusschen Brechungsgesetzes berechnen, indem man für den Brechungswinkel  $\delta_2 = 90^\circ$  einsetzt:

$$\sin \Theta_g = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.5)$$

Das Snelliussche Brechungsgesetz gilt somit nur für  $\Theta \leq \Theta_g$ .

## 2.3 3D-Scanning

Um die Gestalt eines physikalischen Objekts in der digitalen Welt zu repräsentieren, verwendet man 3D-Scanner. Zusätzlich zu den zweidimensionalen Bildern einer Kamera benötigt man dafür noch die Tiefeninformationen des Objekts. In sogenannten Punktwolken werden die Koordinaten vieler einzelner Punkte auf der Oberfläche des Messobjekts zusammengefasst. Die Oberfläche des Objekts kann durch das Verbinden der Punkte zu Polygonen, meist Dreiecken, dargestellt werden.

Die ersten Techniken zum Erlangen von 3D-Informationen wurden durch Berührung mit dem Messobjekt realisiert, waren also taktil. Dabei wird ein Messkopf, der sich an einem Messarm befindet, in Kontakt mit dem Messobjekt gebracht. Wenn man nun die X-, Y- und Z-Koordinaten des Messkopfs speichert, erhält man einen Punkt auf der Oberfläche des Messobjekts. Durch mehrmaliges Wiederholen an unterschiedlichen Stellen des Objekts erhält man eine Punktwolke als digitale Repräsentation. Der Messkopf kann dabei entweder manuell oder computergesteuert an das Messobjekt gefahren werden. Koordinatenmessgeräte sind oft wie in Abbildung 2.4 in Portalbauweise ausgeführt, da die Achsen des Messgeräts die kartesischen Koordinaten vorgeben. Taktile Messgeräte sind sehr genau, aber durch eine begrenzte Abtastrate langsam. Für empfindliche oder verformbare Messobjekte sind taktile Sensoren nicht geeignet und man kann nur kontaktlose Techniken einsetzen. Dadurch kann das Messobjekt weder beschädigt werden, noch können die Messwerte durch Verformung verfälscht werden. Kontaktlose Scanner kann man in aktive und passive Scanner einteilen. Passive Methoden greifen nicht in das Messobjekt ein und benötigen Umgebungslicht oder andere Umgebungsstrahlung um das Objekt zu detek-



**Abbildung 2.4:** Ein Koordinatenmessgerät in Portalbauweise [1].

tierten. Aktive Methoden hingegen verwenden Laser oder andere Wellen um das Messobjekt abzutasten.

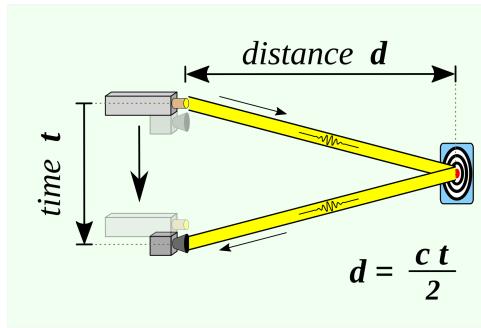
### 2.3.1 Aktive Scanner

Aktive Methoden nutzen meistens Licht, können aber auch andere Strahlung wie Ultraschall oder Röntgenstrahlung einsetzen, um das Messobjekt zu bestimmen. Die reflektierte Strahlung wird analysiert, um das Messobjekt zu rekonstruieren. Aktive Techniken kann man in Time of Flight, Phasenverschiebung und Triangulation einteilen.

#### Time of Flight

Time of Flight macht sich die Flugzeit der ausgesendeten Strahlung zunutze. Dabei sendet der Scanner eine elektromagnetische Welle oder Schallwelle aus. Diese Welle wird vom Messobjekt reflektiert und vom Scanner detektiert. Aus der gemessenen Umlaufzeit kann man mithilfe der Ausbreitungsgeschwindigkeit den Abstand von Messobjekt und Scanner bestimmen. In Abbildung 2.5 sieht man eine schematische Darstellung des Time-of-Flight-Prinzips. Die Distanz  $d$  wird aus der Umlaufzeit  $t$  und Lichtgeschwindigkeit  $c$  berechnet, indem die gesamte von der Welle zurückgelegte Strecke halbiert wird.

Ein Beispiel für Time of Flight sind LIDAR-Systeme, die häufig in der Vermessung angewandt werden. LIDAR-Systeme verwenden Licht im für den Menschen unsichtbaren Spektrum. Mithilfe eines Lasers wird ein Punkt in der Umgebung bestrahlt und die Zeit gemessen, bis der reflektierte



**Abbildung 2.5:** Funktionsweise eines 3D-Scanners mit Time Of Flight einer elektromagnetischen Welle [3].

Strahl detektiert wird. Um mehrere Punkte messen zu können, wird meistens ein sich drehender Spiegel eingesetzt oder der gesamte Aufbau gedreht. LIDAR hat eine Reichweite von mehreren Kilometern und kann durch die große Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts 10.000 bis 100.000 Punkte pro Sekunde aufnehmen [7]. Die Genauigkeit der Zeitmessung ist entscheidend für die Genauigkeit der Messung, da Licht nur etwa 3,3 Picosekunden benötigt, um sich einen Millimeter auszubreiten. Daher werden typischerweise Genauigkeiten im Millimeterbereich erreicht. Bei nur teilweise reflektierenden Objekten wie Büschchen kann es dazu kommen, dass ein Teil des Lichts erst innerhalb des Objekts reflektiert wird. Da der Mittelwert des empfangenen Lichts verwendet wird, um die Oberfläche zu bestimmen, führt das zu Fehlern bei solchen Objekten.

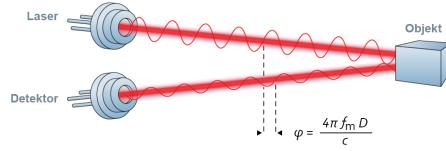
### Phasenverschiebung

Um die Entfernung anhand der Phasenverschiebung zu messen, wird ein modulierter Strahl auf das Objekt geworfen. Der vom Objekt reflektierte Strahl wird vom Scanner detektiert. Durch den Vergleich der ausgesendeten und empfangenen Strahlen kann man die Phasenverschiebung bestimmen. Die Funktionsweise ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

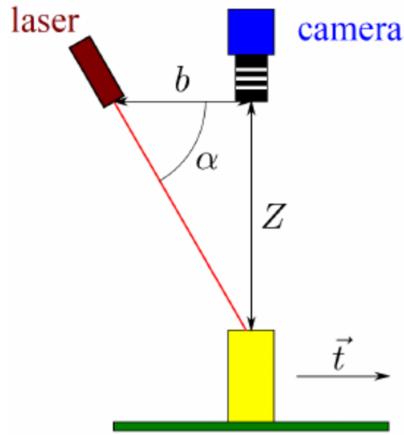
Die Formel für die Phasenverschiebung  $\varphi$  ergibt sich aus der allgemeinen Formel für den Phasenwinkel  $\varphi$  [15]. In der allgemeinen Formel ist  $t$  die Ausbreitungszeit der Strahlung, die hier die Umlaufzeit vom Sender zum Detektor ist. Die Modulationsfrequenz  $f_m$  gibt an, wie sich die Amplitude des ausgesendeten Lichts ändert. Der Abstand  $D$  zum Objekt ergibt sich nun aus der Lichtgeschwindigkeit  $c$  und der doppelten Umlaufzeit  $t$ . Somit kann der Phasenabstand wie folgt berechnet werden:

$$\varphi = 2\pi f_m t = 2\pi f_m \frac{2D}{c} = \frac{4\pi f_m D}{c} \quad (2.6)$$

Begrenzt wird die Reichweite des Scanners durch die halbe Wellenlänge der Modulationsfrequenz, da sonst der Phasenabstand nicht bestimmt werden kann. Die Genauigkeit nimmt bei höherer Frequenz zu. Der Scanner wird zwar mit höherer Frequenz genauer, aber die Reichweite wird kleiner. Mithilfe der Phasenverschiebung lassen sich Ergebnisse im Millimeter- bis Submillimeterbereich erzielen. Die Messfrequenz beträgt mehrere Megahertz. Es sind Distanzen von unter 100 m möglich [12]. Im Vergleich zu Scannern, die Time of Flight nutzen, sind diese Scanner also schneller und genauer, aber haben eine niedrigere Reichweite.



**Abbildung 2.6:** Darstellung der Phasenverschiebung zwischen Scanner und Messobjekt [12].



**Abbildung 2.7:** Darstellung der Triangulation zwischen Kamera, Laser und Messobjekt [22].

## Triangulation

Bei triangulationsbasierten Scannern wird das Messobjekt mit einem Laser beleuchtet und mit einer Kamera analysiert. Das Kamerabild wird analysiert, um den Winkel des reflektierten Lasers zu bestimmen. Dabei bilden Kamera, Laser und der inspizierte Punkt auf dem Messobjekt ein Dreieck. Den Aufbau kann man in Abbildung 2.7 sehen. Um den Abstand Z von Kamera und Objekt zu bestimmen, kann man nun trigonometrische Formeln anwenden. Der Abstand zwischen Kamera und Laser b ist bekannt. Der Winkel  $\alpha$  ergibt sich aus der Neigung des Lasers und dem mit der Kamera bestimmten Winkel des reflektierten Laserstrahls. Z lässt sich nun durch den Tangenssatz mit  $Z = \tan \alpha \cdot b$  berechnen.

Oft wird statt einem punktuellen Laser eine Laserlinie verwendet, sodass man mehrere Punkte gleichzeitig aufnehmen und somit den Scan beschleunigen kann. Mit der Laserlinie erhält man ein Profil des Objekts.

Da der Abstand zwischen Kamera und Laser sich direkt auf die Genauigkeit der Entfernung auswirkt haben diese Scanner eine begrenzte Reichweite. Die Scanner haben eine hohe Genauigkeit im Bereich von  $10\mu m$  und eine Reichweite von ein paar Metern [7].

### 2.3.2 Passive Scanner

Passive Scanner bestrahlen das Objekt nicht, sondern arbeiten mit der vom Messobjekt reflektierten Umgebungsstrahlung. Zwei dafür eingesetzte Techniken sind 'Stereo' und 'Structure from motion'.

#### Stereo

Stereokameras funktionieren nach dem Prinzip der Triangulation. Sie bestehen meistens aus zwei Kameras, die das Messobjekt von zwei verschiedenen Positionen aus fotografieren. Es sind aber auch mehr als zwei Kameras möglich. Die Position und Ausrichtung der Kameras zueinander ist bekannt.

