

Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Science

# Lasergestützte Volumenschätzung logistischer Entitäten

Niklas Schrötler  
geboren in Bonn

2024

Lehrstuhl für Enterprise Computing  
Fakultät Informatik  
Technische Universität Dortmund

Erstgutachter: Prof. Dr. Christian Janiesch  
Zweitgutachter: Jérôme Rutinowski, M.Sc.  
Abgabedatum: 02. Januar 2024

## Kurzfassung

Diese Arbeit stellt eine Alternative zu den aktuell für logistische Zwecke verfügbaren automatischen Volumenerfassungssystemen vor. Dazu werden ein an der Decke verbauter Laser in Kombination mit einer Kamera verwendet, die mittels einer Abwandlung von Structured Light Scanning mit Medienprojektoren eine Punktwolke von einem zu analysierenden Objekts erzeugen. Zur Ableitung eines Volumens werden verschiedene Ansätze vorgestellt und verglichen. Das resultierende System wird umgesetzt und validiert. Hierbei wird eine von Ausreißern bereinigte Maximalabweichung von 100% bei Objekten von mindestens der Größe eines kleinen KLT festgestellt. Für kleine Objekte wird das System aufgrund von Abweichungen von mindestens 927% als nicht geeignet eingestuft. Auswirkungen von Rotation und Befüllung der erfassten Objekte sowie unerwünschte Auswirkungen des Umgebungslichts auf die Volumenschätzung konnten nicht festgestellt werden. Aufgrund der Empfindlichkeit bezüglich der Position des Objekts im Projektionsbereich sowie der starken Ausreißer in den Messergebnissen wurde das System als nur begrenzt praktikabel eingestuft.

## Abstract

This thesis introduces an alternative to the currently available automatic volume measurement systems for logistic purposes. To achieve this, lasers mounted on the ceiling are used in tandem with a camera to generate a pointcloud of the object of interest, utilising an adaptation of structured light scanning with media projectors. To infer the volume from the pointcloud, multiple approaches are introduced and compared. The resulting system is then implemented and validated, yielding an outlier-corrected maximum deviation of 100% when analysing objects that are at least the size of a small KLT. For smaller objects, the system was deemed to be unfit due to deviations of at least 927%. Possible impacts of rotation and load of the analysed object, as well as adverse impacts of ambient light, on the volume estimation could not be found. Due to its sensitivity regarding the position of the analysed object in the projection area and the significant outliers in measurement results, the system is deemed to be limited in its real-world practicality.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Technologien</b>	<b>3</b>
2.1	Punktwolkenermittlung	3
2.2	Laser	13
2.3	Abmessungsschätzung	15
2.4	Volumenschätzung	17
<b>3</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>22</b>
3.1	Übersicht des Systems	22
3.2	Aufbau	23
3.3	Durchführung der Kalibrierung	25
3.4	Validierung	27
3.5	Basiskonfiguration und Ground Truth	32
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>33</b>
4.1	Vergleich mit der Ground Truth	33
4.2	Untersuchung der Stabilität	35
4.3	Untersuchung der Robustheit	39
4.4	Untersuchung der Messungsdauer	42
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>44</b>
<b>A</b>	<b>Daten und Quellcode</b>	<b>47</b>
A.1	Rohdaten der Auswertungen	47
A.2	Quelldateien und sonstige Daten	56
	<b>Literatur</b>	<b>57</b>

# 1 Einleitung

Logistische Prozesse befinden sich im Wandel. Besonders in der Intralogistik, im Rahmen der sogenannten Intralogistik 4.0-Bewegung, finden Systeme Einzug in Unternehmen, welche automatisiert „zur Optimierung von Lagerhaltung, Planung und Transportwesen beitragen“ [31]. Diese Systeme jedoch benötigen mehr Informationen über die zu lagernden Objekte als bislang, um Teil zusätzlich in höherem Detailgrad, um solche Optimierungen durchführen zu können. Dies stellt Logistik-Dienstleister vor die Herausforderung, diese Daten schnell und effizient zu erheben, ohne dabei bestehende Prozesse zu beeinträchtigen. Ein zentraler Datenpunkt ist hierbei das Volumen eines Objekts, welches für Lagerplatz- und Transportoptimierungen fundamental ist [36].

Aus diesem Grund sind Lösungen für die (semi-)automatische Vermessung von Objekten bereits kommerziell verbreitet. Diese sind in der Regel für einen spezifischen Verwendungszweck ausgelegt und implizieren einen Prozess, unter welchem sie verwendet werden.

So gibt es Lösungen wie etwa [38], die für die Verwendung in Fließbandlinien ausgelegt sind. Diese können Objekte, welche mit kleinem Abstand voneinander auf einem Fließband liegen, kontinuierlich vermessen. Somit stellen solche Systeme in sich zunächst eine angemessene Lösungsoption dar.

Des Weiteren existieren Lösungen für die manuelle Verwendung, wie sogenannte Volumenwaagen, etwa [5] für Objekte welche von Hand tragbar sind oder [17] für große Objekte wie Paletten.

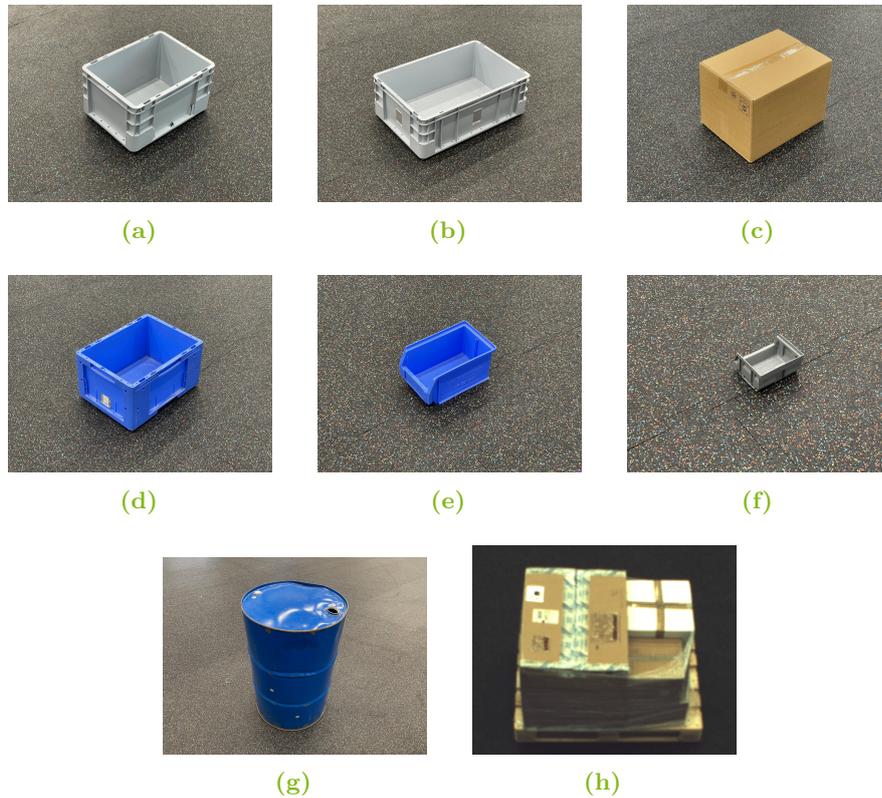
Jedoch herrscht besonders im Rahmen der bereits erwähnten Intralogistik 4.0-Bewegung ein Wandel vor, welcher diese an Bedeutung verlieren lässt. Unter dem Leitsatz „Der ideale logistische Raum ist leer“ [4] werden dabei zunehmend Prozesse und Verfahren etabliert, welchen die Rigidität einer Fließbandlinie schaden würde. Auch die Notwendigkeit eines ortsfesten Geräts ist in diesem Falle hinderlich, da dieses die Menge möglicher Materialflüsse reduziert.

Zudem würde die Alternative – die manuelle Ermittlung der Volumina aller Objekte – hierbei die Notwendigkeit der Einführung eines dedizierten Arbeitsschrittes zur Volumenerfassung implizieren.

## 1 Einleitung

---

Daher strebt diese Arbeit an eine Alternative zu den aktuell verfügbaren automatischen Volumenerfassungssystemen vorzustellen. Dieses soll möglichst universell für gängige logistische Entitäten funktionieren und zudem die kleinstmögliche Auswirkung auf den Materialfluss haben.



**Abbildung 1.1:** Zur Evaluierung verwendete Entitäten: (a) kleiner grauer KLT, (b) großer grauer KLT, (c) Karton, (d) blaue Fleischkiste, (e) großer Sichtlagerkasten blau, (f) kleiner Sichtlagerkasten grau, (g) Fass, (h) Palette mit Kisten, gewickelt

Eine Auswahl solcher logistischer Entitäten sind in Abbildung [1.1](#) abgebildet. Diese sind in zwei Kategorien einteilbar. Zum einen gibt es Objekte, welche eine standardisierte Größe haben. Darunter zählen die Kleinladungsträger (kurz KLT) (a) und (b), welche dem Standard für Euronormbehälter (oder Euroboxen) folgen [\[37\]](#), Fleischkisten, welche dem entsprechenden DIN Standard folgen [\[12\]](#), sowie die Palette (h), welche dem Standard für Europaletten [\[13\]](#) entspricht. Zum Anderen gibt es gängige Objekte unbestimmter Größe. Darunter zählen das Fass (g) sowie der Karton (c). Neben logistischen Entitäten soll das System optimalerweise allgemein für Objekte anwendbar sein. Dazu werden zusätzlich die kleinen Kisten (e) und (f) betrachtet.

## 2 Technologien

Wie bereits zuvor erwähnt ist die Ermittlung von Volumina eine existente Problemstellung in der Industrie, derer sich kommerzielle Lösungen bereits annehmen. Doch auch außerhalb der Logistik sind verschiedene Arten der Erfassung von Objekten verbreitet. Im Folgenden werden einige dieser Ansätze und ihre Komponenten genauer beleuchtet.

### 2.1 Punktwolkenermittlung

Unter „Erfassung von Objekten“ können diverse Arten der Erkennung und Analyse von Objekten verstanden werden. Im Kontext der vorliegenden Problemstellung ist mit dem Wort „Erfassung“ besonders die physikalische Erkennung, also die Aufnahme von Informationen über den physikalischen Aufbau des Objekts, gemeint.

Eine Art der Darstellung dieser Informationen ist eine sogenannten Punktwolke. Punktwolken sind als „ein 3D Datensatz aus einzelnen Punkten in einem dreidimensionalen Koordinatensystem“ [40] definiert. Dies bedeutet, dass in diesem Kontext eine Punktwolke eine Menge an 3D-Punkten ist, welche sich auf den erkannten Oberflächen befinden.

Eine Punktwolke ist somit ein Zwischenergebnis in der angestrebten Volumenschätzung. Sie liefert eine Darstellung des erfassten Volumens (also dem darin befindlichen Objekt, dem Boden und weiteren Elementen, welche sich im erfassten Bereich befinden). Sie bietet für sich allein keine Auskunft über Metadaten eines Objekts, wie etwa dessen Volumen. Jedoch ist es unter Anwendung verschiedener Verfahren möglich, solche Daten aus ihr abzuschätzen.

Um eine Punktwolke für ein zu erfassendes Volumen zu erzeugen, gibt es verschiedene Möglichkeiten.

### 2.1.1 Tiefenkameras

Eine Variante der Ermittlung einer solchen Punktwolke ist die Verwendung von kommerziell verfügbaren Tiefenkameras. Ein Beispiel hierfür sind etwa Kameras der Intel RealSense Serie (Abbildung 2.1).



Abbildung 2.1: Intel RealSense D455 Tiefenkamera [10]

Diese Kameras sind eine attraktive Option, da sie leicht und kostengünstig auch in großen Mengen beschafft und eingesetzt werden können. Zudem sind sie in der Regel bereits vom Hersteller kalibriert und können daher direkt eingesetzt werden. Sie bieten außerdem häufig entsprechende Software, aus der sich die Punktwolke der beobachteten Szene, häufig auch mehrfach pro Sekunde, auslesen lässt.