Grundsätzlich gleicht der Aufbau dem menschlichen Sehen. Durch zwei Augen können Menschen Tiefe wahrnehmen, indem sie beide Augen auf einen Punkt in der Umgebung fokussieren. Genauso müssen Stereokameras bestimmte Merkmale auf dem Messobjekt in beiden Kamerabildern erkennen können. Diese Merkmale können entweder manuell auf beiden Bildern markiert werden oder automatisch bestimmt werden. Die Tiefe erhält man, indem man die Position des Merkmals auf beiden Bildern vergleicht. Der Punkt auf dem Objekt und die beiden Kameras bilden ein Dreieck, sodass sich die Entfernung wie bei triangulationsbasierten aktiven Scannern berechnen lässt.

Dadurch, dass viele Merkmale gleichzeitig gemessen werden können, ist Stereovision sehr schnell. Ohne besondere Merkmale in der Umgebung, wie zum Beispiel bei einer weißen Wand, kann man Stereovision allerdings nicht anwenden. Die Genauigkeit der Messungen hängt von der Genauigkeit ab, mit der die Merkmale erkannt werden.

#### Structure from motion

Wenn man nur eine Kamera zur Verfügung hat, ist es auch möglich diese zu bewegen, um von verschiedenen Positionen Bilder aufzunehmen. Diese Bilder kann man zum Beispiel erhalten, indem man ein Video des Objekts aufnimmt. Anders als bei Stereokameras ist aber die relative Position der Kamera bei der Aufnahme der Bilder nicht bekannt. Um Punkte auf dem Messobjekt bestimmen zu können, muss also zuerst der Kamerapfad durch Abgleichen der Bilder bestimmt werden. Sind die Positionen der Kamera bei einem Bild bestimmt, verläuft die Punkterzeugung analog zu Stereokameras.

Um Structure from motion anwenden zu können, ist anders als bei den anderen genannten Methoden keine spezielle Hardware nötig. Es genügt zum Beispiel die Kamera eines Smartphones und die spätere Verwertung der Frames einer Videoaufnahme.

### 2.3.3 Scannen von transparenten Objekten

Herkömmliche Laserscanner sind darauf ausgelegt, dass der ausgesendete Laser diffus reflektiert wird. Das bedeutet, dass einfallendes Licht gleichmäßig in alle Richtungen reflektiert wird. Dies tritt aber nicht bei allen Materialien auf. Bei transparenten Objekten wie Glas wird ein Teil der Strahlung im Objekt gebrochen und ein anderer Teil wird gespiegelt. Die Spiegelung sorgt dafür, dass ein angestrahltes Objekt nur aus dem Blickwinkel, in dem das Licht reflektiert wird,

wahrgenommen werden kann. Die Strahlung, die in das Material eindringt, kann in diesem wiederum reflektiert werden. Durch Brechung kann sich außerdem der Pfad des Strahls ändern [11].

Das Scannen von lichtdurchlässigen Objekten ist deshalb aufwendiger, als von Objekten mit diffus reflektierenden Oberflächen. Die einfachste Methode ist die Beschichtung des transparenten Objekts [17]. Dabei wird das Objekt mit einer dünnen Schicht umhüllt die den Laser diffus reflektiert. Diese Schicht kann aus unterschiedlichen Materialien bestehen, die nach dem Scan meist abwaschbar sind. Dadurch kann man das Objekt mit konventionellen Scannern scannen. Nach Abzug der bekannten Schichtdicke erhält man die Maße des Objekts. Die Genauigkeit der Methode hängt von der Gleichmäßigkeit und Dicke der aufgetragenen Schicht ab. Außerdem könnten manche Objekte durch die Beschichtung beschädigt werden.

Es gibt Methoden, bei denen das reflektierte Licht analysiert wird. Dabei gibt es unterschiedliche Ansätze, um an der Oberfläche reflektiertes und innerhalb des Objekts reflektiertes Licht zu unterscheiden [17].

Außerdem gibt es Methoden, bei denen das Licht, das das Objekt durchdrungen hat, analysiert wird. Dabei wird zum Beispiel ein bekanntes Muster hinter dem Objekt platziert. Durch Brechung an der Oberfläche des transparenten Objekts wird dieses Muster verzerrt aufgezeichnet. Dies wird nur bei einfachen Objekten, die zum Beispiel keine Hohlräume haben, angewendet. Die Methoden sind rechnerisch anspruchsvoll [17].

Ein weiterer Ansatz zum Scannen von brechenden Materialien ist das Aufheben der Brechung. Dies geschieht, indem das Objekt in eine Flüssigkeit eingetaucht wird, die denselben Brechungsindex hat. Dadurch findet nach dem Brechungsgesetz keine Brechung mehr statt. Nun kann man entweder die Absorption des Objekts nutzen oder durch Färben der Flüssigkeit einen Kontrast erzeugen. Diese Flüssigkeiten sind aber normalerweise giftig und die Methode daher umständlich [11].

Man kann auch andere elektromagnetische Wellen als sichtbares Licht nutzen. Denn transparente Objekte haben nicht bei jeder Wellenlänge die gleichen Eigenschaften. Hohe Infrarotstrahlung wird von Glas stärker absorbiert als transmittiert. Durch die absorbierte Strahlung wird das Objekt erwärmt und strahlt dadurch wiederum Infrarotstrahlung ab. Daher wird die Methode auch als 'Scanning from heating' bezeichnet [8]. Wenn man nun bestimmte Stellen des Objekts mit einem Infrarotlaser erwärmt und später mit einer Wärmebildkamera aufnimmt, kann man mit dem Prinzip eines Laserscanners im sichtbaren Bereich die Oberfläche des transparenten Objekts bestimmen.

Durch tiefe UV-Strahlung kann man an der Oberfläche von Glas Fluoreszenz hervorrufen. Das bedeutet, dass durch die niedrige Wellenlänge des UV-Lichts elektromagnetische Wellen mit einer höheren Wellenlänge erzeugt werden. Diese sichtbare Strahlung kann nun von einer gewöhnlichen Kamera aufgezeichnet werden. Wenn man nun einen UV-Laser verwendet, leuchtet die angestrahlte Stelle des Glases im sichtbaren Bereich. Rantoson et al. haben diese Methode angewendet, um mit einem Laserlinienscanner verschiedene transparente Objekte zu scannen [25].

Außerdem kann man sich zunutze machen, dass UV-Licht absorbiert wird. So haben Koyama

et al. eine Methode entwickelt, bei der eine UV-LED und UV-Kamera verwendet werden [14]. Dabei wird das Objekt zwischen LED und Kamera platziert. Da es das UV Licht absorbiert, wird seine Silhouette von der Kamera aufgezeichnet. Durch Drehen des Objekts werden mehrere Bilder aufgenommen und daraus die Oberfläche des Objekts bestimmt.



# Kapitel 3

## Aufbau

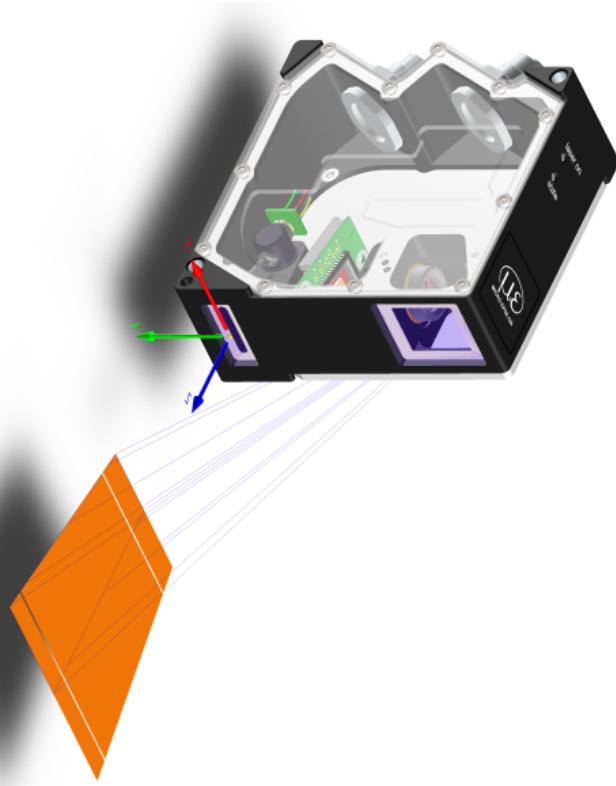
### 3.1 Laserscanner

Verwendet wurde der Laserscanner scanCONTROL 2900-25. Dabei handelt es sich um einen Laserlinientriangulationssensor von MICRO-EPSILON. Er verfügt über einen roten Halbleiterlaser mit einer Wellenlänge von 659 nm. Mit einer Linien-Optik wird eine Laserlinie mit einem Öffnungswinkel von 20° auf das Messobjekt projiziert. Die Auswertung funktioniert Grundsätzlich wie die Triangulation eines einzelnen Laserpunktes, es werden aber mehrere Punkte auf der Linie berechnet.

In Abbildung 3.1 sieht man den Aufbau eines Scanners der 29x0-Serie, sowie das verwendete Sensorkoordinatensystem. Die z-Achse liegt in der Laserebene und hat ihren Ursprung an der Unterkante des Sensors. Der Sensor hat einen Messbereich von 53,5 mm bis 78,5 mm in z-Richtung, also eine Messbereichshöhe von 25 mm. Dabei hat er eine Referenzauflösung von  $2\mu m$ . Die x-Achse verläuft entlang der Laserlinie. Sie wird mit 1280 Punkten pro Profil aufgelöst. Am Messbereichsanfang ist der Messbereich 23,4 mm und am Messbereichsende 29,1 mm breit. Die Profile werden Standardmäßig mit einer Profilfrequenz von 300 Hz abgerufen [19].

Ein CCD-Element erkennt das Licht der von einem Objekt reflektierten Laserlinie. Würde man die Linie mit einer normalen Kamera aufnehmen, würde man entlang der z-Achse unterschiedlich scharfe Ergebnisse erhalten, da die Kamera schräg zur Laserebene positioniert ist. Deshalb ist die Matrix des Sensors nach der Scheimpflug-Bedingung relativ zur Objektivebene gekippt. Dadurch ist die Bildebene nicht parallel zur Objektivebene, sondern ist wie in Abbildung 3.2 gekippt. Im Scanner ist die Sensormatrix so platziert, dass sich die Bildebene in der Laserebene befindet. Dies gewährleistet, dass die Bildschärfe in der Laserebene gleichbleibend ist. Des Weiteren verfügt der Sensor über einen globalen Verschluss (Shutter), sodass die gesamte Matrix gleichzeitig belichtet wird. Besonders beim Scannen von sich schnell bewegenden Messobjekten verhindert dies, dass derselbe Punkt des Messobjekts mehrmals von der Video-Matrix detektiert wird. Der Sensor wertet die aufgenommenen Bilder selbst aus, und gibt die Punkte des jeweiligen Profils aus.