Zur Erkennung von Tiefeninformationen können bei Tiefenkameras verschiedene Technologien zum Einsatz kommen. Üblich sind hierbei sogenannte Stereo-Kamerasysteme, Time-of-Flight oder Structured Light. [16]

Bei Stereo-Kamerasystemen werden zwei Kameras verwendet, welche versetzt zueinander die selbe Szene betrachten. Mittels dieser Perspektiven und gegeben der Position einer Kamera relativ zu der anderen in sechs Dimensionen (Position und Rotation), kann dann die Position einzelner Punkte ermittelt werden. Hierbei ist es notwendig, dass ein Punkt, dessen Position ermittelt werden soll, in beiden Kamerabildern als der selbe Punkt erkannt werden kann. Herausfordernd ist also, Punkte in homogenen Gruppen (also viele Punkte gleicher Farbe) zu unterscheiden. Dies kann grundsätzlich durch das natürlich vorhandene Rauschen von Infrarot-Licht in der Umgebung unterstützt werden. Auch ist es möglich, diese Erkennung durch aktive Infrarot-Projektoren zu unterstützen, welche in der Kamera verbaut sind. [21]

In Time-of-Flight (kurz ToF) Systemen wird statt einer zweiten Kamera eine Lichtquelle (häufig ein Laser-Emitter) verwendet. Diese beleuchtet dann schrittweise die Szene, wobei die Kamera (beziehungsweise ein vergleichbarer Sensor) die Zeit misst, bis das emittierte Licht wieder auf sie trifft. So lässt sich aus der Zeitdifferenz

zwischen aussenden und eintreffen des Lichts, gegeben der Lichtgeschwindigkeit, die Distanz eines Punktes ermitteln. [35]

### 2.1.2 Structured Light

Ähnlich zu Time-of-Flight Kameras kommt auch bei sogenanntem structured-light 3D scanning (auf deutsch auch Streifenprojektion genannt, kurz Structured Light Scanning oder SL-Scanning) nur eine Kamera zum Einsatz. SL-Scanning-Systeme umfassen zudem einen in unmittelbarer Nähe platzierten Projektor. Als Projektor versteht man hierbei entweder einen Medienprojektor oder eine Lichtquelle, welche Licht in einem statischen Muster ausgibt. Dieses statische Muster ist dabei häufig ein einziger Strich, welcher längs über die erfasste Szene projiziert wird.

In beiden Fällen wird das Wissen über das ausgegebene Licht verwendet, um anschließend Informationen aus den durch die Kamera aufgezeichneten Bildern zu ermitteln. Zur Ermittlung einer Punktwolke ist die Aufzeichnung und Analyse einer Serie an solchen Bildern erforderlich.

#### Structured Light mit statischer Lichtquelle

Das simpelste Beispiel für die Funktionsweise mit einer statischen Lichtquelle sind sogenannte 1D-Laser-Wegmessensoren. Bei diesen wird eine statische Lichtquelle, welche einem Laserpointer ähnelt, verwendet. Diese wird gerade nach unten ausgerichtet und trifft so auf den zu erfassenden Punkt. Ein eindimensionaler Lichtsensor, welcher seitlich zu dem Emitter positioniert ist, kann dann erfassen, in welchem Winkel das Licht auf ihn zurückfällt. Dies ist in Abbildung 2.2 visualisiert. So kann für einen Punkt die Distanz zum Sensor erfasst werden.

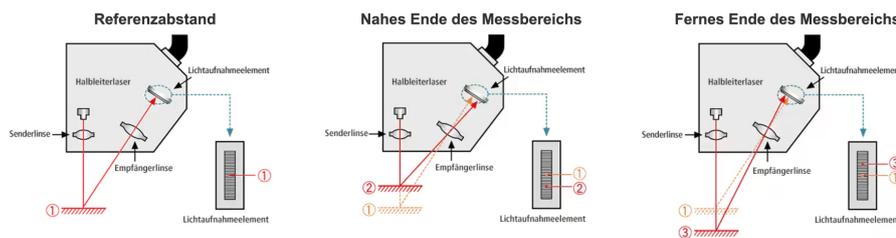


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung eines 1D-Laser-Wegmessensors [1]

Analog lässt sich dieser Prozess mit einem zweidimensionalen Lichtsensor (einer Kamera) und einem Linienprojektor, wie zuvor beschrieben, auf eine Linie an Punkten erweitern. Bewegt man nun entweder das System über ein zu erfassendes

Objekt oder das zu erfassende Objekt unter dem System entlang, so kann eine Punktwolke des gesamten Objekts ermittelt werden. Letzteres ist ein besonders verbreiteter Ansatz für die Erfassung von Objekten auf Fließbändern und wird als solches in kommerziellen Systemen wie [38] eingesetzt.

### Structured Light mit dynamischer Lichtquelle

Bei der Verwendung eines Medienprojektors hingegen muss das erfasste Objekt nicht bewegt werden. Stattdessen wird das projizierte Muster für jedes Bild angepasst. So kann das Verhalten des Musters entlang der Oberfläche des Objektes beobachtet werden, woraus unter Zuhilfenahme von Informationen über die Kamera, über das Muster und über die Position des Muster-Emitters eine Punktwolke abgeleitet werden kann. Dementsprechend spricht man hierbei auch von sogenanntem Coded Structured Light [18], da das Muster Informationen über die relative Position in der Projektion enkodiert.

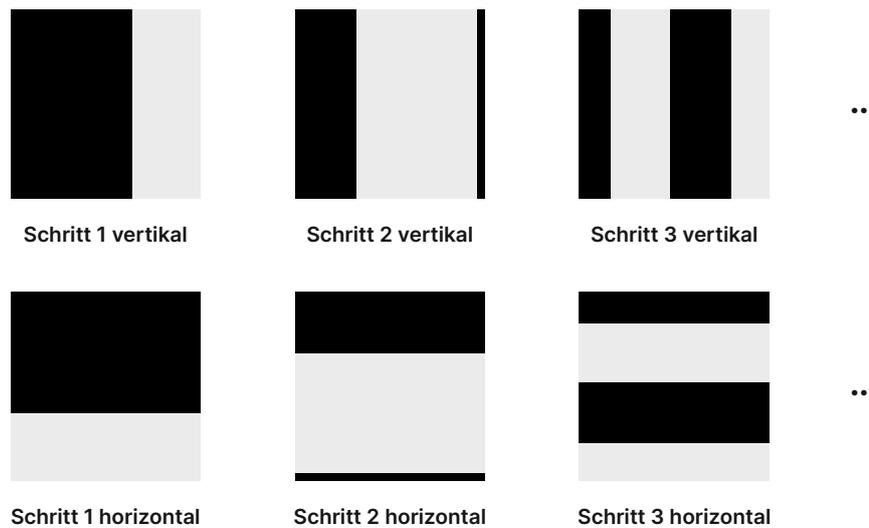
Diese Ableitung, welche auch Rekonstruktion genannt wird, funktioniert durch sogenannte Triangulierung. Dabei wird für jeden Punkt ein Dreieck konstruiert, aus dem sich die 3D-Position des Punktes ergibt. Dies ist möglich, da gemäß der Kongruenzsätze für Dreiecke unter anderem gilt, dass ein Dreieck dann eindeutig konstruierbar ist, wenn zwei Winkel und eine Seitenlänge bekannt sind [34].

Da in dem vorliegenden Fall aufgrund der Kalibrierung die Distanz zwischen der Kamera und dem Projektor bekannt ist, ist bereits eine Seitenlänge des zu konstruierenden Dreiecks bekannt. Diese werde im Folgenden  $c$  genannt. Ferner folgt aus der Kalibrierung der Kamera, dass ein Vektor konstruiert werden kann, welcher ausgehend von der Kamera in Richtung des beobachteten Punktes führt. Berechnet man den Winkel zwischen dem Vektor, welcher von der Kamera zum Projektor zeigt und dem soeben konstruierten Vektor, so erhält man einen Winkel des zu konstruierenden Dreiecks; im Folgenden  $\beta$  genannt.

Zuletzt kann ein Vektor erzeugt werden, welcher von der Position des Projektors entlang des ursprünglichen Projektionspfads führt. Dieser Projektionspfad kann dabei dadurch ermittelt werden, dass die relative Position des Ursprungs des Erfassungsbereichs zum Projektor sowie dessen Breite als Metadaten bei der Aufzeichnung gespeichert werden. Analog zu dem Vektor der Kamera kann aus diesem dann ein weiterer Winkel für das zu konstruierende Dreieck berechnet werden; im Folgenden  $\alpha$  genannt.

Um nun im nächsten Schritt die korrekten Vektoren aus dem Projektor mit denen aus der Kamera zu vereinen, muss das Muster beobachtet werden. Dieses kodiert, wie zuvor beschrieben, für jeden Punkt in der Projektion die eigene Koordinate.

Es gibt verschiedene Arten solcher Musterserien, welche für unterschiedliche Anwendungsfälle von Interesse sein können. In dieser Arbeit wird eine Musterserie verwendet, die die Koordinaten als Graycode kodiert. Diese wurde gewählt, da sie ausschließlich schwarz/weiße Muster erfordert. Muster in Graustufen hingegen würden besondere Anforderungen an den Projektor bedeuten. Vollfarbige Muster könnten zudem auf eingefärbten Objekten (wie etwa (d) und (e) aus Abbildung 1.1) zu Problemen führen.



**Abbildung 2.3:** Auf Graycode-Kodierung basierende Musterserie

Um diese Kodierung nun zu verwenden, werden zunächst in vertikaler und dann in horizontaler Richtung Linien projiziert. Jedes individuelle Muster bildet dabei für jede Koordinate ab, ob die in Graycode kodierte Projektionskoordinate an der Stelligkeit, welche das Muster darstellt, eine Eins ist (indem eine Linie dargestellt wird) oder eine Null ist (indem keine Linie dargestellt wird). So resultiert die in 2.3 illustrierte Musterserie, welche dann in die Szene projiziert werden kann.

Wichtig zu beachten ist an dieser Stelle, dass keine Koordinate entweder eine vollständig aus Nullen bestehende (Bitstring 00000...) oder einen vollständig aus Einsen bestehende (Bitstring 11111...) Kodierung erhalten darf. Dies ist für die darauffolgenden Schritte relevant, da sonst nicht zwischen einem Ort, an dem keine Projektion sichtbar war und einem Ort, an dem eine solche Koordinate ist, unterschieden werden kann.

Ist die Bildserie aufgezeichnet, muss dann erkannt werden, in welchen Bildern welcher Pixel beleuchtet oder nicht beleuchtet war. Dazu wird zunächst für jeden

$$\text{Graycode} = (\text{Dec} \gg 1) \oplus \text{Dec}$$

**Formel 2.1:** Kodierung von Dezimal in Graycode [3]

$$\begin{aligned} h_0 &= \text{Graycode} \oplus (\text{Graycode} \gg 8) \\ h_1 &= h_0 \oplus (h_0 \gg 4) \\ h_2 &= h_1 \oplus (h_1 \gg 2) \\ \text{Dec} &= h_2 \oplus (h_2 \gg 1) \end{aligned}$$

**Formel 2.2:** Dekodierung Graycode in Dezimal [3]

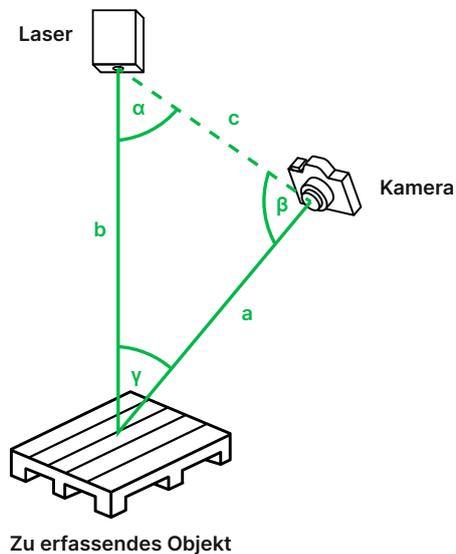
Pixel eine Minimal- und Maximalhelligkeit über die Serie ermittelt. Die daraus resultierende Helligkeitsspanne wird dann mittels eines festgelegten Faktors getrennt. Helligkeitswerte unter dem so ermittelten Pixel-individuellen threshold werden daraufhin als „kein Licht“ (0), Werte darüber als „beleuchtet“ (1) interpretiert. Hieraus entsteht ein Bitstring pro Pixel, welcher basierend auf dem gewählten Muster (also hier der Interpretation als Graycode) in eine Projektionskoordinate zurück übersetzt werden kann. So entstehen die benötigten Paare von Koordinaten im Kamerabild-Koordinatensystem und im Projektions-Koordinatensystem.

Somit lässt sich schließlich das in [2.4] illustrierte Dreieck bilden. Dabei ergibt sich der übrige Winkel  $\gamma$  aufgrund der Innenwinkelsumme von Dreiecken aus  $\gamma = 180 - (\alpha + \beta)$ . Des weiteren folgt aus dem Sinussatz für die Distanz zwischen Kamera und dem beobachteten Punkt  $a = (c / \sin(\gamma)) * \sin(\alpha)$  [32]. Analog folgt für die Distanz zwischen Projektor und dem beobachteten Punkt  $b = (c / \sin(\gamma)) * \sin(\beta)$ .

Um schließlich die Welt-Koordinaten des ermittelten Punkts zu finden, kann der zuvor konstruierte Vektor von Kamera in Richtung des beobachteten Punkts auf die Länge 1 normalisiert (also zum Einheitsvektor gemacht) und anschließend mit der gefundenen Distanz multipliziert werden. Addiert man dann den Stützvektor der Kamera (also die Welt-Koordinaten der Kamera), so resultieren die gesuchten Welt-Koordinaten.

Dieses Verfahren wird für jedes gefundene Paar wiederholt, bis alle Paare verarbeitet wurden. Die Menge an gefundenen Welt-Koordinaten der Punkte bildet die gesuchte Punktwolke.

Zusätzlich kann vor dem Scan ein Bild der Szene im Ausgangszustand angefertigt werden. Dies hat im vorgestellten System keine direkte Verwendung. Es ist jedoch



**Abbildung 2.4:** Illustration des konstruierten Dreiecks. (Illustrationen: <https://thenounproject.com/icon/pallet-308140/> und <https://thenounproject.com/icon/camera-1571225/>)

möglich dieses Bild zur Einfärbung der resultierenden Punktwolke zu verwenden. So kann nachfolgenden Analyseprozessen eine RGB-Punktwolke zur Verfügung gestellt werden.

### 2.1.3 Kamerakalibrierung

Nahezu alle zuvor genannten Systeme verwenden eine Kamera, um Tiefeninformationen ermitteln zu können. Um dies zu ermöglichen sind jedoch zunächst Kalibrierungsschritte notwendig, aus denen Informationen über die Kamera hervorgehen. Zentral sind hierbei die Ermittlung der relativen Position von der Kamera zu anderen in den Systemen involvierten Komponenten sowie gegebenenfalls der Ausgleich von Verzerrungen in Kamerabildern.

Beide dieser Kalibrierungsschritte werden unter anderem in dynamischen Structured Light Systemen benötigt. Daher wird dies im Folgenden als illustratives Beispiel verwendet.

### Ausgleich von Kamerabild-Verzerrung

Aufgrund der Verwendung von Objektiven können die Bilder einer Kamera verschiedene Arten der Verzerrung aufweisen. Da Structured Light Systeme Kamerabilder nutzen, um aus ihnen geometrische Informationen zu erlangen, würden solche Verzerrungen jedoch zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Daher müssen diese zunächst entzerrt werden, bevor sie in weiteren Schritten verwendet werden. Um dies zu ermöglichen sind Parameter erforderlich welche die Kamera und insbesondere das Objektiv beschreiben. Dies sind in der Regel einerseits die Brennweite des Objektivs sowie die optische Mitte des Bildes, jeweils in zwei Dimensionen. Diese Daten bilden die sogenannten intrinsischen Parameter der Kamera.

Um die intrinsischen Parameter einer Kamera zu ermitteln kann eine Serie an Kalibrierungsbildern analysiert werden. Dazu muss auf diesen ein Muster zu sehen sein, für das die relativen Positionen der Punkte in dem Muster bekannt sind. Üblicherweise wird hierfür ein Schachbrettmuster verwendet. Die Punkte sind hierbei die Stellen in dem Muster, an denen sich die Ecken von vier Feldern berühren. Durch die Untersuchung der aus dem Bild ersichtlichen und den zuvor bekannten Positionen der Punkte über eine Bildserie hinweg können schließlich die intrinsischen Parameter inferiert werden. [7]

Mithilfe dieser Parameter können Bilder, welche mit der Kamera angefertigt wurden, schließlich entzerrt und verwendet werden.

### Ermittlung der relativen Position und Rotation einer Kamera

Um die Position von Punkten im dreidimensionalen Raum ausgehend von Kamerabildern zu ermitteln ist es erforderlich auch die Position und Rotation der Kamera in jenem Raum zu kennen. Zu diesem Zweck müssen neben den intrinsischen Parametern auch diese Informationen, die sogenannten extrinsischen Parameter der Kamera, bekannt sein.

Zur Ermittlung der Position einer Kamera existieren verschiedene Ansätze. Zunächst ist es möglich die Position manuell zu ermitteln, etwa durch Vermessung der Position und Rotation relativ zu einem Referenzpunkt.

Ein alternativer Ansatz ist, ähnlich zu der Methodik zur Inferenz der intrinsischen Parametern, die Verwendung von bekannten Mustern. Häufig kommen hierbei sogenannte ArUco Marker zum Einsatz (Abbildung 2.5). Diese lassen sich ebenso leicht erkennen wie die zuvor erwähnten Schachbrettmuster, bieten jedoch die Möglichkeit eine Identifikationsnummer zu enkodieren. [11] Somit ist es möglich mehrere Marker zu unterscheiden.

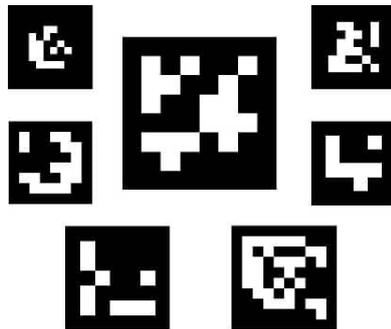


Abbildung 2.5: Beispiele verschiedener ArUco Marker [11]

Um mit diesen nun die Position und Rotation der Kamera zu bestimmen, muss zunächst die Position und Rotation der Marker relativ zur Kamera bestimmt werden. Dies ist unter Verwendung von Algorithmen wie in [27] beschrieben, gegeben der Größe der Marker und den intrinsischen Parametern, möglich. Die resultierende Position und Rotation kann daraufhin in eine homogene Transformationsmatrix überführt werden. Schließlich kann diese Transformationsmatrix invertiert werden. Die resultierende Matrix repräsentiert daraufhin, gemäß der Eigenschaften von homogenen Transformationsmatrizen, die Position und Rotation der Kamera relativ zu dem Marker. [29] Wird der Marker nun so platziert, dass er sich an einer bekannten Position befindet – im Beispiel von dynamischem Structured Light Scanning etwa direkt unter dem Laser – so ist dann auch die Position und Rotation der Kamera bekannt.

#### 2.1.4 Bereinigung der Punktwolke

Nachdem eine Punktwolke vorliegt, muss diese für die weitere Verarbeitung bereinigt werden. Hierzu werden zunächst alle Punkte entfernt, die sich in unter dem Boden befinden, also eine z-Koordinate von kleiner oder gleich 0 haben.

Resultierend verbleiben Punkte welche das erfasste Objekt beschreiben, sowie Punkte, welche fehlerhaft erkannt beziehungsweise errechnet wurden. Nachfolgend sollten also Punkte der letzteren Kategorie, sogenanntes „Noise“ (englisch für Rauschen), entfernt werden. Um diese Aufteilung vorzunehmen können Clustering-Verfahren eingesetzt werden. Clustering-Verfahren sind Verfahren, welche ähnliche Datenpunkte gruppieren, wobei das Maß und die Ermittlung der Ähnlichkeit vom verwendeten Verfahren abhängt. [28]

In dieser Arbeit wird zu diesem Zweck das DBSCAN-Verfahren verwendet. DBSCAN (kurz für „Density-based spatial clustering of applications with noise“) ist ein

sogenanntes dichte-basiertes Clusteringverfahren. Bei diesem wird jeder Punkt der Eingabe (im Fall dieser Arbeit der Punktwolke) betrachtet. Dabei wird nach einem Punkt gesucht, der in einem vordefinierten Radius  $\epsilon$  mindestens  $x$  andere Punkte beinhaltet. Ein solcher Punkt bildet gemeinsam mit den Punkten, welche sich in seinem  $\epsilon$ -Radius befinden ein Cluster. Jene sonstigen Punkte in dem Cluster werden daraufhin auf das gleiche Kriterium ( $x$  andere Punkte in einem Radius von  $\epsilon$ ) untersucht. Erfüllt ein Punkt dieses Kriterium werden die Punkte in seinem  $\epsilon$ -Radius dem selben Cluster hinzugefügt. Erfüllt ein Punkt dieses Kriterium nicht, so verbleibt er im Cluster, jedoch werden keine neuen Punkte aufgenommen. Dies wird für alle Punkte der Eingabe wiederholt. Punkte, welche zu keinem Cluster zugehörig sind, werden als „Noise“ klassifiziert. [9]

DBSCAN unterscheidet sich damit in zwei für diese Arbeit maßgeblichen Eigenschaften von üblichen Clusteringverfahren. Zunächst basiert DBSCAN nicht auf einer Aufteilung des Raumes sondern auf Dichte. Somit müssen nicht alle Punkte einem Cluster angehören. Dies ermöglicht die hier beschriebene Verwendung als Filter für fehlerhafte Punkte. Weiterhin ist der Fokus auf Dichte besonders nützlich, da für jeden tatsächlichen Punkt eines Objekts zu erwarten ist, dass sich weitere Punkte in unmittelbarer Nähe zu diesem befinden.

Um die Bereinigung vorzunehmen wird DBSCAN also auf die Punktwolke angewendet. Dabei werden alle Punkte beibehalten, welche einem Cluster angehören. Alle sonstigen „Noise“-Punkte werden aus der Punktwolke entfernt.

### 2.1.5 Erweiterungen

Das in dieser Arbeit vorgestellte System ist ein Proof-of-Concept, welches zum Ziel hat, die allgemeine Methodik zu validieren. Als solches trifft sie vereinfachende Annahmen und präsentiert die minimale Ausführung des zu validierenden Systems. Dennoch wurde im Design des Systems auch berücksichtigt, dass es komplexere Ausführungen zulässt.

Die folgenden Untersektionen sollen daher einen kurzen konzeptuellen Einblick liefern, wie sich das System erweitern ließe. Sie werden jedoch im Folgenden nicht weiter betrachtet.

#### **Erweiterung des Systems auf mehrere Kameras und Laser**

Die obrige Beschreibung stellt den Ablauf exemplarisch für eine Kamera und einen Laser vor. Ein Vorteil des gewählten Ansatzes ist jedoch seine Erweiterbarkeit auf mehrere Kameras, mehrere Laser oder beides. So lässt sich die erfasste Szene

und daraus resultierend der zu scannende Bereich (sofern vom gewählten Muster unterstützt) nahezu beliebig vergrößern.

Zur Unterstützung mehrerer Kameras wird der oben genannte Prozess so angepasst, dass für jede Projektion von jeder Kamera ein Bild gemacht wird. Der Prozess wird im Anschluss je Kamera durchlaufen, bis schließlich für jede Kamera eine Punktwolke resultiert. Diese Punktwolken können dann durch konkatenieren ihrer Punktlisten zusammengefasst werden. Diese konkatenierte Punktwolke kann daraufhin bereinigt und zur Volumenschätzung verwendet werden.

Die Unterstützung mehrerer Laser hingegen erfordert keine Prozessanpassung. Lediglich ist es hierbei erforderlich, dass aus dem verwendeten Muster hervorgeht von welchem Laser ein gegebener Punkt stammt. Musterunabhängig könnte die Musterserie dazu von jedem Laser einzeln projiziert werden, wobei für jeden Laser und jeden Pixel ein separater Bitstring berechnet wird. Anschließend kann die weiterführende Rekonstruktion pro Laser durchgeführt und die resultierenden Punktwolken durch konkatenieren ihrer Punktlisten zusammengefasst werden. Auch die hieraus resultierende, konkatenierte Punktwolke kann daraufhin bereinigt und zur Volumenschätzung verwendet werden.

### **Erweiterung des Systems zur Unterstützung von mehreren Objekten im Erfassungsbereich**

Wie bereits in [2.1.4](#) angemerkt wird in dieser Arbeit bereits ein Clustering-Verfahren eingesetzt, welches Teile der entstehenden Punktwolke gruppiert. Dies könnte jedoch nicht nur zum Filtern von ungewünschten Punkten verwendet werden. Vielmehr wäre es möglich auf diese Weise mehrere Objekte zu erfassen. Dazu würden die aus der Anwendung von DBSCAN resultierenden Cluster nicht (unter Auslassung der als „Noise“ klassifizierten Punkte) zusammengeführt, sondern stattdessen als separate Punktwolken betrachtet, welche daraufhin einzeln die Prozesse zur Abmessungs- und Volumenschätzung durchlaufen. So können Eigenschaften pro Objekt abgeleitet werden.

## **2.2 Laser**

In den zuvor beleuchteten Punktwolkenermittlungssystemen werden zum Teil Laser verwendet. Die Eigenschaften dieser Systeme sind häufig das Resultat des verwendeten Lasers; genauer der Art des verwendeten Lasers.

Eine Art einen Laser zu verwenden ist ein Punktlaser. Geläufiger in Form eines Laserpointers bekannt, produzieren solche Laser einen gebündelten Lichtstrahl einer (größtenteils) festen Wellenlänge. Lasermodule unterscheiden sich hierbei maßgeblich in zwei Eigenschaften voneinander: der Wellenlänge und der Leistung [39]. Beispielsweise hat ein Laserpointer üblicherweise eine Wellenlänge, die rotem oder grünem sichtbarem Licht entspricht und eine relativ niedrige Leistung. Wohingegen ein Laser zum Schneiden von Werkstoffen eine hohe Leistung bei einer Reihe an möglichen Wellenlängen hat [30].