Mithilfe des Programms 'scanCONTROL configuration Tools' kann man den Laserscanner konfigurieren [20]. Über Ethernet werden die aktuellen Profildaten vom Scanner zum Programm



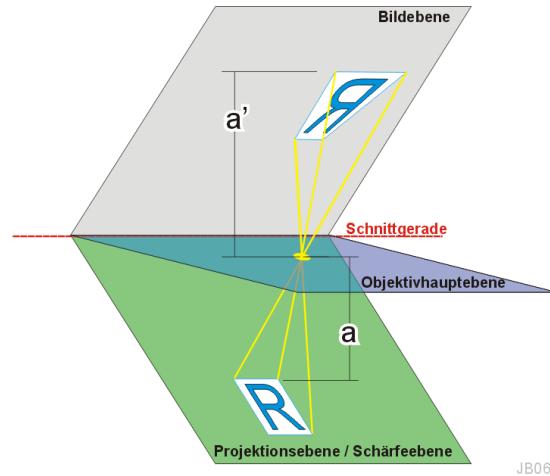
**Abbildung 3.1:** Ein Laserscanner der 29x0-Reihe von MICRO-EPSILON [21].

übertragen. Die aufgenommene Bildmatrix und das daraus resultierende Profil werden live dargestellt. Dabei kann man den Messbereich des Sensors und seine Belichtungszeit einstellen. Außerdem kann man die Parameter für die Bestimmung des Profils anhand der von der Sensormatrix aufgenommenen Bilder festlegen.

Da der Scanner selbst nur zweidimensional Punkte bestimmen kann, ist er an einem Roboterarm befestigt. Der KUKA KR 16 ist ein Roboter mit 6 Achsen, die mit bürstenlosen AC-Servomotoren angetrieben werden. Damit erreicht er eine Wiederholgenauigkeit von 0,05 mm [10]. Er bewegt den Scanner entlang dessen y-Achse, um aus mehreren Profilen eine dreidimensionale Punktwolke zu erstellen. Die Punkte im Weltkoordinatensystem werden aus der Pose des Roboters und dem Punkt im Sensorkoordinatensystem berechnet. Anschließend werden die Punkte im ASCII-Format gespeichert.

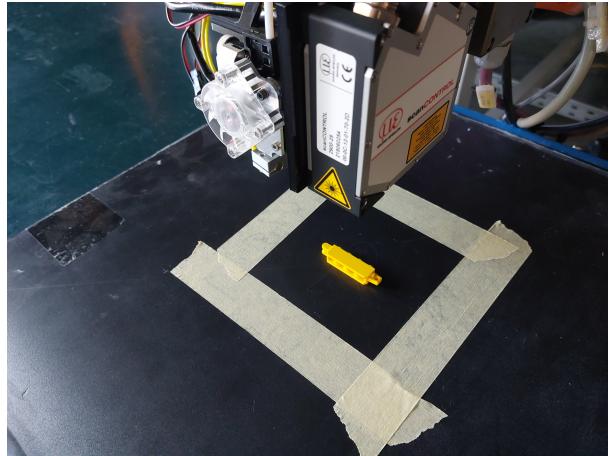
### 3.2 Versuchsaufbau

Um das Verhalten eines Laserscanners beim Scannen durch zwei Medien zu untersuchen, wurde ein Legostein zweimal gescannt. Als zweites optisches Medium neben der Umgebungsluft wurde



**Abbildung 3.2:** Darstellung der Scheimpflug-Bedingung [6].

Gelatine verwendet. Der Legostein wurde dabei zuerst ohne Gelatine mit dem in Abschnitt 3.1 beschriebenen Laserscanner gescannt. Um die Messung mit und ohne Gelatine vergleichen zu können wurde der Stein in eine Petrischale geklebt. Die dazu verwendete Klebeknete kann nach dem Versuch wieder rückstandslos entfernt werden. Die Position der Petrischale wurde, wie in Abbildung 3.4 zu sehen ist, markiert. Der Pfad des Scanners wurde manuell eingefahren und gespeichert, um ihn für weitere Scans wiederholen zu können. Gescannt wurde der Legostein von oben, sodass sich nur die Oberfläche des Steins im Messbereich des Scanners befand. Zuerst wurde der eingeklebte Stein gescannt. Danach wurde der Stein in der Petrischale mit Gelatine eingegossen. Verwendet wurde handelsübliche Gelatine, die in einer Konzentration von etwa 2 % mit Leitungswasser zubereitet wurde. Das Aushärten dauert mehrere Stunden, daher wurde die Petrischale über Nacht abseits des Scanners abgestellt. Nachdem die Gelatine ausgehärtet war, wurde die Schale wieder an der markierten Stelle platziert. In diesem, in Abbildung 3.5 zu sehenden, Aufbau wurden nun sowohl die Oberfläche der Gelatine, als auch der Legostein gescannt. Dazu wurde der zuvor verwendete Pfad verwendet. Mithilfe von scanCONTROL Configuration Tools wurde der Scanner für die einzelnen Scans eingestellt, da zum Beispiel für die Aufnahme der Oberfläche eine längere Belichtungszeit nötig ist. Somit wurden nun zwei Scans mit der jeweiligen Konfiguration für die Oberfläche und den eingegossenen Legostein durchgeführt. Da beim Scannen von transparenten Oberflächen große Fehler auftreten können, wurde die Oberfläche der Gelatine noch auf eine zweite Weise bestimmt. Dazu wurde die Oberfläche wie in Abbildung 3.6 mit Babypuder bestäubt, durch das nur noch diffuse Reflexionen an der Oberfläche des Puders und keine Brechungen oder Reflexionen mehr innerhalb der Gelatine auftreten. Somit kann die Oberfläche des Babypuders genauer, als die der Gelatine bestimmt werden. Die Petrischale wurde dabei nicht bewegt und mit dem gleichen Pfad erneut gescannt. Lediglich der Scanner wurde mit anderen Einstellungen eingesetzt. Durch den Puder entsteht jedoch ein Feh-



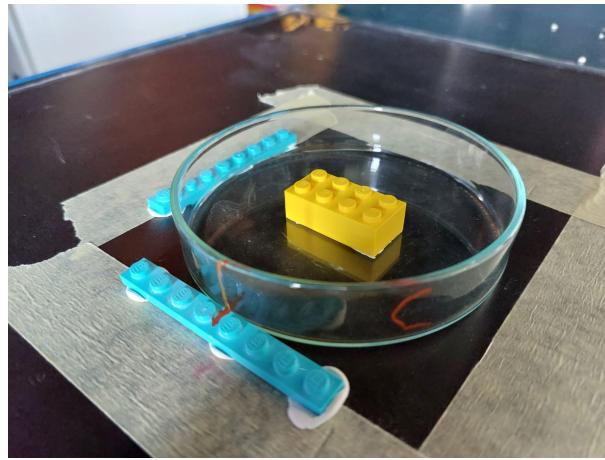
**Abbildung 3.3:** Der verwendete Laserscanner Micro-Epsilon scanCONTROL 2900-25 befestigt an KUKA KR-16.

ler, da sich die Oberfläche etwas über der Oberfläche der Gelatine befindet. Um diesen Fehler zu bestimmen, muss man die Dicke der Puderschicht bestimmen. Dazu wurde mit einem weiteren Pfad zuerst eine schwarze Oberfläche gescannt. Danach wurde sie mit Babypuder bestäubt und erneut gescannt. Wenn man nun den Abstand der bestäubten und nicht bestäubten Oberfläche bestimmt, erhält man die Dicke der Puderschicht.

Verarbeitet wurden die Scans mit CloudCompare v2.12.4. CloudCompare ist eine Software zur Verarbeitung von Punktwolken. Damit kann man Punktwolken anzeigen, bearbeiten und vergleichen. So kann man einzelne Punkte aus Punktwolken ausschneiden, oder verschiedene Punktwolken zusammenfügen. Außerdem stehen viele weitere Algorithmen zur Verarbeitung der Punkte zur Verfügung. Einer dieser Algorithmen ist das Einpassen von Ebenen in Punktwolken. Dabei werden die Parameter der Ebene und deren Genauigkeit berechnet. Außerdem kann man mit CloudCompare die Abstände von Punktwolken oder Ebenen zueinander bestimmen. Bei der Auswertung des Versuchs wird der Abstand zwischen eingepassten Ebenen und Punktwolken bestimmt. CloudCompare gibt als Ergebnisse dieser Abstandsmessungen nicht nur die Abstände an, sondern stellt die Abstände auch in einem eingefärbten Histogramm dar. Die Punktwolke wird ebenso anhand der Abstände eingefärbt.

### 3.3 Punktkorrektur

Bei jedem Linienscan werden alle Punkte im Koordinatensystem des Scanners gespeichert. Die Transformationsmatrix aus dem Sensor- in das Weltkoordinatensystem wird ebenso abhängig von der Pose des Scanners gespeichert. Die Punkte werden nun im Sensorkoordinatensystem korrigiert und in das Weltkoordinatensystem transformiert. Dazu werden die Positionen des Kamera- und Laserzentrums sowie die Oberfläche der Gelatine benötigt. Die Ebenengleichung der Oberfläche wird wie in 3.2 beschrieben in Weltkoordinaten bestimmt und wird mithilfe der Transformationsmatrix für jeden Scan in das Sensorkoordinatensystem transformiert. Die



**Abbildung 3.4:** Die Abbildung zeigt, wie der Legostein in einer Petrischale festgeklebt ist. Die Position und Ausrichtung der Schale sind markiert.

Positionen des Kamera- und Laserzentrums in Sensorkoordinaten sind näherungsweise bekannt. Damit werden die Punkte des gesamten 3D-Scans in jedem einzelnen Linienscan korrigiert und danach zu einer korrigierten Punktwolke zusammengefügt.

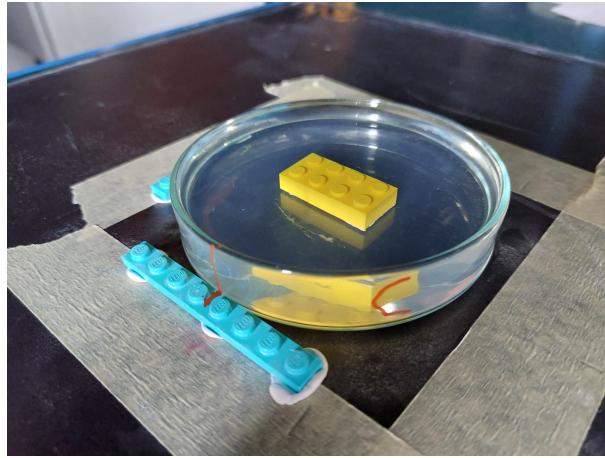
Verwendet wird der Ansatz von van der Lucht et. al. [26], der wiederum auf Klopfer et. al. [13] aufbaut. Dieser Ansatz beruht auf dem Lichtschnittverfahren. Nach dem Lichtschnittverfahren ist jeder vom Scanner berechnete Punkt  $P$  der Schnittpunkt einer Geraden, die durch das Laserzentrum führt, mit einer anderen Geraden, die durch das Kamerazentrum führt. Die Geraden stellen den Weg dar, den das Licht auf dem Weg vom Laser über ein reflektierendes Objekt zur Kamera zurücklegt. Da das gescannte Objekt sich in diesem Fall in Gelatine befindet, schneiden beide Geraden deren Oberfläche und das Licht wird gebrochen. Das Licht verläuft daher innerhalb der Gelatine nicht auf diesen beiden Geraden. In Abbildung 3.7 sieht man die Geraden nach dem Lichtschnittverfahren und die Brechung an der Oberfläche in 2D. Um den Verlauf des Lichts innerhalb der Gelatine zu bestimmen, kann man die Brechung an den Schnittpunkten an der Oberfläche der Gelatine mit dem Brechungsgesetz berechnen. Dazu muss man zuerst den Einfallswinkel der Geraden  $\delta_1$ , also den Winkel zwischen dem Richtungsvektor der Geraden  $r$  und der Normalen der Oberfläche  $N_G$ , berechnen:

$$\delta_1 = \arccos \left( \frac{N_G \cdot r}{\|N_G\| \|r\|} \right) \quad (3.1)$$

Den Ausfallwinkel der gebrochenen Gerade  $\delta_2$  bestimmt man nun mit dem umgeformten Brechungsgesetz aus Gleichung (2.3).

$$\delta_2 = \arcsin \left( \frac{n_{Luft}}{n_{Gelatine}} \cdot \sin(\delta_1) \right) \quad (3.2)$$

Um die Gerade innerhalb der Gelatine zu erhalten, kann man sie im Schnittpunkt mit der Ebene um  $\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1$  drehen. Dazu wird vereinfachend eine neue Basis  $B$  festgelegt, wodurch



**Abbildung 3.5:** In der Abbildung sieht man, wie der Legostein in der Gelatine eingegossen ist. Er befindet sich wieder an der markierten Position. Im Vergleich zu Abbildung 3.4 erkennt man die Verzerrung des Legosteins durch die Lichtbrechung an der Oberfläche der Gelatine.

die Gerade nur noch um deren x-Achse gedreht werden muss. In Abbildung 3.8 ist diese Basis jeweils für die Kamera und den Laser dargestellt. Die z-Achse ist dabei die Normale der Ebene  $N_G$ . Die y-Achse zeigt auf der Ebene vom Schnittpunkt  $S$  zur Projektion des Kamera- oder Laserzentrums  $L'$  auf der Ebene. Die x-Achse ergibt sich aus dem Vektorprodukt der beiden anderen Achsen.

$$B = \left[ \frac{L' - S'}{\|L' - S'\|} \times N_G \quad \frac{L' - S}{\|L' - S'\|} \quad N_G \right]^T \quad (3.3)$$

Nun transformiert man zuerst den Richtungsvektor  $r$  mit  $T_B^A$  in das Koordinatensystem  $B$ . Danach dreht man ihn mit der Rotationsmatrix  $R_{\Delta\delta}$  um die x-Achse. Durch Rücktransformation mit  $T_B^{A^{-1}}$  erhält man den Richtungsvektor der gebrochenen Gerade  $r'$  im ursprünglichen Sensorskoordinatensystem.

$$r' = T_B^{A^{-1}} R_{\Delta\delta} T_B^A r \quad (3.4)$$

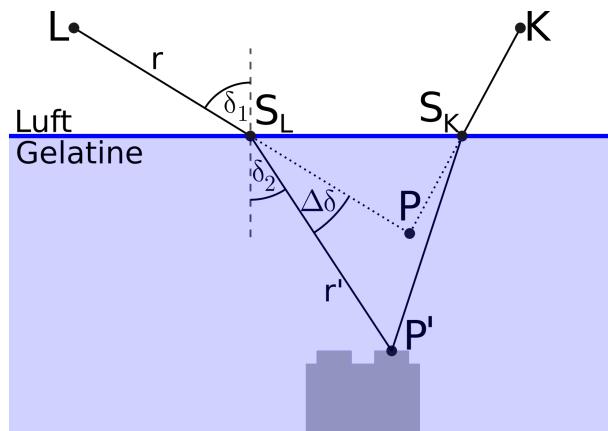
Der Ursprung der gebrochenen Gerade liegt im Schnittpunkt  $S$ .

Um nun den korrigierten Punkt zu erhalten, bestimmt man den Schnittpunkt der gebrochenen Laser- und Kameragerade. Da sich die Geraden wegen Ungenauigkeiten bei der Berechnung nicht immer exakt treffen, wird stattdessen der Schnittpunkt der gebrochenen Kameragerade mit einer Ebene berechnet. Die Ebene stellt näherungsweise dar, wie die Laserebene gebrochen wird. Sie entsteht, indem die Normale der ursprünglichen Laserebene ebenso wie die Lasergerade im Schnittpunkt  $S$  um  $\Delta\delta$  gedreht wird.

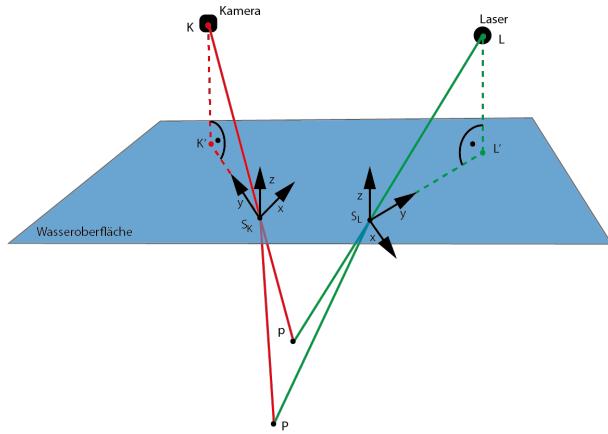
Diese Methode wird bei jedem Linienscan für alle Punkte im jeweiligen Sensorskoordinatensystem ausgeführt. Mithilfe der Transformationsmatrix werden die korrigierten Punkte dann in das Weltkoordinatensystem transformiert und gespeichert. Wenn man nun die Punkte der einzelnen Linienscans kombiniert, erhält man den korrigierten 3D-Scan des Legosteins.



**Abbildung 3.6:** Die Abbildung zeigt die mit Babypuder bestäubte Oberfläche. Die Petrischale ist an derselben Markierung wie bei den vorherigen Scans platziert.



**Abbildung 3.7:** Die Abbildung zeigt eine 2D-Darstellung der Punktkorrektur. Das Licht legt seinen Weg vom Laser  $L$  zur Kamera  $K$  zurück. Es wird dabei sowohl am Schnittpunkt zwischen Kamera und Legostein  $S_K$ , als auch zwischen Laser und Legostein in  $S_L$  gebrochen. Der vom Scanner gemessene Punkt  $P$  weicht vom tatsächlichen Punkt  $P'$  ab. Am Beispiel der Lasergeraden wird die Brechung des Lichts dargestellt. Der Eintrittswinkel der Geraden  $r$  ist  $\delta_1$ . Der Austrittswinkel der gebrochenen Geraden  $r'$  ist  $\delta_2$ . Somit wurde die Gerade um  $\Delta\delta$  gedreht.



**Abbildung 3.8:** Die Abbildung zeigt eine 3D-Darstellung der Punktkorrektur [26]. Das Licht wird an den Schnittpunkten S gebrochen und am Punkt P reflektiert.  $L'$  ist die Projektion des Kamerazentrums auf die Ebene. An den Schnittpunkten kann die Gerade mithilfe einer Basis entsprechend der Brechung gedreht werden. Die z-Achse ist die Normale der Ebene  $N_G$ . Die y-Achse zeigt vom Schnittpunkt  $S_L$  zur Projektion  $L'$ . Die x-Achse ergibt sich aus dem Vektorprodukt der anderen Achsen.

## Kapitel 4

# Auswertung der Experimente

In diesem Kapitel werden die Messungen des Scanners ausgewertet. Zuerst wird die Oberfläche der Gelatine untersucht. Dabei werden die Ebenen aus den Scans mit und ohne Babypuder verglichen. Danach wird genauer auf den Scan der reinen Oberfläche und seine Abweichungen eingegangen. In Abschnitt 4.2 wird der Scan des in Gelatine eingegossenen Legosteins untersucht. Dazu wird er zuerst mit einem Scan ohne Gelatine verglichen. Danach wird der Scan mit Gelatine korrigiert und erneut verglichen.

### 4.1 Oberfläche der Gelatine

Im Folgen wird die Bestimmung der Oberfläche der Gelatine behandelt. Die Gelatine wurde zuerst ohne und danach mit Babypuder bestäubt gescannt. Die Scans sieht man in Abbildung 4.1. Der Scan mit Puder wird gelb dargestellt, der Scan ohne Puder ist rot. Beim Ansehen der beiden Scans sieht man deutlich, dass der Scan mit Puder mehr Punkte enthält, als der Scan ohne Puder. Der Scan mit Puder hat mit 1.734.227 Punkten etwa 19-mal so viele Punkte, wie der Scan unbehandelten Oberfläche mit 91.772 registrierten Punkten. Das wird noch deutlicher, wenn man beachtet, dass der Scan ohne Puder langsamer aufgenommen wurde. So wurden beim Scan ohne Puder 11.361 Linien und beim Scan mit Puder nur 4068 Linien gespeichert. Das bedeutet, dass der Babypuder den Laser besser reflektiert, als die Oberfläche der Gelatine.