Um die Leistung von Lasern und die daraus resultierenden Gefahren einschätzen zu können, werden diese in sogenannte Laser(schutz)klassen eingeteilt. Diese sind in der DIN-Norm EN 60825-1 festgelegt. Für Laser der Leistungsstufe eines üblichen Laserpointers sind Klasse 1 (Laser, welche für den bestimmungsgemäßen Gebrauch sicher sind) und Klasse 2 (Laser, welche bei längerer Betrachtung Netzhautschäden verursachen können) relevant. Projektionslaser sowie Laser in Wissenschaft und Forschung hingegen fallen in die Klassen 3R („Gefährlich für das Auge“), 3B („Gefährlich für das Auge und im oberen Leistungsbereich [...] für die Haut“) oder bei besonders starken Lasern in Klasse 4 („Immer gefährlich für das Auge und die Haut [auch] reflektiert“). Daher ist bei dem Betrieb von Lasern, insbesondere wie in diesem Fall in der Industrie, die Klasse der eingesetzten Laser und daraus folgend die Gefahr für Mitarbeitende zu beachten. [6]

Eine weitere Art von Lasern sind solche, die ein festes Muster projizieren, häufig gerade Linien. Diese unterscheiden sich nicht maßgeblich von Punktlasern. Lediglich verwenden sie statt einer zu einem engen Strahl bündelnden Linse eine, welche das gewünschte Muster erzeugt. Man spricht hierbei von einer „ausgedehnten Quelle“, im Gegensatz zu Punktlasern als „fokussierte Quelle“. Dieser Ausdehnung folgend, ist ein Linienlaser gleicher Leistung weniger gefährlich als ein Punktlaser. Daher wird die Klassifizierung bei diesen gemäß Lasernorm EN 60825-1 angepasst. [24]

Weiterhin gibt es Lasersysteme, welche Punktlaser motorisiert ablenken. Solche sogenannten Laser Projektoren werden häufig in der Unterhaltungsbranche eingesetzt. Für diesen Anwendungsfall ausgelegte Projektoren nennt man daher auch Show- oder Entertainmentlaser. Doch auch in der Industrie finden solche Projektoren Anwendung, wie etwa in der Projektion von Hilfslinien oder sonstigen Markierungen auf Werkstücken. Solche Laserprojektoren können entweder einen Punktlaser ablenken oder auch mehrere Laser ansteuern und vor dem Austreten bündeln, um beispielsweise verschiedene Farben darstellen zu können. [14]

Anders als Medienprojektoren können Laserprojektoren über entsprechende Software und Schnittstellen programmatisch gesteuert werden. Diese Steuerung basiert in der Regel nicht auf Pixeln sondern nach Pfaden, entlang denen das Lasersystem den Laserstrahl bewegt.

Um die Geschwindigkeit von Lasersystemen bewerten zu können, wird die Maßeinheit Kilo Point per Second (tausend Punkte pro Sekunde, kurz kpps) verwendet. Diese gibt an, wie viele Bildpunkte pro Sekunde von dem verwendeten Ablenkensystem (auch Scanningsystem) dargestellt werden können. Zusätzlich wird üblicherweise hinter der Angabe der verwendete Test sowie der Abstrahlwinkel angegeben. Letzteres ist relevant, da die Geschwindigkeit des Scanningsystems sich nicht linear zum Abstrahlwinkel ändert. [23]

In dieser Arbeit wird bei kpps Angaben immer der Wert bei einem Abstrahlwinkel von  $8^\circ$  unter Verwendung des ILDA-Testbilds [33] angegeben.

Die Geschwindigkeit des verwendeten Ablenkensystems ist daher von Bedeutung, da bei Laserprojektoren nicht ein bewegter Punkt, sondern Muster sichtbar sein sollen. Um dies zu erreichen, wird die sogenannte Persistenz des Sehens des menschlichen Auges ausgenutzt. Bewegt sich ein Licht ausreichend schnell, etwa entlang einer Linie, so ist nicht mehr das Licht selbst sondern nur noch die Linie als Ganzes erkennbar. Somit ist es also notwendig, dass das Ablenkensystem ausreichend schnell ist diesen Effekt bei möglichst komplexen Mustern zu induzieren. Da die Persistenz des Sehens etwa 250ms anhält, sollte also das Muster mindestens vier Mal pro Sekunde abgefahren werden können. [15]

Auch in Fotos von Projektionen ist es möglich, die erzeugten Muster als Ganzes, anstelle der einzelnen Lichtquelle zu sehen. Dazu ist es erforderlich, dass die Belichtungszeit der Kamera größer ist als die Zeit, welche das Lasersystem benötigt, das gewünschte Muster ein Mal abzufahren.

## 2.3 Abmessungsschätzung

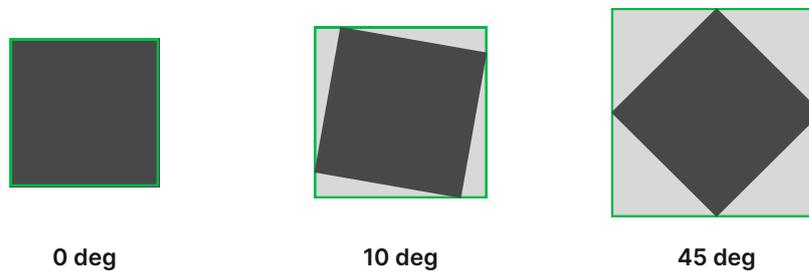
Neben dem Volumen, welches das primäre Ziel dieser Arbeit ist, sind auch die Abmessungen eines Objekts für logistische Prozesse von Bedeutung. Etwa bei der Lagerplanung finden diese Anwendung, um automatisiert entscheiden zu können wo ein Objekt optimal eingelagert werden sollte. Diese lassen sich ebenfalls aus der bereinigten Punktwolke folgern und können zudem für manche Arten der Volumenschätzung verwendet werden, wie in [2.4.1] und [2.4.2] genauer beschrieben.

### 2.3.1 Fitting eines achsenparallelen Quaders

Wie bereits in der Volumenschätzung vorgestellt (vgl. [2.4.1]), können naiv die minima und maxima für jede Achse gebildet werden. Somit resultiert die Breite des Objekts aus  $x_{\max} - x_{\min}$ , die Tiefe des Objekts aus  $y_{\max} - y_{\min}$ , und die Höhe aus  $z_{\max} - z_{\min}$ .

### 2.3.2 Verallgemeinertes Fitting eines Quaders

Während der naive Ansatz zur Abmessungsbestimmung sehr simpel und effizient ist, ist er jedoch auch problematisch in der praktischen Verwendung. Denn durch die Bindung von Objektdimensionen an die Achsen des Koordinatensystems implizieren diese, dass das erfasste Objekt entlang ihnen ausgerichtet ist. Da das Koordinatensystem jedoch aus der Kalibrierung folgt, besteht nicht notwendigerweise ein intuitiver Bezug zum tatsächlichen Raum. Dieser wäre jedoch zur präzisen Anwendung nötig, denn der naive Ansatz ermittelt effektiv einen entlang der Achsen ausgerichteten, virtuellen Umkarton. Dies wird in [2.6](#) illustriert.



**Abbildung 2.6:** Erfasstes Objekt (dunkelgrau) und ermitteltes virtuelles Objekt (hellgrau mit grüner Umrandung) durch Ansatz [2.3.1](#) bei 0°, 10° und 45° Rotation um die z-Achse; Ansicht von oben

Hierbei ist zu erwähnen, dass an dieser Stelle lediglich die Rotation um die z-Achse betrachtet wird. Dies folgt daraus, dass für das in dieser Arbeit vorgestellte System davon ausgegangen wird, dass die zu erfassenden Objekte auf dem Boden stehen, da weiter davon auszugehen ist, dass Böden in industriellen Hallen ebenerdig<sup>1</sup> sind. Als solches verbleibt nur eine Dimension, entlang der die erfassten Objekte rotiert sein können.

Es kann also gefolgert werden, dass zur Abmessungsbestimmung eine Punktwolke vorliegen muss, in welcher das Objekt möglichst Kantenparallel mit den Achsen des Koordinatensystems ist. Ein Ansatz dies zu erreichen ist, die Punktwolke so lange virtuell zu rotieren, bis die resultierenden Abmessungen minimal sind.

Um diese Rotation durchzuführen, muss die bereinigte Punktwolke zunächst entlang der x- und y-Achsen zentriert werden. Dazu muss für die x-Koordinate jedes Punktes  $x' := x - x_{\min} - ((x_{\max} - x_{\min})/2)$  berechnet werden, wobei  $x_{\min}$  der kleinste und  $x_{\max}$  der größte x-Wert der gesamten Punktwolke sind. Analog muss für die y-Koordinate

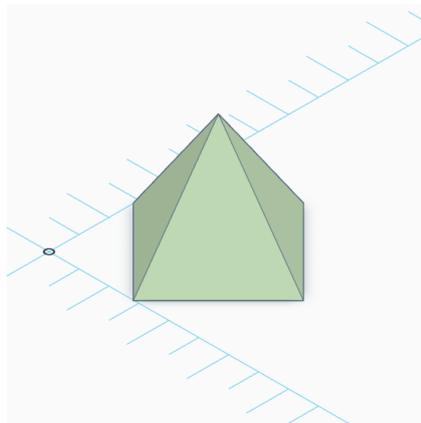
<sup>1</sup>Ebenerdig meint an dieser Stelle, dass kein Gefälle in x- oder y-Richtung vorliegt.

jedes Punktes verfahren werden. Anschließend können die Punkte durch folgende Formel rotiert werden, wobei  $\theta$  der Winkel der Rotation ist. [2]

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}$$

**Formel 2.3:** Rotation eines 2D-Punkts mit Winkel  $\theta$  um den Ursprung. [2]

## 2.4 Volumenschätzung



**Abbildung 2.7:** Im Folgenden zur illustration betrachtetes Objekt als isometrische 3D-Visualisierung

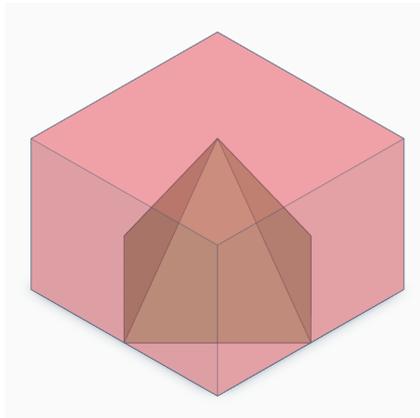
Gegeben einer bereinigten Punktwolke ist es schließlich erforderlich aus dieser ein Volumen zu folgern. Diese Prozesse sehen jeweils die Volumenschätzung für ein Objekt vor. Sofern der Rekonstruktionsschritt zuvor mehr als ein Objekt im Scanbereich erkannt hat, wird der gewählte Volumenschätzungsprozess für alle Teilpunktwolken (also jedes Objekt) separat ausgeführt. Zu diesem Zweck existieren bereits einige Ansätze für verschiedenste Kontexte [8, 25, 20]. Dieses Kapitel beleuchtet daher als Kontext zunächst einige simple Ansätze. Anschließend werden einige komplexere, auf den Kontext angepasste Ansätze vorgestellt.

Um das Resultat mancher Verfahren zu illustrieren, werden isometrische 3D-Visualisierungen der Volumenermittlung am Beispiel einer Pyramide mit quadratischer Basis verwendet. Diese wurde zudem um  $45^\circ$  entlang der z-Achse rotiert, wie in Abbildung [2.7] dargestellt. Die Pyramide stellt zwar keine in der Logistik übliche Form dar, an ihr lassen sich jedoch die Unterschiede der Methoden gut erkennen.

Das Objekt wird im Folgenden hellgrün dargestellt, während das Volumen, welches in die Volumenberechnung eingeht, als rot dargestellt wird. Liegt das Volumen in dem Objekt, so wird das Objekt transparent dargestellt. Analog wird vorgegangen, wenn das Objekt in dem Volumen liegt.

### 2.4.1 Fitting eines achsenparallelen Quaders

Der simpelste Ansatz zur Folgerung eines Volumens aus einer Punktwolke ist, die Abmessungen eines Objekts miteinander zu multiplizieren. Da allerdings in diesem Fall nur eine Punktwolke vorliegt, müssen die Abmessungen zunächst ermittelt werden. Eine Möglichkeit wäre die Verwendung der in [2.3.1](#) ermittelten Abmessungen. So würde beispielsweise das in [Abbildung 2.8](#) illustrierte Volumen bestimmt.



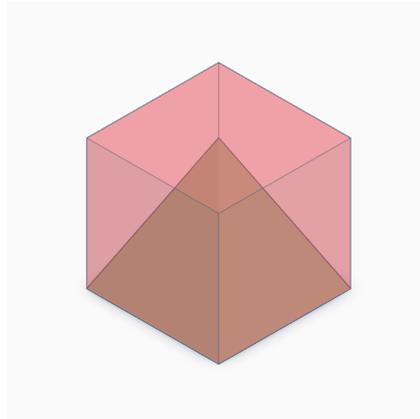
**Abbildung 2.8:** Illustration der Volumenermittlung unter Anwendung des naiven Ansatzes

Es ist erkennbar, dass der bereits in [2.3.1](#) erwähnte Nachteil der Methodik ebenso in der weiteren Verwendung zur Volumenbestimmung fortbesteht. So kann das resultierende Volumen deutlich größer sein, als das tatsächliche Volumen des Objekts. Entsprechend ist dieses Verfahren als ungeeignet einzustufen und wird im Folgenden nicht betrachtet.

### 2.4.2 Verallgemeinertes Fitting eines Quaders

Da der zuvor erläuterte naive Ansatz der Volumenbestimmung das selbe Problem der ihr zu Grunde liegenden naiven Abmessungsbestimmung hat, liegt es nahe die

selbe Optimierung anzuwenden. Die in [2.3.2](#) dargestellte angepasste Methode zur Abmessungsbestimmung resultiert beispielsweise in dem in [Abbildung 2.9](#) illustrierten Volumen.



**Abbildung 2.9:** Illustration der Volumenermittlung unter Anwendung des optimierten naiven Ansatzes

Dieser Ansatz hat zwar eine deutlich geringere Abweichung in Extremfällen, wie etwa dem dargestellten. Jedoch ist immernoch ist deutlich, dass das bestimmte Volumen größer ist als das tatsächliche Volumen des Objekts. Stellt man sich allerdings die Anwendung bei einer in der Logistik üblicheren Form vor, wie etwa bei einem Quader, so hat das ermittelte Volumen bereits nur eine geringe Abweichung vom tatsächlichen Volumen. Dieser Ansatz ist lediglich dann nicht geeignet, wenn das erfasste Objekt, würde man versuchen einen Quader um es zu bilden, in jenem größere Freiräume ließe. Dies wäre beispielsweise für nicht kubische Objekte, wie etwa Fässern, der Fall.

### 2.4.3 Dreidimensionale konvexe Hülle

Die zuvor betrachteten Methoden basierten beide auf der Schätzung von Abmessungen und der darauf basierenden Berechnung des Volumens. Das bedeutet implizit, dass beide Methoden Ansätze sind, einen Quader um das erfasste Objekt zu erzeugen und diesen zu schätzen, wie in [2.4.2](#) erläutert. Ein alternativer Ansatz hierzu wäre jedoch die direkte Betrachtung der Punktwolke.

Es existieren einige Umsetzungen dieses Ansatzes. Im Allgemeinen bilden diese zunächst eine neue Punktwolke, nämlich die konvexe Hülle der vorliegenden Punktwolke. Anschließend wird dann das Volumen berechnet, welches durch die Punkte in dieser neuen Punktwolke eingeschlossen wird.

Dieser Ansatz scheint zunächst optimal, da die Verwendung einer konvexen Hülle bedeutet, dass Objekte beliebiger Form abgebildet werden können. Aus diesem Vorteil folgt jedoch auch der Nachteil dieses Ansatzes. Denn um diese konvexe Hülle korrekt zu berechnen, ist eine möglichst dichte Punktwolke des gesamten Objekts erforderlich.

Aus dem in [3.2](#) beschriebenen Systemaufbau geht jedoch hervor, dass dies mit dem vorgestellten System nicht erreichbar ist. Das ist der Fall, da sowohl der Laser als auch die Kamera nicht für jedes Objekt in der Lage sein können, jede (nicht auf dem Boden befindliche – für diese könnte man aus dem Rest eine Form inferieren) Oberfläche erfassen zu können. Bei einem Karton, welcher exakt unter dem Laser steht etwa, erreicht der Laser ausschließlich die obere Fläche und die Kamera kann höchstens drei Flächen erfassen. Dies reicht für diesen Ansatz nicht aus. Eine solche vollständige Punktwolke könnte mit dem vorgestellten System lediglich durch mehrere Erfassungen des selben Objekts in verschiedenen Positionen auf der Projektionsfläche erreicht werden. Dies jedoch wäre nicht praktikabel, weshalb das hier vorgestellte System zur Lösung gewählt wurde.

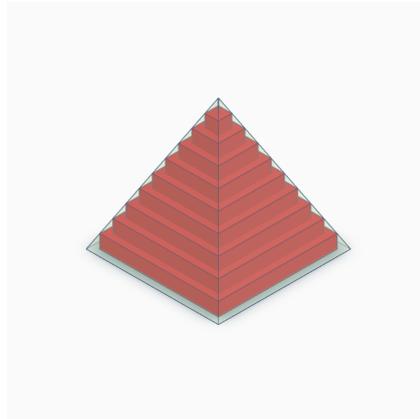
Aus den genannten Gründen ist dieser Ansatz für den Einsatzkontext als ungeeignet zu betrachten und wird im Folgenden nicht weiter betrachtet.

### 2.4.4 Summe konvexer Slices

Aufgrund der zuvor dargestellten Besonderheiten der mit dem vorgestellten System erzeugten Punktwolke, können einige übliche Ansätze zur Volumenbestimmung aus Punktwolken nicht angewendet werden. Um dies zu umgehen, kann eine leichte Abwandlung eines Ansatzes verwendet werden, welcher in [8](#), [19](#) beschrieben wird. Dieser ist nicht allgemein zur Ermittlung von Volumina von Punktwolken geeignet, kann aber mangels dieses Anspruchs auf aus dem Systemaufbau und dem Einsatzkontext resultierenden Metainformationen zurückgreifen.

Dazu werden alle Punkte der Punktwolke zunächst in Gruppen mit ähnlicher  $z$ -Koordinate eingeordnet. Als Ähnlich gelten zwei Punkte dann, wenn sie auf den nächsten Schritt gerundet den gleichen  $z$ -Wert haben. Durch Anpassung dieser Schrittgröße, im Folgenden  $h$ , kann die Präzision angepasst werden. Anschließend werden die Gruppen der Reihe nach betrachtet, wobei immer die Gruppe mit dem größten verbleibenden  $z$ -Wert zuerst betrachtet wird. Aus dieser Gruppe werden dann die Punkte bestimmt, welche eine zweidimensionale Konvexe Hülle für die entsprechenden Punkte bilden. Dann wird der Flächeninhalt der Hülle bestimmt. Dieser Flächeninhalt, multipliziert mit der Schrittgröße  $h$ , wird dann zu dem Gesamtvolumen addiert, welches zu Beginn mit 0 initialisiert wird. Dies

wird nun für jede Gruppe wiederholt, wobei die Punkte, die die konvexe Hülle der vorherigen Gruppe gebildet haben, der Menge an Punkten der Gruppe hinzugefügt werden.



**Abbildung 2.10:** Illustration der Volumenermittlung unter Anwendung des Ansatzes „Summe konvexer Slices“

Nach Betrachtung aller Gruppen resultiert so eine Volumenschätzung, wie in Abbildung [2.10](#) illustriert.

Dieser Ansatz ist eine Abwandlung des Verfahrens zur Bestimmung einer Untersumme, wie sie in der Integralberechnung üblich ist. [\[26\]](#)

Aufgrund der Methodik dieses Ansatzes ist es ausreichend, wenn die obere Fläche eines Objekts erfasst wird. In einem solchen Fall ist die finale Volumenschätzung äquivalent zum Flächeninhalt der erfassten oberen Fläche multipliziert mit der Höhe dieser Fläche. Aufgrund dieser Eigenschaft eignet sich dieser Ansatz besonders für den hier vorliegenden Einsatzkontext des vorgestellten Systems.

## 3 Versuchsaufbau

Im Folgenden soll nun ein System umgesetzt werden, welches mit den zuvor genannten Methoden Volumina von Objekten erfassen kann. Dabei soll besonderes Augenmerk auf dem Anwendungskontext liegen.

### 3.1 Übersicht des Systems

In dieser Arbeit wird ein SL-Scanning basierter Ansatz zur Punktwolkenermittlung verwendet.

Dieser Ansatz wird gewählt, da bei Multikamerasystemen besondere Schwierigkeiten bei der Erkennung von Objekten mit homogener Farbe und Textur, etwa glatten Kunststoffkisten, beobachtet werden. Hinsichtlich der üblichen Objekte, welche ein solches System erkennen müsste, ist dies ein nicht überwindbarer Nachteil.

Diesen Nachteil versuchen Tiefenkamerasysteme, wie zuvor bereits ausgeführt, durch die Projektion von Infrarotmustern auszugleichen. Die Reichweite, auf welcher Kamerasysteme wie die Kameras der Intel RealSense-Reihe Objekte erkennen kann, ist jedoch limitiert. So waren selbst bei dem leistungsstärksten RealSense Modell, in circa acht Metern höhe montiert, bei höchster Leistungsstufe der Infrarot-Emitter keine nützlichen Tiefenmessungen bei der Erfassung von Kartonage mehr auslesbar. Auch aus dem Datenblatt geht eine optimale Entfernung von bis zu sechs Metern hervor [10].

Dies könnte zwar in kleineren Anwendungskontexten oder bei der Montage an Warenein- und ausgangsstellen, etwa über Toren, akzeptabel sein. In der in dieser Arbeit angestrebten flexiblen Anwendung jedoch würde diese Einschränkung für erhebliche Probleme sorgen. So haben Logistikhallen, darunter besonders Distributionshallen, in der Regel eine Deckenhöhe von mindestens 10 Metern [22]. Eine Deckenmontage wäre somit ausgeschlossen, was die Integration im Feld signifikant erschweren würde.

Weiterhin traten im Rahmen der angestellten Versuche Schwierigkeiten bei der Verwendung eines solchen Kamerasystems mit reflektierenden Objekten auf. Dies hat insbesondere bei Folien zu Problemen geführt, welche häufig zur Umhüllung (dem

sogenannten „Wickeln“) von mehreren Objekten auf Paletten verwendet werden. Reflektieren diese nämlich etwa die Arbeitsbeleuchtung oder einfallendes Sonnenlicht, so sind die emittierten Infrarot-Projektionen nicht mehr für eine stabile Tiefenermittlung ausreichend. Somit verliert das System seinen Vorteil gegenüber eines Multikamerasystems.

Wie bereits zuvor erwähnt, existieren zwei Arten von SL-Scanning, wobei eine mit einem Medienprojektor als dynamischen Projektor und eine mit einer Lichtquelle als statischen Projektor arbeitet.

Im Falle des statischen Projektors ist es notwendig, das Objekt oder den Scanner zu bewegen. Dies ist zwar in traditionellen Logistikhallen durch die verbreitete Verwendung von Fließbändern von Nutzen, in der sehr flexiblen Umgebung wie in [1](#) beschrieben jedoch wäre es hinderlich, Objekte bei der Erfassung zwangsläufig bewegen zu müssen. Somit verbleibt nur die Option des SL-Scanning mit einem Medienprojektor. Ähnliche durch die Umgebungshelligkeit resultierende Herausforderungen bestehen jedoch ebenfalls für die Projektoren, welche üblicherweise für SL-Scanning-Systeme verwendet werden.

Daher stellt diese Arbeit einen neuen Ansatz zum Aufbau eines SL-Scanning-Systems vor. Bei diesem wird anstelle eines üblichen Medienprojektors ein Entertainment-Laser verwendet. Dieser hat das Potential durch eine höhere Lichtleistung auch unter starkem Arbeitslicht verwendbar zu sein. Zudem existieren bereits erste kommerzielle Anwender von Entertainment-Laser-Systemen im Logistik-Kontext, welche diese jedoch bislang hauptsächlich zum Zweck der Mensch-Maschine-Interaktion verwenden.

Weiterhin verwendet diese Arbeit den in [2.4.4](#) beschriebenen Ansatz „Summe konvexer Slices“ für Volumenschätzung. Dieser wurde gewählt, da die Ansätze zum Fitting eines Quaders auf eben jene Quaderform begrenzt sind, wodurch komplexere Geometrien wie die des Fasses (g) oder der gewickelten Palette (h) nicht abbildbar wären. Des Weiteren wird der Ansatz „Dreidimensionale konvexe Hülle“ nicht betrachtet, da dieser aufgrund der nur teilweise vorliegenden Punktwolke nicht anwendbar ist.

## 3.2 Aufbau

Das vorgestellte System benötigt im Allgemeinen mindestens einen Entertainment-Laser und mindestens eine Kamera beliebiger Auflösung.

Als Laser kann jeder Entertainment-Laser, der (beziehungsweise bei dem der Laser-Controller) eine Programmierschnittstelle zur Verfügung stellt, verwendet werden. Dieser sollte dann über dem Bereich angebracht werden, in dem Objekte erfasst



**Abbildung 3.1:** FLW Versuchshalle

werden sollen. Dazu ist zu beachten, dass die Projektion besonders die obere Fläche der zu erfassenden Objekte vollständig abdecken können muss. Für die Montage ist relevant, dass die Projektion gerade nach unten erfolgt. Die Seite des Lasers, aus der das Bild projiziert wird, sollte also parallel zum Boden sein.