Um die Scans genauer zu vergleichen, wurden mithilfe von CloudCompare Ebenen in diese eingepasst. Die Ebene aus dem Scan mit Puder sieht man rechts in Abbildung 4.1 eingezeichnet. Sie wurde mit einem Abstand im quadratischen Mittel von 0,069799 mm in den Scan mit Puder eingepasst. CloudCompare gibt für die Ebene in Normalenform die Normale und einen Stützvektor an. Der Stützvektor zeigt dabei in die Mitte des Scans, aus dem die Ebene bestimmt wurde. Die Normale der Ebene mit Puder  $\vec{n}_P$  und ihr Stützvektor  $\vec{p}_P$  sind:

$$\vec{n}_P = \begin{pmatrix} -0,00296120 \\ -0,0035224 \\ 0,99998939 \end{pmatrix} \quad \vec{p}_P = \begin{pmatrix} 1292,51525879 \\ -577,40368652 \\ 61,35443497 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

In den Scan ohne Puder wurde ebenso eine Ebene eingepasst. Sie hat einen mittleren quadratischen Abstand von 0,502733 mm. Die Normale der Ebene ohne Puder  $\vec{n}_O$  und der dazugehörige Stützvektor  $\vec{p}_O$  sind:

$$\vec{n}_O = \begin{pmatrix} -0,00359641 \\ -0,00366522 \\ 0,99998683 \end{pmatrix} \quad \vec{p}_O = \begin{pmatrix} 1292,54357910 \\ -577,50128174 \\ 61,17370224 \end{pmatrix}$$

Auf den ersten Blick sehen die Parameter der Ebenen sehr ähnlich aus. Die Normalen sind bis zur zweiten Nachkommastelle identisch und auch der Stützvektor unterscheidet sich erst in den Nachkommastellen. Um die Ebenen besser vergleichen zu können werden deshalb nachfolgend deren Abstand und der Winkel zwischen den Normalen bestimmt. Da die Normalenvektoren normiert sind, kann man den Winkel  $\theta$  zwischen den beiden Vektoren wie folgt berechnen:

$$\theta = \arccos(\vec{n}_P \cdot \vec{n}_O) = 0,038^\circ$$

Die Ebenen sind also mit einer kleinen Abweichung nicht genau parallel. Der Abstand zwischen zwei nicht parallelen Ebenen unterscheidet sich vom Ort, an dem dieser bestimmt wird. Daher wird der Abstand in der Mitte der Ebenen bestimmt. Dazu wird der Abstand des Stützvektors der Ebene ohne Puder zur Ebene mit Puder bestimmt. Der Abstand ergibt sich somit aus:

$$d = (\vec{p}_O - \vec{p}_P) \cdot \vec{n}_P = -0,18 \text{ mm}$$

Der Winkel  $\theta$  zwischen den Normalen ist sehr klein. Das negative Vorzeichen des Abstands  $d$  zeigt, dass die Ebene ohne Puder unter der Ebene mit Puder liegt. Dies ist einleuchtend, da der aufgetragene Puder den Scan der Oberfläche nach oben verschiebt. Der Abstand der Ebene ist zwar klein, allerdings ist der Abstand der Scans größer, als die Dicke der Puderschicht. Diese war beim Messen auf einer schwarzen Oberfläche durchschnittlich unter 0,06 mm dick. Es kann aber trotzdem sein, dass sich der Puder auf einer feuchten Oberfläche, wie der Oberfläche der Gelatine, anders verhält, als auf einer trockenen Oberfläche. Ein weiterer möglicher Grund sind Ungenauigkeiten beim Scan der transparenten Oberfläche, wodurch diese tiefer erscheint.

Im Folgenden werden die Abweichungen beim Scannen der reinen Gelatine untersucht. Die Ebene des Scans mit Puder wird daher nachfolgend als Referenz verwendet. Dazu wurde mithilfe von CloudCompare der Abstand der Punkte aus dem Scan ohne Puder zur Referenzebene mit Puder bestimmt. Der mittlere Abstand ist -0,173241 mm, bei einer Standardabweichung von 0,50304 mm. In Abbildung 4.2 sieht man die Frontalansicht des Scans sowie das Histogramm des Abstands. Der Abstand ist mit einem Farbverlauf gekennzeichnet. Wie zuvor beim Vergleich der beiden Ebenen, befindet sich der Scan ohne Puder leicht unter dem Scan mit Puder. Der Abstand befindet sich aber noch innerhalb der Standardabweichung. Das Histogramm zeigt nur 91.139 der gesamten 91.882 Punkte, da sich 487 Punkte mehr als 2 mm unterhalb und 146 Punkte mehr als 2 mm oberhalb der Ebene befinden. In der darüberliegenden Darstellung der Punktwolke sind aber alle Punkte abgebildet. Im Histogramm ist jeweils eine kleinere Abweichung oberhalb und unterhalb der Oberfläche zu sehen. Die untere Abweichung befindet sich etwa 1,1 mm unterhalb der Oberfläche und ist auch in der Frontansicht aus Abbildung 4.2 als feine, grüne Linie zu

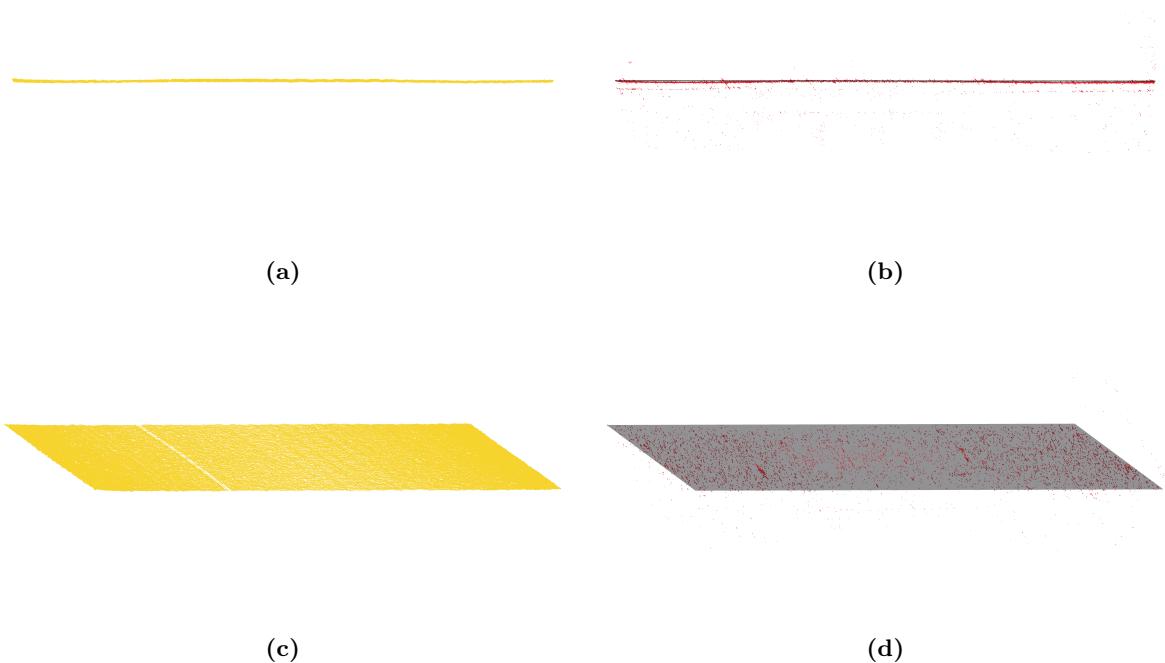
sehen. Ihre Punkte befinden sich über den Messbereich verteilt, wobei sich an den Stellen, an denen sich der Legosteine darunter befindet, weniger Punkte befinden. Die Punkte der oberen Anhäufung, mit einem Abstand von etwa 1,7 mm, befinden sich in einem einzelnen Punkt in einer Ecke des Messbereichs. In Abbildung 4.2 würde sich dieser Punkt am rechten Bildrand befinden. Auch weitere Abweichungen oberhalb der Ebene befinden sich größtenteils an den Enden des Messbereichs, also in Abbildung 4.2 links oder rechts. Sie könnten von Spiegelungen im Rand der Petrischale kommen. Diese befindet sich zwar nicht innerhalb des aufgezeichneten Pfades, ist aber dennoch nahe an dessen Rändern. Außerdem zeigt die Kamera des Scanners in Abbildung 4.2 nach rechts, also direkt in die Richtung des Randes. Das könnte erklären, warum rechts mehr Abweichungen zu erkennen sind, als links. Eine weitere Auffälligkeit sind etwa 100 Punkte, die sich ungefähr auf den Rändern des in der Gelatine eingegossenen Legosteins befinden. Die restlichen Abweichungen unterhalb der Oberfläche sind gleichmäßiger verteilt. Diese Punkte können von Reflexionen an Unreinheiten innerhalb der Gelatine stammen.

Die höhere Anzahl der Punkte und der kleinere Fehler beim Einpassen der Ebene bestätigen die These aus Abschnitt 3.2, dass der Scan mit Puder genauer ist. Doch die mithilfe des Puders bestimmte Ebene befindet sich innerhalb der Standardabweichung des Scans ohne Puder. Die Ebenen sind beinahe parallel. Das zeigt, dass das Scannen der reinen Gelatine grundsätzlich möglich ist. Jedoch ist die Bestimmung mit Puder deutlich genauer. Besonders wenn Objekte wie ein Legosteine sich unter der Oberfläche befinden, treten Fehler beim Scannen der reinen Oberfläche auf.

## 4.2 Scan des Legosteins

Den Scan des Legosteins ohne Gelatine sieht man in Abbildung 4.3. Links sieht man den Scan des Legosteins von oben. Dabei bemerkt man die einzelnen Linienscans, die letztendlich die 3D-Punktwolke ergeben. Rechts neben den Noppen sind keine Punkte, da sich hier ein toter Winkel des Scanners befindet: Während der Laser schon die Oberfläche des Steins anstrahlt, befindet sich der Sensor des Scanners noch über den Noppen und hat dadurch keinen Blick auf die gesamte Laserlinie. Rechts daneben sieht man, wie in den Scan zwei Ebenen eingepasst sind, die die Noppen und die Oberfläche des Steins darstellen. Um diese zu erstellen wurde der Scan manuell in zwei Punktwolken aufgeteilt. In jede dieser zwei Punktwolken wurde danach eine Ebene eingepasst. Das quadratische Mittel (RMS) des Abstands zwischen den Punkten der Ebene ist bei den Noppen 0,0383383 mm und bei der unteren Ebene 0,0314126 mm. Die Ebenen werden nachfolgend verwendet, um den Abstand des Scans mit Gelatine zur Referenz ohne Gelatine zu bestimmen.

In Abbildung 4.4 sieht man die beiden Scans des Legosteins: Der obere, gelbe Scan zeigt die Punkte des in Gelatine eingegossenen Steins. Der untere, schwarze Scan zeigt die Referenz des Steins ohne Gelatine. Aufgrund der Lichtbrechung erscheint der in Gelatine eingegossene Stein oberhalb des Referenzscans. Dadurch, dass unter der Gelatine nicht nur der Legosteine, sondern auch die Petrischale, höher erscheint, befindet sich deren Boden im Messbereich des Laserscanners. Die dadurch entstandenen Punkte haben einen Abstand von mehreren Millimetern zu den Punkten des Legosteins und wurden manuell entfernt. Daher sind sie nicht in Abbildung 4.4 zu



**Abbildung 4.1:** Die Abbildungen zeigen die Scans der Gelatineoberfläche.  
In (a) und (c) sieht man den Scan mit Babypuder bestäubt in Gelb.  
In (b) und (d) sieht man den Scan der reinen Oberfläche in Rot. In die Scans der reinen Oberfläche ist die anhand der bestäubten Oberfläche bestimmte Ebene grau eingezzeichnet.

sehen und werden auch im folgenden nicht weiter behandelt.

Der Abstand des unter Gelatine gescannten Steins von den Ebenen des Referenzscans wurde mit CloudCompare bestimmt. Dazu wurde der Scan des Steins unter Gelatine ebenso in die Punkte der Noppen und die der darunterliegenden Ebene aufgespalten. Danach wurde der Abstand der jeweiligen Ebene und der Punkte bestimmt. Die wieder zusammengefügte Punktwolke sieht man in Abbildung 4.5. Daneben befindet sich das Histogramm der Abstände. Die Farben stellen den Abstand der Punkte von den Ebenen dar. Die Noppen des Steins sind in der Abbildung grün und die darunterliegende Oberfläche orange. Im Histogramm fällt ebenso auf, dass es eine grüne und eine orange Anhäufungen gibt. Die Noppen des Legosteins weichen im Durchschnitt 1,37946 mm bei einer Standardabweichung von 0,0364387 mm von ihrer Referenzebene ab. Die darunter liegende Oberfläche des Legostein weicht hingegen 1,93956 mm bei einer Standardabweichung von 0,0325995 mm ab. Das liegt daran, dass die Noppen sich näher an der Oberfläche der Gelatine befinden. Der Weg, den das Licht durch die Gelatine zurücklegt ist umso länger, desto tiefer der gemessene Punkt liegt. Dadurch wirkt sich die Lichtbrechung auf die weiter unten liegenden Punkte stärker aus, als auf die oberen Punkte.

Der Scan wird wie in Abschnitt 3.3 beschrieben korrigiert. Dafür wird die in Abschnitt 4.1 aus

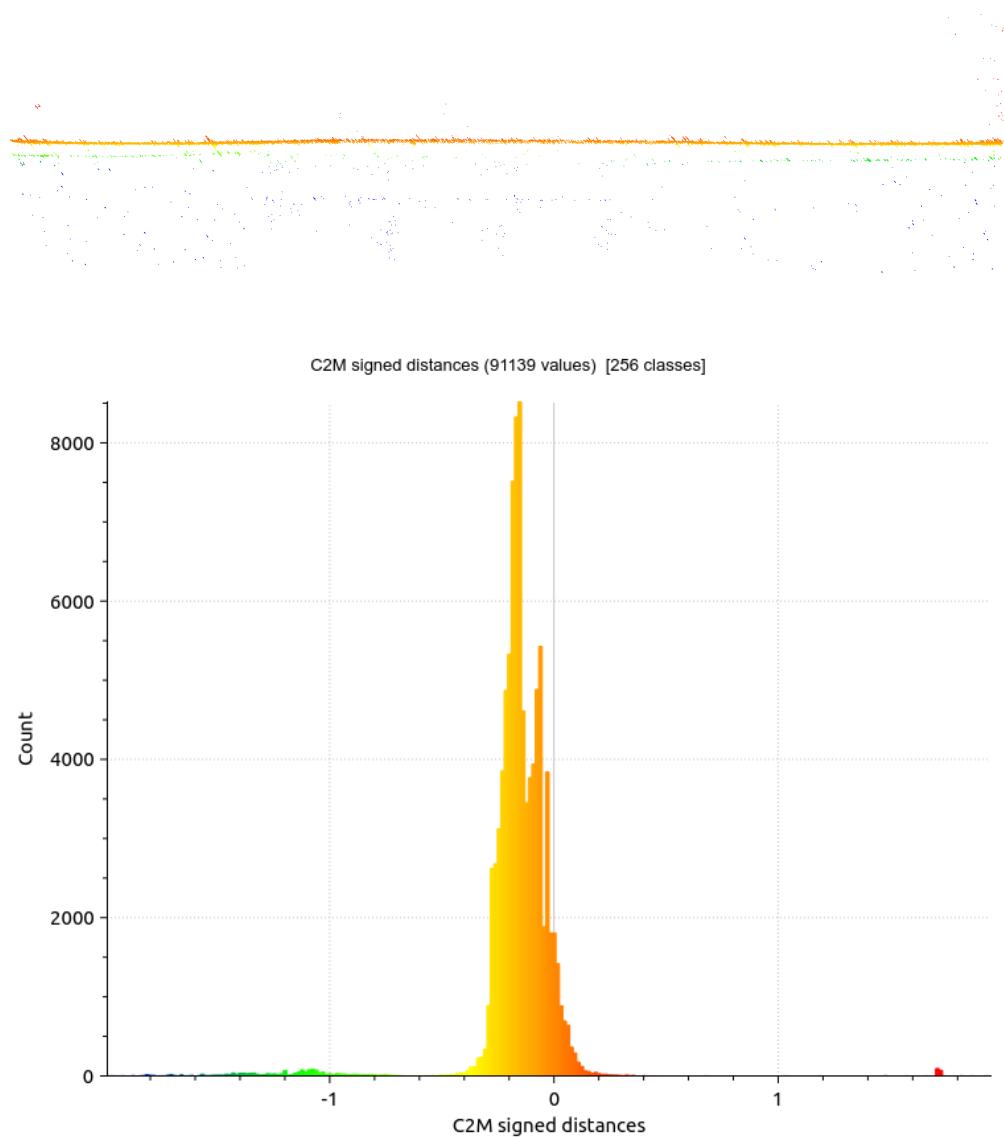
dem Scan mit Puder bestimmte Ebene verwendet. Der Legostein ist in einer Gelatine mit einer Konzentration von etwa 2 % eingegossen. Die Gelatine besteht also zu 98 % aus Leitungswasser. Für die Korrektur wird der Brechungsindex der Gelatine mit 1,34 und der Brechungsindex der Luft mit 1 angenommen. Wasser hat einen Brechungsindex von 1,3330, der Brechungsindex von Luft ist 1,000277 [16]. Der Wert für die Gelatine leitet sich aus [5] ab. Darin wird der Brechungsindex zwar nur in Konzentrationen ab 4 % gemessen, jedoch wird sowohl bei einer Konzentration von 4 % als auch bei 6 % ein Brechungsindex von 1,3403 gemessen. Außerdem nimmt der Brechungsindex mit sinkender Konzentration ab und ist nach unten hin durch den Brechungsindex des Wassers begrenzt.

In Abbildung 4.6 sieht man den korrigierten Scan. Die Abstände der Punkte zu den Ebenen des Referenzscans sind in einem Histogramm dargestellt. Anders als vor der Korrektur haben die Punkte der Noppen hier größtenteils die gleiche Farbe wie die Oberfläche. Im Histogramm ist auch nur eine einzelne Anhäufung zu sehen. Die Noppen haben einen mittleren Abstand von 0,0178375 mm bei einer Standardabweichung von 0,056403 mm. Die untere Oberfläche hat einen mittleren Abstand von 0,0388722 mm bei einer Standardabweichung von 0,0527845 mm.

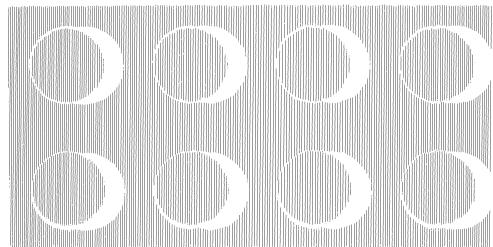
**Tabelle 4.1:** Abstände der Punkte zur jeweiligen Referenzebene.

	Noppen	Oberfläche
Scan	1,37946 mm	1,93956 mm
korrigiert	0,0178375 mm	0,0388722 mm

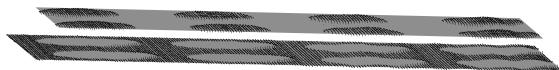
In Tabelle 4.1 sieht man die Abstände der Punkte von ihren jeweiligen Referenzebenen. Dabei sieht man, wie sich die Korrektur auf die Punkte auswirkt. Nach der Punktkorrektur befinden sich beide Punktwolken weiterhin über ihren Ebenen. Der Abstand ist aber kleiner, als die jeweilige Standardabweichung des Abstandes und die Genauigkeit des Roboterarms. Außerdem musste vor dem zweiten Scan die Aushärtung der Gelatine abgewartet werden und wurde somit erst am nächsten Tag durchgeführt. Während dem Aushärten wurde die Petrischale von dem Messaufbau weg bewegt und kann nur annähernd wieder an der vorherigen Stelle platziert werden. Der Legostein ist zwar in der Petrischale festgeklebt, manchmal kommt es jedoch vor, dass sich ein Stein während dem Aushärten der Gelatine ablöst und aufschwimmt. Ebenso könnte der Stein sich hier leicht angehoben haben. Der weiterhin vorhandene Unterschied zwischen dem Abstand der Noppen und der darunterliegenden Oberfläche deutet aber auf einen Einfluss der Brechung hin. Denn ein einfaches Aufschwimmen oder Verschieben des Steins würde beide Punktwolken ebenso beeinflussen. Hier hat aber die weiter unten liegende Oberfläche weiterhin den größeren Abstand. Das deutet darauf hin, dass die Punkte etwas zu wenig korrigiert wurden.



**Abbildung 4.2:** Die Abbildung zeigt den Abstand der ohne Babypuder gescannten Oberfläche zu der anhand der bestäubten Oberfläche bestimmten Ebene. Die obere Grafik zeigt einen Scan der Ebene von der Seite. Der Farbverlauf zeigt den Abstand der Punkte von der Ebene. Darunter befindet sich das Histogramm der Abstände. Das Histogramm zeigt nur einen Ausschnitt der Punkte, da sich 663 Punkte weiter als 2 mm entfernt befinden. Davon befinden sich 487 Punkte unterhalb von -2 mm und 146 Punkte oberhalb von 2 mm. In der Frontalansicht der Punktwolke sind diese Punkte trotzdem abgebildet.



(a)



(b)

**Abbildung 4.3:** Die Abbildung zeigt den Scan des Legosteins aus verschiedenen Blickwinkeln. Die linke Abbildung zeigt den Legostein von oben. Rechts sieht man den Legostein schräg von der Seite. Hier sind zusätzlich zwei Ebenen eingezeichnet, die in den Scan eingepasst wurden.