Als Kamera kann jede digitale Kamera verwendet werden, die es erlaubt mittels einer Programmierschnittstelle ein Bild aufzunehmen und dieses an den Computer zu übertragen. Alternativ kann die Kamera einen kontinuierlichen Video-Feed bereitstellen. Sie sollte so angebracht werden, dass sie zu jedem Zeitpunkt einen möglichst unbeeinträchtigten Blick auf das Projektionsfeld hat. Zudem sollte sie möglichst von oben auf das Projektionsfeld hinab sehen, sodass sie besonders die Oberseite der zu erfassenden Objekte gut aufzeichnen kann. Zuletzt ist empfehlenswert, dass das gesamte Projektionsfeld in der Kamera sichtbar ist. Dies ist deshalb der Fall, da häufig die Auflösung der Projektion kleiner ist als die Auflösung der Kamera. Als solches ist es ohnehin nicht erforderlich die größtmögliche Auflösung der Kamera zur Verfügung zu haben. Mit dieser kann dann stattdessen eine größere Fläche abgedeckt werden, um einen flexibleren Einsatz zu gewährleisten.

Das System wurde in der Versuchshalle des Lehrstuhls für Förder- und Lagerwesen (Abbildung [3.1](#)) aufgebaut. In dieser konnte eine kontrollierte Lichtsituation gewährleistet werden.

Für die folgenden Versuche wurde ein Kvant Laser ClubMax 3000 FB4 RGB S1 Entertainment-Laser mit Saturn 1 90kpps Scanner (Abbildung 3.2a) verwendet. Dieser wurde gerade nach unten gerichtet an Trägern unter der Hallendecke montiert. Mittels einer Leica DISTO S910 wurde ermittelt, dass sich dessen Unterkante 7,541 Meter über dem Boden befand.



(a)



(b)

**Abbildung 3.2:** Physikalische Komponenten des Systems: (a) Kvant Laser ClubMax 3000 FB4 RGB S1 Entertainment-Laser mit Saturn 1 90kpps Scanner und (b) Teledyne DALSA Nano-C2590 Kamera

Des weiteren wurde eine Teledyne DALSA Nano-C2590 Kamera (Abbildung 3.2b) verwendet. Diese wurde entlang einer Stützstruktur unter einem Laufsteg befestigt, sodass ihr Objektiv sich am niedrigsten Punkt 4,803 Meter über dem Boden befindet.

Der Laser wurde dabei mittels des Pangolin BEYOND Software Development Kit (BEYOND SDK) aus der Game-Engine Unity angesteuert. Die Aufnahmen der Kamera wurden mit einem Python-Script gesammelt, wobei jenes zusätzlich über MQTT das zu projizierende Muster an Unity meldete.

### 3.3 Durchführung der Kalibrierung

Zur Kalibrierung der intrinsischen Parameter der Kamera wurde eine Serie an Kalibrierungsbildern aufgenommen und mit OpenCV entsprechend verarbeitet.

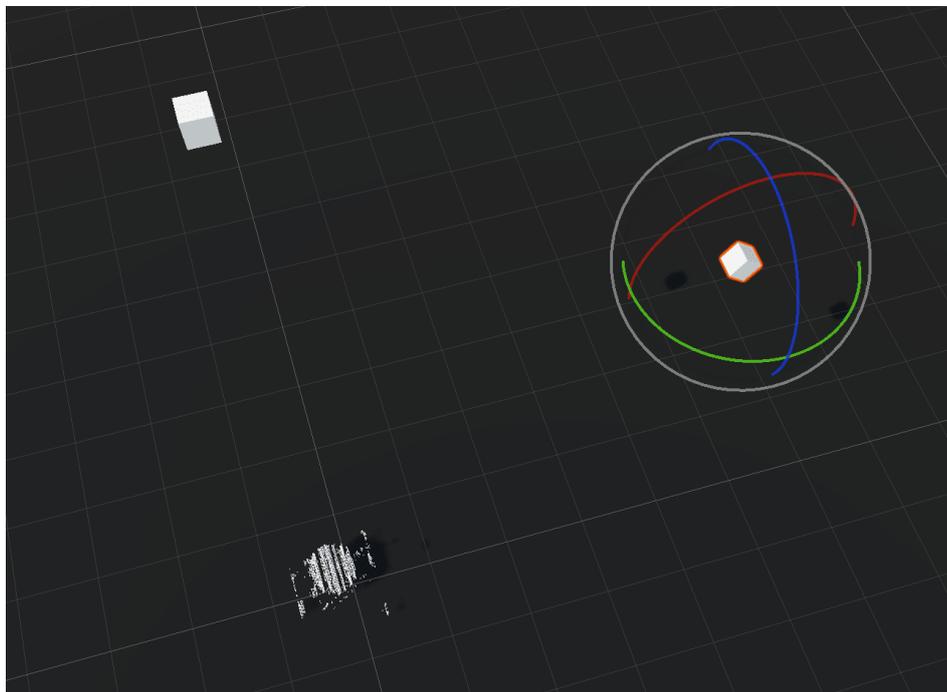
Aufgrund dessen, dass der Laser parallel zum Boden montiert werden muss, ist dessen Rotation bereits bekannt. Für das Welt-Koordinatensystem definiert das System den Punkt auf dem Boden, der genau in der Mitte der Projektionsfläche des Lasers ist. Daraus folgt, dass der Laser eine x- und y-Koodinate von 0 haben muss. Für die z-Koordinate muss schließlich der Abstand vom Laser zum Boden manuell

### 3 Versuchsaufbau

---

gemessen werden. Die Position des Lasers wurde daraus folgend auf (0m, 0m, 7,541m) festgelegt, wobei 7,541 Meter der zuvor angefertigten manuellen Höhenmessung entspricht.

Zur Ermittlung der Position der Kamera wurde der manuelle Ansatz gewählt. Hierzu wurde ein Hilfsprogramm in Unity umgesetzt. Dieses benötigt die von dem Laser beziehungsweise von der Kamera ausgehenden Vektoren als zusammengehörige Paare und kann mittels diesen die resultierende Punktwolke triangulieren und visualisieren. Anschließend können die Position sowie die Rotation der Kamera händisch angepasst werden, um so eine möglichst realitätsgetreue Punktwolke zu erhalten. Die Benutzeroberfläche ist in [Abbildung 3.3](#) zu sehen.



**Abbildung 3.3:** Visualisierung der Punktwolkenrekonstruktion in Kalibrierungs-Hilfsprogramm. Der virtuelle Laser ist oben links zu sehen, die virtuelle Kamera rechts, umgeben von Griffen zur manuellen Rotation. Unten links die resultierende Punktwolke von Experiment I Wiederholung 8.

Dazu wurde der Export der Vektoren in dem Analyseprogramm implementiert und als Beispielmessung Experiment I Wiederholung 8 verwendet. Dieses wurde gewählt, da das analysierte Objekt (Fass (g) aus [Abbildung 1.1](#)) eine runde, gerade Oberfläche aufweist, da anhand dieser verformungen leicht zu erkennen sind.

Die Höhe der Kamera wurde auf die zuvor gemessene Höhe von 4,803 Metern festge-

legt. Zur Ermittlung einer Kalibrierung wurden die x- und y-Koordinaten sowie die Rotation so lange angepasst, bis die Punktwolke einer Reihe an Kriterien entsprach. Diese Kriterien sind, dass (1) sich die Punkte, welche den Boden repräsentieren, sich knapp unter dem virtuellen Boden (dunkelgrau in Abbildung [3.3](#)) befinden, (2) sich die obere Fläche des Objekts parallel zum virtuellen Boden befindet, (3) die obere Fläche des Objekts rund ist und keine Verformung aufweist und (4) die manuelle Messung des Durchmessers der oberen Fläche des Objekts dem des tatsächlichen Objekts entspricht. Die resultierende Position und Rotation wurde schließlich in Form einer homogenen Transformationsmatrix ausgegeben und als Eingabe in das Analyseprogramm verwendet.

## 3.4 Validierung

Die zentrale Motivation des in dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes ist, ein praktikabel einsetzbares System zu schaffen, welches flexibler als die kommerziell verfügbaren Alternativen einsetzbar ist. Um diese angestrebten Eigenschaften zu validieren, sollen einige Aspekte des Systems untersucht werden.

### 3.4.1 Validierung der Basiskonfiguration

Zunächst ist der Basisfall zu untersuchen. Dazu wird für eine Reihe an im Anwendungskontext üblichen Objekten deren Volumen mittels des Systems erfasst. Das Resultat wird anschließend mit einem Ground-Truth-Wert verglichen.

So kann die allgemeine Funktionalität des Systems bewertet werden.

### 3.4.2 Untersuchung der Stabilität

#### Verhalten bei mehreren Aufnahmen der selben Szene

Einige Komponenten im vorgestellten System induzieren auf verschiedene Arten Rauschen in die erfassten beziehungsweise ermittelten Daten. Das simpelste Beispiel hierfür ist die Kamera, welche durch ihr Sensorrauschen bei jeder Aufnahme ein leicht anderes Bild erzeugt. Aber auch der Laser unterliegt aufgrund dessen, dass beispielsweise die Ablenkung des Strahls motorisiert stattfindet, gewissen Toleranzen.

Um dies zu untersuchen wird im Folgenden die selbe Szene unverändert zehn Mal erfasst und verarbeitet. Die Aufnahmen werden dabei sofort hintereinander und ohne intervention durchgeführt, um den Einfluss sonstiger Faktoren zu minimieren.

Da dieser Effekt die Untersuchung jedes Aspekts beeinflussen könnte, werden für alle folgenden Untersuchungen ebenfalls mehrere Aufnahmen sofort hintereinander angefertigt. Die Auswertung des Einflusses des Faktors erfolgt dann auf dem Mittelwert der aus den Aufnahmen entstandenen Daten.

#### **Auswirkung der Position des Objekts im Erfassungsbereich**

Wie in [2.2](#) angemerkt verändert sich das Verhalten von Entertainment-Lasern in Abhängigkeit zu dem Abstrahlwinkel. Weiterhin hat die verwendete Kamera ein Weitwinkel-Objektiv, dessen Verzerrung durch den Kalibrierungsprozess ausgeglichen werden soll. Somit gibt es Faktoren im Erfassungsprozess, welche von der Position der Projektion im Erfassungsbereich abhängig sind.

Würden solche Auswirkungen auftreten, würde dies die Praktikabilität des Systems beeinträchtigen. Daraus folgend wäre es von Vorteil, Objekte zur Erfassung mittig unter den Entertainment-Laser, also an eine vordefinierte Position, zu bewegen. Dies würde den Verlust des Vorteils der Flexibilität des Systems bedeuten.

Zur Untersuchung dieses Effekts wird im Folgenden das selbe Objekt fünf Mal erfasst: Ein Mal mittig unter dem Entertainment-Laser, sowie je ein Mal an jeder Kante des möglichen Erfassungsbereichs (also dem Bereich, der sowohl von der Laserprojektion erreicht wird als auch von der Kamera erfasst wird).

#### **3.4.3 Untersuchung von Genauigkeit und Geschwindigkeit**

##### **Auswirkung des Laserlinienabstands**

Unter Laserlinienabstand ist in dieser Arbeit der Abstand zwischen zwei benachbarten Linien bei der Darstellung eines Musters gemeint. Der Linienabstand ist daher von Interesse, da dieser den Detailgrad der entstehenden Punktwolke bestimmt. Dies folgt aus der Art der Musterauswertung. Effektiv kann bei der Auswertung der Bildserie jeder Punkt im Bild ausgewertet werden, an dem sich mindestens eine Linie der horizontalen Serie und mindestens eine Linie der vertikalen Serie überschneiden haben. Verringert man nun den Abstand der Linien, so sind dementsprechend mehr Schnittpunkte in der selben physikalischen Fläche und daraus folgend mehr Punkte in der resultierenden Punktwolke.

Der Abstand zwischen Linien kann jedoch nicht beliebig klein gewählt werden. Zum Ersten ist kein Qualitätszugewinn zu erwarten, wenn sich benachbarte Linien überlappen. Weiterhin wird somit auch der berechnete Pfad zur Musterdarstellung mit dem Entertainment-Laser länger. Dies sorgt ab einem Punkt dafür, dass der Entertainment-Laser den Pfad nicht mehr ausreichend schnell darstellen kann, um von Menschen oder Kameras als Muster erkennbar zu sein. Zuletzt vergrößert sich so auch der Raum an möglichen Koordinaten in der Projektion. Dadurch werden gegebenenfalls mehr Muster in den Musterserien zur Kodierung benötigt, was die Erfassung, sowie auch die nachfolgende Verarbeitung, verlangsamt.