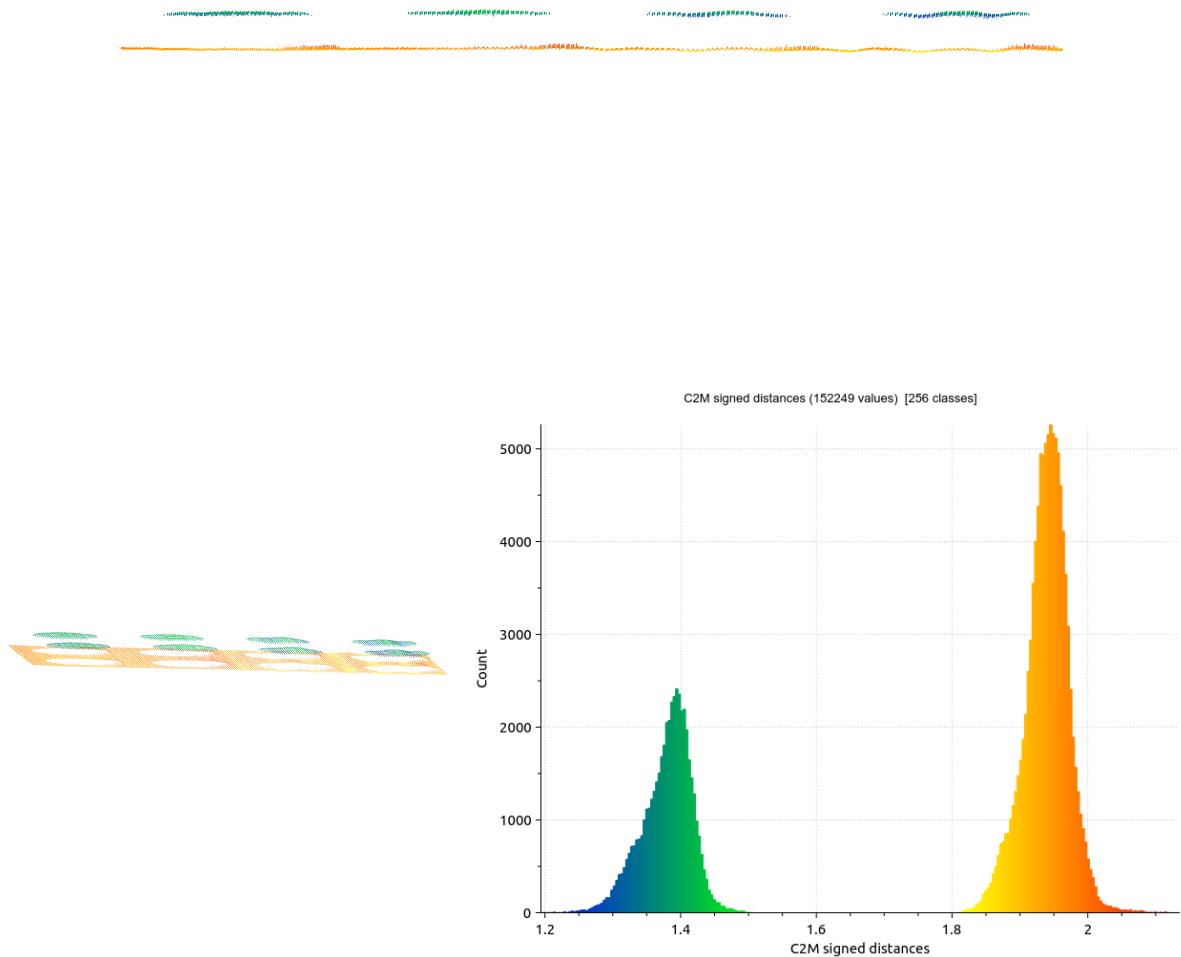


(a)

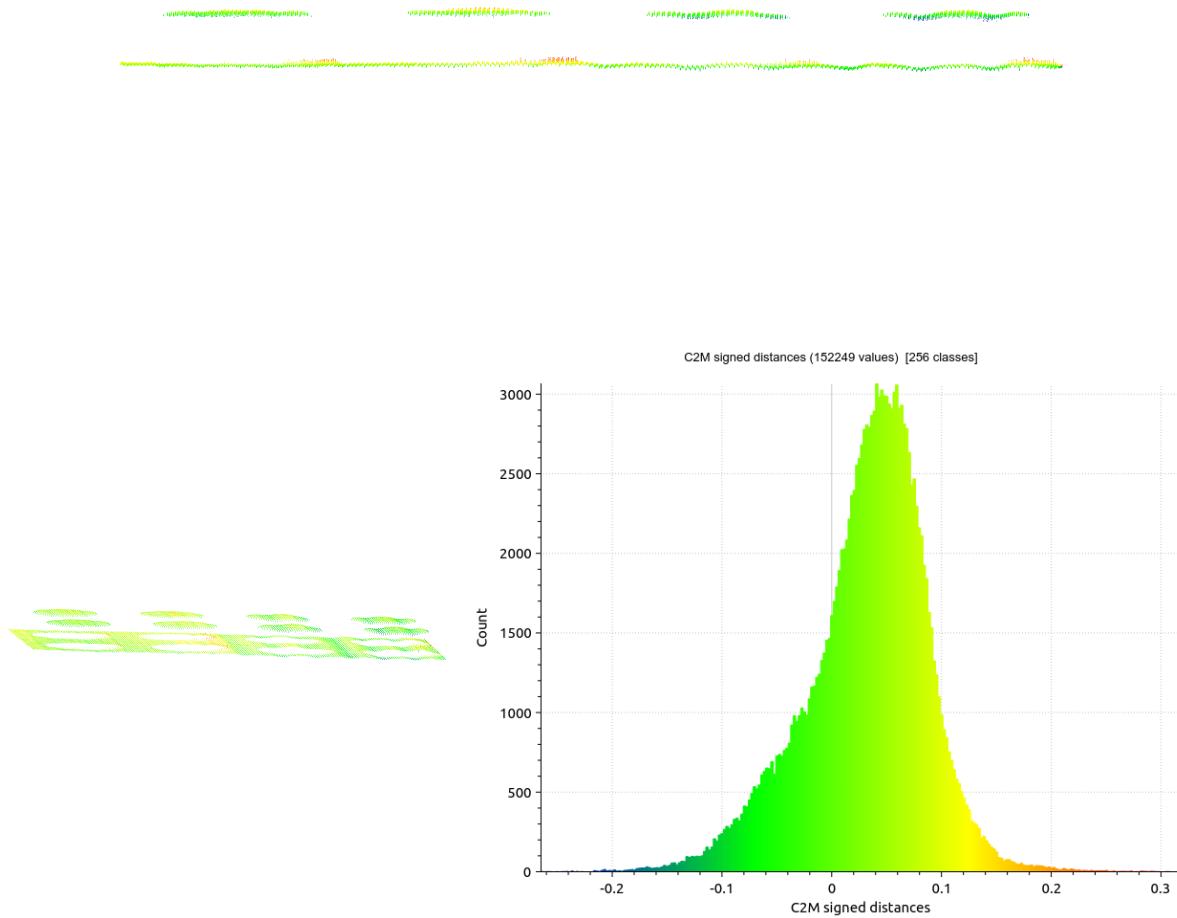


(b)

**Abbildung 4.4:** In den Abbildungen sieht man die Scans des Legosteins mit Gelatine (gelb) und ohne Gelatine (schwarz). Der Scan des eingegossenen Steins liegt wegen der Lichtbrechung oberhalb des anderen Scans.



**Abbildung 4.5:** Die Abbildung zeigt den Scan des eingegossenen Legosteins und seinen Abstand zu den Ebenen des Referenzscans ohne Gelatine. Die Farben geben den Abstand der Punkte zu ihrer jeweiligen Referenzebene an.



**Abbildung 4.6:** Die Abbildung zeigt den korrigierten Scan und seinen Abstand zu den Ebenen des Referenzscans.



## Kapitel 5

# Zusammenfassung und Ausblick

In der Arbeit sollte das Scannen mit einem triangulationsbasierten Laserscanner in zwei verschiedenen Medien untersucht werden. Als zweites Medium neben der Umgebungsluft wurde Gelatine verwendet. Dazu wurde ein Legostein mithilfe eines Scanners eingescannt und danach in Gelatine eingegossen. Untersucht wurde dabei sowohl das Scannen der Oberfläche, als auch das Scannen eines sich innerhalb der Gelatine befindlichen Objekts. Da die Gelatine transparent ist, wird der Laser des Scanners von der Gelatine nur teilweise reflektiert. Dadurch ist die Bestimmung der Gelatineoberfläche schwieriger, als bei anderen Objekten. Auch die Messung des darunterliegenden Legosteins wird durch die Lichtbrechung an der Oberfläche der Gelatine verfälscht.

Die Oberfläche der Gelatine wurde etwa senkrecht durch den Scanner gescannt. Daraus konnte eine Ebene bestimmt werden, die die Oberfläche abbildet. Da beim Scannen von transparenten Objekten Fehler auftreten, wurde diese Messung mithilfe eines zweiten Scans überprüft. Dazu wurde die Gelatine mit Babypuder bestäubt, um eine diffus reflektierende Oberfläche zu schaffen. Die Messung der bestäubten Oberfläche ergab etwa 19-mal so viele Punkte wie der Scan der reinen Gelatine. Beim Einpassen einer Ebene in die Scans traten beim Scan der reinen Ebene im quadratischen Mittel Abweichungen von 0,50 mm auf, beim Scan des Babypuders nur von 0,07 mm. Die eingepassten Ebenen waren mit einem Abstand von 0,18 mm und einem Winkel von 0,038° beinahe identisch. Somit erreichte das Scannen der Gelatineoberfläche ein vergleichbares Ergebnis wie der Referenzscan mit Gelatine, war jedoch ungenauer.

Zur Untersuchung der Lichtbrechung wurde ein Legostein einmal ohne Gelatine und danach in Gelatine eingegossen gescannt. Um die Scans zu vergleichen, wurden die Scans des Legosteins jeweils in zwei Ebenen aufgeteilt: die Oberfläche der Noppen und die restliche Oberfläche des Steins. So wurde der Fehler durch die Lichtbrechung als Abstand der jeweiligen Ebene mit und ohne Gelatine bestimmt. Durch die Brechung trat bei den Noppen ein Fehler von 1,379 mm und bei der darunterliegenden Ebene ein Fehler von 1,940 mm auf. Der Scan durch die Oberfläche der Gelatine wurde mithilfe des Lichtschnittverfahrens korrigiert. Dazu wurde die zuvor bestimmte Oberfläche der Gelatine verwendet. Der Fehler durch die Brechung bei den höher liegenden Noppen wurde dadurch auf 0,018 mm und bei der darunterliegenden Oberfläche auf 0,039 mm

reduziert.