Daher werden im Folgenden drei Abstände überprüft: 0,01 m; 0,02 m und 0,05 m. 0,01m wurde daher gewählt, da dies etwa der Durchmesser des Laserstrahls ist, wenn er auf dem Boden aufkommt. Dies ist also, wie zuvor erwähnt, der kleinste sinnvolle Abstand. Daraus folgend wurde 0,02m gewählt um zu ermitteln wie sich die Abweichung gegeben einer genauen Halbierung der Liniendichte verhält. 0,05m wurden als größter sinnvoller Abstand gewählt, da das kleinste untersuchte Objekt (f) lediglich 0,052m lang ist und somit schon bei diesem Abstand nur stark positionierungsabhängig<sup>1</sup> erfasst werden kann.

#### 3.4.4 Untersuchung der Robustheit

##### Auswirkung der Rotation des Objekts

Die Rotation des Objekts kann verschiedenste Auswirkungen haben. So wird sie beispielsweise explizit in Verarbeitungsschritten wie [2.3.2](#) auszugleichen versucht. Um die Funktionalität dieser Ausgleichsmethoden zu testen, sollen im Folgenden verschiedene Rotationen des Objekts relativ zur Projektion untersucht werden.

Auch dies ist ein Faktor, der die Praktikabilität des Systems beeinflusst. Ist die Leistung beispielsweise stark von der Rotation abhängig, so müsste dies bei der Anwendung beachtet werden, wodurch etwa Platzierungsprozesse komplexer und zeitaufwendiger würden. Weiterhin wäre von Interesse, sofern die Rotation einen Einfluss auf das Ergebnis hat, wie stark dieser auch bei leichteren Abweichungen ist. Dies könnte eine ungefähre Aussage über das Ausmaß der nötigen Präzision ermöglichen.

Daher werden im Folgenden neben dem Basisfall eine leichte Rotation (a) sowie eine starke Rotation (b) betrachtet. Die starke Rotation um circa 45° wurde als gewählt, da dies den maximalen Fehler beim Fitting eines achsenparallelen Quaders

---

<sup>1</sup>Genau dann, wenn eine Linie entlang der vorderen und eine Linie entlang der hinteren Kante auf das Objekt trifft

erzeugen sollte. Somit stellt dieser Fall den „worst case“ dar. Die leichte Rotation um etwa  $10^\circ$  wurde als Repräsentation des Falles gewählt, in dem grob versucht wurde, das Objekt auszurichten, da in diesem Fall eine nicht all zu starke Abweichung zu erwarten ist. Dieser Aufbau folgt der schematischen Darstellung aus Abbildung [2.6](#).

#### **Auswirkung der Befüllung des Objekts**

In der realen Anwendung sind drei Fälle, welche auf die erfassten Objekte zutreffen, erwartbar. Erstens kann es sich um ein Objekt handeln, welches für sich erfasst werden muss. Dies können etwa Versandkartons oder zu transportierende Objekte selbst sein. Zweitens kann es sich um Objekte handeln, welche in ihrer Funktion als sogenannte Warenträger andere Objekte transportieren, wie etwa KLT oder Fleischkisten. Drittens kann es sich um Warenträger handeln, welche leer sind.

In den letzten zwei Fällen ist es für Prozesse der Lagerplanung von Interesse, dass eine Volumenerfassung nicht von der Befüllung eines Warenträgers beeinflusst wird. Sofern die Ladung also nicht über den oberen Rand des Warenträgers hinausragt, sollten also ungeachtet der Beladung die selben Werte resultieren.

Daher werden im Folgenden drei Fälle untersucht: (a) ein leerer KLT, welcher mit der Öffnung nach oben platziert ist; (b) ein leerer KLT, welcher mit der Öffnung nach unten platziert ist; sowie (c) ein KLT, welcher mit Kabeln befüllt ist. Kabel wurden deshalb als exemplarische Füllung gewählt, da sie, ebenso wie in der Praxis zu erwartende Befüllungen, keine gleichmäßige Oberfläche zur Erfassung bieten. Um den Fall einer gleichmäßigen Oberfläche dennoch zu betrachten, wird Fall (b) untersucht.

#### **Auswirkung der Intensität des Umgebungslichts**

Wie eingangs erwähnt, sorgen die Lichtbedingungen, welche an industriellen Arbeitsplätzen herrschen, für Schwierigkeiten bei Systemen, die durch Lichtemission funktionieren. Ein Grund hierfür ist das verhältnismäßig helle Arbeitslicht, das in Logistikhallen üblich ist. Da der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz für die Projektion der Muster Licht emittieren muss, ist der Einfluss des Umgebungslichts auf diesen von Interesse. So könnten zwei Probleme auftreten. Ist erstens die Lichtquelle des Projektors zu schwach, so können die Muster nicht erkannt werden. Zweitens ist es möglich, dass aufgrund des hellen Umgebungslichts die Belichtungszeit der Kamera niedriger eingestellt werden muss. Ist dies nötig, muss das Muster, welches

der Laser projiziert, entsprechend simpler sein, sodass dieser es in der gegebenen Zeit abfahren kann.

Zur Untersuchung des Effekts sollen daher Aufnahmen unter 100% sowie unter 70% Intensität des in der Versuchshalle installierten dimmbaren Arbeitslicht angefertigt und verglichen werden.

Da außerdem die Reflektivität des betrachteten Objekts für die spätere Erkennung des Musters von Bedeutung sein könnte, werden diese Aufnahmen von zwei Objekten angefertigt. Zum ersten von Objekt (a), einem kleinen KLT, welches aus glattem grauen Kunststoff besteht und daher auftreffendes Licht zu Teilen streut. Zum zweiten von Objekt (c), einem Karton, welcher aus brauner Kartonage besteht und somit Licht nahezu nicht streut.

#### 3.4.5 Messungsdauer

Wie bereits häufiger aus dieser Arbeit hervorging, ist die Dauer der Ermittlung einer Volumenschätzung von erheblicher Bedeutung. Relevant sind hierbei besonders zwei Messwerte: die Dauer der Aufzeichnung der Musterserienprojektion und die Dauer der nachfolgenden Berechnung.

Aus ersterer folgt, wie lang ein Objekt still stehen muss, um eine Erfassung durchzuführen. Allgemein lässt sich hierbei sagen, dass je kürzer die Zeit, je geringer auch die Auswirkung auf das umgebende logistische System. Aus letzterer folgt, wie viel Zeit benötigt wird, bis nach der Erfassung nutzbare Daten über das Objekt bekannt sind. Dieser Faktor hat, anders als der erste, nicht immer eine Auswirkung auf das System. Verwendet das System selbst beispielsweise die erfassten Daten nicht oder erst in einem zeitlich weit später liegenden Schritt, so ist es auch indifferent gegenüber der Bearbeitungsdauer. Für Systeme, welche stark basierend auf den ermittelten Daten agieren, etwa Lagersysteme, ist dieser Faktor jedoch von ebenso großer Bedeutung, wie der erste. Wird beispielsweise mit den ermittelten Daten entschieden, wo das erfasste Objekt gelagert wird, kann die Entscheidung wohin es bewegt werden soll erst bei Vorliegen der Daten getroffen werden. Somit sind in diesen Fällen beide Schritte in Summe von Interesse.

Um dies zu untersuchen, werden im Folgenden bei allen angefertigten Scans beide Zeiten erfasst. So können sowohl die allgemeine Dauer als auch der Einfluss verschiedener Parametrisierungen auf diese ermittelt werden.

### 3.5 Basiskonfiguration und Ground Truth

Zur Durchführung der Validierung werden im Folgenden unter verschiedenen Parametrisierungen angefertigte Scans untersucht. Diese Scans wurden von in dem Anwendungskontext üblichen Objekten angefertigt, welche in Abbildung [1.1](#) aufgeführt werden. Als Vergleichswert wurden zudem für jedes Objekt dessen Abmessungen und das daraus resultierende Volumen händisch ermittelt. Diese Vergleichswerte sind in Tabelle [3.1](#) aufgeführt.

Kurzbezeichnung	Länge [cm]	Breite [cm]	Höhe [cm]	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
(a) kleiner grauer KLT	40,0	30,0	22,0	26.400
(b) größer grauer KLT	60,0	40,0	22,0	52.800
(c) Karton	40,0	29,5	29,5	34.810
(d) blaue Fleischkiste	40,0	30,0	22,0	26.400
(e) großer SLK blau	22,5	13,0	12,0	3.510
(f) kleiner SLK grau	5,2	10,3	5,5	295
(g) Fass	58,0	58,0	88,5	233.824
(h) gewickelte Palette	120,0	80,0	78,0	748.800

**Tabelle 3.1:** Händisch ermittelte Volumina für Objekte aus Abbildung [1.1](#). Volumenermittlung jeweils durch Berechnung von Länge\*Breite\*Höhe, beziehungsweise  $\pi * (\text{Länge}/2) * \text{Höhe}$  bei (g)

Als Basisparametrisierung wurde ein Laserlinienabstand von 0,02m gewählt. Des Weiteren wurde das dimmbare Licht der Versuchshalle auf 100% Helligkeit eingestellt. Die Längen und Breiten der Projektion wurde jeweils dem Objekt entsprechend gewählt und wird pro Versuch angegeben. Als Standard-Objekt wurde Objekt (a), ein kleiner grauer KLT, aufgrund seiner weiten Verbreitung als logistische Entität, seiner Flexibilität bezüglich Ausrichtung und Beladung und seiner Robustheit gewählt. Die verwendeten Objekte wurden im Basisfall mittig unter dem Laser platziert, soweit anwendbar, unbefüllt und mit einer Öffnung nach oben zeigend erfasst und parallel zu der Projektion ausgerichtet. Ferner wurde weiß für die Farbe des RGB Entertainment-Lasers gewählt, um auch bei eventueller Absorption bestimmter Wellenlängenbereiche (etwa bei gefärbten Objekten wie der blauen Fleischkiste) ausreichenden Kontrast erzeugen zu können. Zur Volumenermittlung wurde der in [2.4.4](#) beschriebene Ansatz „Summe konvexer Slices“ verwendet.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

Die zuvor beschriebenen Versuche zur Validierung wurden durchgeführt.

Die verarbeiteten Werte wurden bei jedem Schritt auf die nächste ganze Kubikcentimeter-Zahl abgerundet. Nicht gerundete oder sonst verarbeitete Werte sind jeweils dem Anhang zu entnehmen. Dazu enthält die Beschreibung jeder Tabelle zeilenweise die Bezeichnung des ausgewerteten Experiments.

### 4.1 Vergleich mit der Ground Truth

Gemäß der zuvor beschriebenen Basiskonfiguration wurden alle Objekte zehn Mal erfasst.

Kurzbezeichnung	Vol. $\varnothing$ [cm <sup>3</sup> ]	$\sigma$ [cm <sup>3</sup> ]	Min [cm <sup>3</sup> ]	Max [cm <sup>3</sup> ]
(a) kleiner grauer KLT	43.397	2.671	39.299	47.446
(b) großer grauer KLT	279.222	468.470	45.365	1.499.407
(c) Karton	122.047	174.062	35.034	476.539
(d) blaue Fleischkiste	46.100	3.088	41.187	52.474
(e) großer SLK blau	37.408	1.349	36.051	40.058
(f) kleiner SLK grau	38.224	3.503	34.369	46.767
(g) Fass	470.444	588.980	128.831	1.863.833
(h) gewickelte Palette	813.506	344.288	420.545	1.480.734

**Tabelle 4.1:** Ermittelte Volumina für Objekte aus Abbildung [1.1](#), Ergebnisse aus jeweils zehn Erfassungen. Experimente A, B, C, D, E, F, G und H.

Aus den Daten aus Tabelle [4.1](#) ist zunächst zu erkennen, dass die Standardabweichungen sehr stark variieren. Dies tun sie jedoch nicht kontinuierlich. Stattdessen gibt es die Messungen für (a), (d), (e) und (f) mit relativ kleinen Abweichungen, sowie Messungen (b), (c), (g), (h) mit deutlich größeren Standardabweichungen. Hier läge die Erklärung nahe, dass der Ansatz, besonders gegeben der hohen Abweichung von der händisch ermittelten Ground Truth, für manche Objekte ungeeignet ist. Auch allgemeiner weichen die gemittelten Volumina mit Abweichungen von bis zu 12.857,29% zum Teil sehr stark ab, wie Tabelle [4.2](#) zu entnehmen ist.