## 5.1 Ausblick

Um den verwendeten Laserscanner beim Scannen von Gelatine einzusetzen, ist die Konfiguration des Scanners entscheidend. Bei einem Scan können die Belichtungszeit und weitere Parameter zur Erkennung der Punkte festgelegt werden. Daher sind zwei separate Scans nötig, um die Oberfläche der Gelatine und den sich darin befindenden Legosteine zu erfassen. Die Scans der Oberfläche benötigen eine hohe Belichtungszeit, da die Gelatine den Laser nur leicht reflektiert. Die Parameter zum Erfassen der Punkte sind empfindlich und müssen daher bei verschiedenen Scans vorher überprüft und eventuell nachjustiert werden. Dies tritt wahrscheinlich durch ein verändertes Umgebungslicht auf, das die empfindliche Messung stört. Der Laserscanner befindet sich in einem Raum, dessen Fenster nach Norden ausgerichtet sind und ist daher zwar keiner direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt, aber trotzdem abhängig vom Stand der Sonne unterschiedlich belichtet. Beim Scannen des Legosteins durch die Gelatine ist die Konfiguration des Scanners einfacher, da, abgesehen von Abweichungen durch die Lichtbrechung, kaum Störungen auftreten. Hier kann eine Konfiguration dauerhaft verwendet werden.

Eine Fehlerquelle bei dem durchgeföhrten Experiment ist der verwendete Brechungskoeffizient der Gelatine. Zur Korrektur der Messung ist dieser ein wichtiger Faktor und ist somit entscheidend für deren Genauigkeit. Der verwendete Brechungskoeffizient ist anhand eines Literaturwerts festgelegt worden, bei dem die hier verwendete Konzentration der Gelatine nicht untersucht wurde. Da handelsübliche Gelatine verwendet wurde, kann es auch sein, dass dieser Wert nicht mit dem tatsächlichen Brechungskoeffizienten übereinstimmt. Nach dem Aushärten kann sich der Koeffizient außerdem ändern und somit zum Zeitpunkt der Messung abweichen. Um dies in Zukunft zu vermeiden, kann man den Brechungskoeffizienten der Gelatine vor der Messung mit einem Refraktometer bestimmen und Gelatine mit bekannten Eigenschaften verwenden.

Außerdem werden die inneren Parameter des Scanners, die für das Lichtschnittverfahren verwendet werden, nicht vom Hersteller angegeben. Diese Parameter sind daher nur näherungsweise bestimmt worden. Das Kamerazentrum des Scanners und das Zentrum des Lasers werden für die Korrektur verwendet. Eine genauere Kalibrierung der im Sensor verbauten Kamera und des verbauten Lasers kann daher die Qualität der Korrektur verbessern.

Die Oberfläche der Gelatine in diesem Experiment ist für die Messungen ideal. Die Ebene Oberfläche der Gelatine und die senkrechte Positionierung vereinfachen sowohl das Scannen der Oberfläche, als auch durch diese hindurch. Eine komplexere Oberflächenstruktur, zum Beispiel in Form von Wellen, würde die praktische Anwendbarkeit der verwendeten Methoden genauer abbilden. Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass das Scannen von und durch Gelatine mit dem verwendeten Scanner grundsätzlich möglich ist. Eine weiterführende Arbeit könnte daher die Anwendung bei komplexeren Oberflächen behandeln.

# Literaturverzeichnis

- [1] Koordinatenmessgerät. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:9.12.17\\_Coordinate\\_measuring\\_machine.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:9.12.17_Coordinate_measuring_machine.png), 2009
- [2] Snelliussches Brechungsgesetz. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Snellius-Brechungsgesetz\\_\(gespiegelt\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Snellius-Brechungsgesetz_(gespiegelt).svg), 2013
- [3] Time of flight. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20200501\\_Time\\_of\\_flight.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20200501_Time_of_flight.svg), 2020
- [4] ARMSTRONG, Ashley; NORATO, Julian; ALLEYNE, Andrew; WAGONER JOHNSON, Amy: Direct process feedback in extrusion-based 3D bioprinting. In: *Biofabrication* 12 (2019), Nr. 1
- [5] BAILEY, M.; GARDNER, B.; ALUNNI-CARDINALI, M.; CAPONI, S.; FIORETTO, D.; STONE, N.; PALOMBO, F.: Predicting the Refractive Index of Tissue Models Using Light Scattering Spectroscopy. In: *Applied Spectroscopy* 75 (2021), Nr. 5
- [6] BÄCKER, J.: Scheimpflugsche Regel. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Scheimpflug\\_Bedingung.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Scheimpflug_Bedingung.png), 2006
- [7] EBRAHIM, M.A-B.: 3D Laser Scanners' Techniques Overview. In: *International Journal of Science and Research (IJSR)* 4 (2015), Nr. 10
- [8] EREN, G.; AUBRETON, O.; MERIAUDEAU, F.; SECADES, L.; FOFI, D.; NASKALI, A.; TRUCHETET, F.; ERCIL, A.: Scanning From Heating: 3D shape estimation of transparent objects from local surface heating. In: *Optics express* 17 (2009), Nr. 14
- [9] GAO, C.; LU, C.; JIAN, Z.; ZHANG, T.; CHEN, Z.; ZHU, Q.; TAI, Z.; LIU, Y.: 3D bioprinting for fabricating artificial skin tissue. In: *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 208 (2021)
- [10] GMBH, KUKA R.: Technical Data KR 16. [https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/8350ff3ca11642998dbdc81dcc2ed44c/db\\_kr\\_16\\_en.pdf](https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/8350ff3ca11642998dbdc81dcc2ed44c/db_kr_16_en.pdf), 2005

- [11] IHRKE, I.; KUTULAKOS, K.; LENSCHE, H.; MAGNOR, M.; HEIDRICH, W.: Transparent and Specular Object Reconstruction. In: *Computer Graphics Forum* 29 (2010), Nr. 8
- [12] IPM, Fraunhofer: *Optical distance measurement.* <https://www.ipm.fraunhofer.de/en/bu/object-shape-detection/expertise/3d-data-acquisition/optical-distance-measurement.html>,
- [13] KLOPFER, F.; HÄMMERLE, M.; HÖFLE, B.: Assessing the Potential of a Low-Cost 3-D Sensor in Shallow-Water Bathymetry. In: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 14 (2017), Nr. 8
- [14] KOYAMA, K.; TAKAKURA, M.; FURUKAWA, T.; MARUO, S.: 3D Shape Reconstruction of 3D Printed Transparent Microscopic Objects from Multiple Photographic Images Using Ultraviolet Illumination. In: *Micromachines* 9 (2018), Nr. 6
- [15] KUCHLING, H.; KUCHLING, T.: *Taschenbuch der Physik.* 22. Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 2022
- [16] KUYPERS, F.: *Physik in den Ingenieur- und Naturwissenschaften: Band 2: Elektrizität, Optik und Wellen.* 4. Auflage. Weinheim : Wiley-VCH, 2022
- [17] MERIAUDEAU, F.; RANTSON, R.; FOIFI, D.; STOLZ, C.: Review and comparison of non-conventional imaging systems for three-dimensional digitization of transparent objects. In: *Journal of Electronic Imaging* 21 (2012), Nr. 2
- [18] MICHAEL, S.; SORG, H.; PECK, C.T.; KOCH, L.; DEIWICK, A.; CHICHKOV, B.; VOGT, P.M.; REIMERS, K.: Tissue Engineered Skin Substitutes Created by Laser-Assisted Bioprinting Form Skin-Like Structures in the Dorsal Skin Fold Chamber in Mice. 8 (2013), Nr. 3
- [19] MICRO-EPSILON: *Betriebsanleitung scanCONTROL 29xx.* <https://www.micro-epsilon.de/download/manuals/man--scanCONTROL-29xx--de.pdf>,
- [20] MICRO-EPSILON: *Betriebsanleitung scanCONTROL Configuration Tools 6.8.* <https://www.micro-epsilon.de/download/manuals/man--scanCONTROL-Configuration-Tools--de.pdf>,
- [21] MICRO-EPSILON: *scanCONTROL 2900 Quick Reference*
- [22] Kapitel 7. In: MUNARO, M.; SO, E.W.Y; TONELLO, S.; MENEGATTI, E.: *Efficient Completeness Inspection Using Real-Time 3D Color Reconstruction with a Dual-Laser Triangulation System.* London : Springer London, 2015, S. 201–225
- [23] OZBOLAT, I.T.: *3D Bioprinting: Fundamentals, Principles and Applications.* London : Academic Press, 2016

- [24] RAITH, W.: *Elektromagnetismus*. Berlin / New York : De Gruyter, 2006
- [25] RANTOSON, R.; STOLZ, C.; FOFI, D.; MERIAUDEAU, F.: Optimization of transparent objects digitization from visible fluorescence ultraviolet induced. In: *Optical Engineering* 51 (2012), Nr. 3
- [26] VAN DER LUCHT, J.; BLEIER, M.; LEUTERT, F.; SCHILLING, K.; NÜCHTER, A.: STRUCTURED-LIGHT BASED 3D LASER SCANNING OF SEMI-SUBMERGED STRUCTURES. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* IV-2 (2018), S. 287–294
- [27] YANG, S.; WANG, L.; CHEN, Q.; XU, M.: In situ process monitoring and automated multi-parameter evaluation using optical coherence tomography during extrusion-based bioprinting. In: *Additive Manufacturing* 47 (2021)



Titel der Bachelorarbeit:

Triangulationsbasiertes 3D-Laserscannen mit Mediumwechsel

Thema bereitgestellt von (Titel, Vorname, Nachname, Lehrstuhl):

Prof. Dr., Andreas, Nüchter, Lehrstuhl für Informatik XVII

Eingereicht durch (Vorname, Nachname, Matrikel):

Lukas, Veeh, 2489307

Ich versichere, dass ich die vorstehende schriftliche Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Die benutzte Literatur sowie sonstige Hilfsquellen sind vollständig angegeben. Wörtlich oder dem Sinne nach dem Schrifttum oder dem Internet entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Weitere Personen waren an der geistigen Leistung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt.  
Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines Ghostwriters oder einer Ghostwriting-Agentur in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar Geld oder geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Arbeit stehen.

- Mit dem Prüfungsleiter bzw. der Prüfungsleiterin wurde abgestimmt, dass für die Erstellung der vorgelegten schriftlichen Arbeit Chatbots (insbesondere ChatGPT) bzw. allgemein solche Programme, die anstelle meiner Person die Aufgabenstellung der Prüfung bzw. Teile derselben bearbeiten könnten, entsprechend den Vorgaben der Prüfungsleiterin bzw. des Prüfungsleiters eingesetzt wurden. Die mittels Chatbots erstellten Passagen sind als solche gekennzeichnet.

Der Durchführung einer elektronischen Plagiatsprüfung stimme ich hiermit zu. Die eingereichte elektronische Fassung der Arbeit ist vollständig. Mir ist bewusst, dass nachträgliche Ergänzungen ausgeschlossen sind.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht. Ich bin mir bewusst, dass eine unwahre Erklärung zur Versicherung der selbstständigen Leistungserbringung rechtliche Folgen haben kann.

---

Ort, Datum, Unterschrift