Kurzbezeichnung	$\sigma$ [cm <sup>3</sup> ]	Volumen $\varnothing$ [%]	Min [%]	Max [%]
(a) kleiner grauer KLT	2.671	64,38	48,86	79,71
(b) großer grauer KLT	468.470	428,83	14,08	2.739,78
(c) Karton	174.062	250,61	0,64	1.268,97
(d) blaue Fleischkiste	3.088	74,62	56,01	98,77
(e) großer SLK blau	1.349	965,75	927,09	1.041,25
(f) kleiner SLK grau	3.503	12.857,29	11.550,50	15.773,22
(g) Fass	588.980	101,20	44,90	697,11
(h) gewickelte Palette	344.288	8,64	43,83	97,75

**Tabelle 4.2:** Abweichung der ermittelten Volumina aus Tabelle [4.1](#) mit Ground Truth Werten aus Tabelle [3.1](#)

Eine nähere Betrachtung der Abweichungen hingegen zeigt, dass die größten Abweichungen jeweils bei Erfassung der kleinsten Objekte (e) und (f) erkennbar sind. In Hinblick auf die absoluten Messwerte ist deutlich, dass Werte ausschließlich nach oben abweichen. Wäre die Erkennung inkonsistent, wäre jedoch zu erwarten, dass die Messwerte in beide Richtungen abweichen. Hier ist also anzunehmen, dass die Abweichung besonders durch Punkte zustande kommt, welche falsch erkannt wurden, nicht aber durch Probleme bei der Erkennung der Objekte selbst. Dies folgt daraus, dass falsch erkannte Punkte die in der Volumenerfassungsmethode gebildeten konvexen Slices zu ihnen hin vergrößern. Je kleiner nun das Objekt, je größer ist die relative Erweiterung der Oberfläche dieses Slices und somit auch die Abweichung des Volumens.

Betrachtet man weiter die prozentualen Abweichungen, so ist zu erkennen, dass die Minima, mit Ausnahme des Minimums von (h), eine geringere Abweichung haben als die gemittelten Volumina. Dieser Effekt ist besonders dort ausgeprägt, wo eine hohe Standardabweichung vorliegt. Betrachtet man die unverarbeiteten Messungen, so sind in der Regel die meisten Werte nahe des Minimums. Wenige Werte stellen jedoch sehr große Ausreißer in positive Richtung dar. Auch hier ist anzunehmen, dass Cluster an Punkten in der Punktwolke die Slices der Volumenschätzung stark erweitern. Dies wird in [Abbildung 4.1](#) illustriert. Hier sind in rot und gelb Teile des erkannten Fasses (g) erkennbar, wohingegen in blau und grün fehlerhaft erkannte Punkte sichtbar sind.

Folglich lässt sich daraus schließen, dass der vorgestellte Ansatz für die betrachteten Objekte, welche mindestens so groß wie der kleine KLT (a) sind, entgegen der ersten Annahme durchaus geeignet ist. So bewegen sich nicht abweichende Messungen mit etwa 60% um das tatsächliche Volumen, wobei die Abweichungen in aller Regel eher das Volumen überschätzen.



**Abbildung 4.1:** Bereinigte Punktwolke von Experiment I, Wiederholung 8 aus y-Richtung

## 4.2 Untersuchung der Stabilität

Nachdem die grundsätzliche Eignung des Systems geprüft wurde, soll nun weiter untersucht werden, inwieweit verschiedene Faktoren die Qualität der Messungen beeinflussen können.

### 4.2.1 Untersuchung des Verhaltens bei mehreren Aufnahmen der selben Szene

Wie bereits aus der vorherigen Aufstellung ersichtlich, unterscheidet sich das Verhalten über mehrere Aufnahmen der selben Szene hinweg. Insbesondere gibt es Ausnahmen, in welchen die Messungen besonders stark von der tatsächlichen Volumina abweichen. Insofern soll im Folgenden im Detail untersucht werden, wie sich die Messungen über Zeit verhalten.

Tabelle [4.3](#) stellt eine Messung dar, die keine starken Ausreißer beinhaltet. Hier ist ersichtlich, dass die Erfassung grundsätzlich relativ stabile Ergebnisse liefert. Insbesondere scheinen auch direkt aufeinanderfolgende Messungen – nicht nur in diesem Beispiel – häufig nur wenig voneinander abzuweichen. Dies ist ein Indikator dafür, dass die grundsätzliche Erfassungsmethodik über die Zeit hinweg stabil ist und nur wenig von Faktoren wie der Ungenauigkeit des Lasers, dem Rauschen des Kamerabildes oder sonstigen Störfaktoren abhängt.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	37.416
2	38.491
3	38.635
4	37.656
5	40.058
6	36.256
7	36.105
8	36.081
9	36.051
10	37.340

**Tabelle 4.3:** Serie automatisiert ermittelter Volumina für das Objekt (e) aus Experiment E.

Tabelle 4.4 hingegen zeigt ein Beispiel, in dem Ausreißer in der Messserie beobachtet werden konnten. Auch hier bewegen sich die Werte zunächst in aufeinanderfolgenden Messungen in ähnlichen Bereichen, auch wenn die Schwankungen deutlich größer sind. Unterbrochen wird dies jedoch von zwei Messungen, in welchen der ermittelte Wert um bis zu 1.735.002 cm<sup>3</sup> abweicht. Entgegen des sonstigen Musters folgen die Ausreißer jedoch nicht direkt aufeinander, sondern werden von im üblichen Rahmen befindlichen Messungen unterbrochen.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	230.215
2	290.966
3	1.231.124
4	128.831
5	188.752
6	1.863.833
7	187.208
8	150.995
9	169.064
10	263.456

**Tabelle 4.4:** Serie automatisiert ermittelter Volumina für das Objekt (g) aus Experiment G.

Dies zeigt also, dass Ausreißer durch Abweichungen in der Messung, welche nicht ersichtlich sind, resultieren. Weiterhin scheinen diese nicht aus Ereignissen zu resultieren, die kontinuierlich sind. Sonst wäre es nicht zu erwarten, dass der kleinste

Wert unmittelbar auf den zweitgrößten folgt.

Dieses Verhalten ist zwar nicht für die Praktikabilität förderlich, sofern jedoch die Zeit für mehrere Erfassungen vorliegt, kann gemäß dieser Daten durch die Bildung eines Minimums über diese das Volumen dennoch hinreichend gut approximiert werden.

#### 4.2.2 Untersuchung der Auswirkung der Position des Objekts im Erfassungsbereich

Neben Auswirkungen aus der Messung selbst kann auch die Parametrisierung und Kalibrierung des Systems die Ergebnisse beeinflussen. Ein Indikator für einen solchen Einfluss wäre etwa das Verhalten der Messungen unter Veränderung der Position des erfassten Objekts im Erfassungsbereich.

Position	Volumen $\varnothing$ [cm <sup>3</sup> ]	$\sigma$ [cm <sup>3</sup> ]	Min [cm <sup>3</sup> ]
Mittig	826.044	1.177.969	88.244
Vorne im Feld	331.909	450.163	71.948
Hinten im Feld	30.442	2.192	28.937
Links im Feld	101.402	2.858	99.132
Rechts im Feld	635.856	782.304	88.913

**Tabelle 4.5:** Volumenschätzung von Objekt (a) aus Abbildung 1.1 mit Boden nach oben gerichtet an verschiedenen Positionen im Projektionsfeld. Positionen relativ zum Kamerabild. Ergebnisse aus jeweils drei Schätzungen. Experimente J, K, L, M und N.

Zunächst ist deutlich, dass die Messung recht stark durch die Ausreißer beeinflusst wird. Daher wird im Folgenden vor allem das Minimum betrachtet, insbesondere um die Auswirkung in diesen Experimenten mit weniger Wiederholungen auszugleichen.

Zuerst fällt auf, dass die Messung für die Position Mittig im Erfassungsbereich von der in 4.1 vorgestellten abweicht. Da ausschließlich direkt aufeinanderfolgende Messungen betrachtet werden sollten, wurde Objekt (a) für diese Messreihe auch erneut in der Mitte des Projektionsfelds erfasst.

Betrachtet man die Änderung der Werte über die Positionen hinweg, so ist ein deutlich kleinerer Messwert bei der Position hinten erkennbar. Daraus lässt sich schließen, dass der Boden welchen die Kalibrierung impliziert, nicht tatsächlich horizontal verläuft. Stattdessen verläuft dieser nach hinten geneigt, wodurch bei einer Messung hinten im Feld Teile des Objekts unter dem Boden verschwinden.

Analog lässt sich mutmaßen, dass der Boden gemäß der Kalibrierung in die rechte Richtung nach unten geneigt ist.

Von diesen mutmaßlich aus der Kalibrierung entstehenden Abweichungen abgesehen, sind die Messungen über die verschiedenen Positionen hinweg relativ stabil. Somit lässt sich folgern, dass die Erfassung grundsätzlich auch funktioniert, wenn der Laser und die Kamera nicht nur die Oberseite, sondern auch sonstige Seitenflächen erfassen.

### 4.2.3 Untersuchung der Auswirkung des Laserlinienabstands

Weiterhin ist von Relevanz, wie verschiedene Dichten der Musterdarstellung die Erfassung beeinflussen. Dies ist insbesondere entscheidend, da eine Halbierung des Laserlinienabstands die Vervielfachung der Koordinaten im Koordinatenraum der Laserprojektion bedeutet, sofern die erfasste Fläche gleich bleibt. Das wiederum sorgt dafür, dass bis zu doppelt so viele Muster in der Musterserie von Nöten sind, wodurch die Erfassungsgeschwindigkeit deutlich verringert wird.

Linienabstand [m]	Volumen $\bar{V}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\sigma$ [cm <sup>3</sup> ]	Min [cm <sup>3</sup> ]	Max [cm <sup>3</sup> ]
0,01	315.913	490.487	62.398	1.644.205
0,02	43.397	2.671	39.299	47.446
0,05	557.869	1.494.482	56.435	4.807.248

**Tabelle 4.6:** Volumenschätzung von Objekt (a) aus Abbildung 1.1 mit verschiedenen Linienabständen, jeweils Mittel aus zehn Schätzungen. Experimente O, A und P.

Betrachtet man erneut die Minima der Messungen, so ist direkt ersichtlich, dass 0,02 m die geringsten Abweichungen von dem tatsächlichen Volumen aufweist. Dies bestätigt die Auswahl dieses Werts als Parameter für die sonstigen Experimente.

Ein schlechteres Ergebnis liefert der Abstand von 0,05 m. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass die fehlende Präzision dafür sorgt, dass das Objekt größer geschätzt wird, als es tatsächlich ist. Ist etwa ein Objekt genau 10 cm breit, so könnte es entweder drei Mal (einmal ganz links, einmal ganz rechts und einmal genau mittig) vom Laser erfasst werden und somit als 10 cm breit erkannt werden, oder es könnte zwei Mal getroffen werden (beispielsweise 2,5 cm und 7,5 cm von der linken Kante entfernt) und somit als 5 cm breit erkannt werden. Ein höherer Laserlinienabstand sorgt somit also für eine höhere Varianz in den Messergebnissen.

Das schlechteste Ergebnis liefert der Abstand von 0,01 m. Dies widerspricht den Annahmen, die intuitiv über das System getroffen werden würden, da dabei eine

höhere Präzision (von den zuvor beschriebenen Seiteneffekten abgesehen) zu erwarten wäre. Anstelle dessen lassen sich zwei Vermutungen aufstellen, wegen denen das Ergebnis schlechter als erwartet ausfallen könnte.

Einerseits könnte die steigende Komplexität für eine schlechtere Musterdarstellung des Lasers sorgen. Werden Muster etwa nicht vollständig dargestellt, so kann dies zu zum Teil signifikanten Abweichungen führen, wenn so Punkte in einer Koordinate um  $2^x$  von ihrer tatsächlichen Koordinate in der Rekonstruktion abweichen, wobei  $x$  hierbei von der von dem Muster repräsentierten Stelligkeit abhängt.

Weiterhin ist es möglich, dass die größere Menge an Licht in der Szene etwaige Auswirkungen von Reflektionen verstärkt. Da die Verdopplung der Liniendichte auch die Verdopplung der Lichtleistung bedeutet, kann auch dies eventuell starke Auswirkungen haben. So könnten umliegende Bildpunkte durch die Reflektion als beleuchtet interpretiert werden, was die Bestimmung ihrer Koordinaten verfälschen würde.

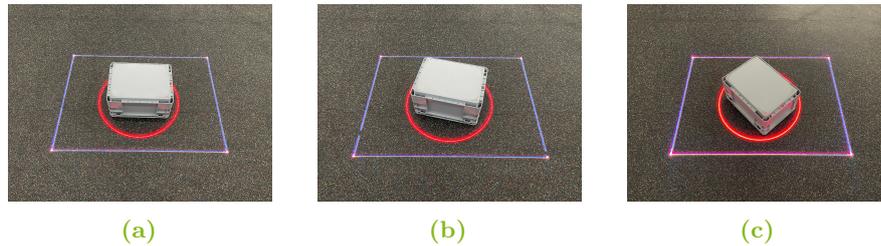
## 4.3 Untersuchung der Robustheit

Neben den direkt aus dem System resultierenden Faktoren, welche eine Messung verfälschen könnten, existieren in der Praxis weitere Faktoren, die besonders in der tatsächlichen Anwendung des Systems auftreten. Im Folgenden wird daher die Robustheit des Systems gegen diese Faktoren untersucht.

### 4.3.1 Untersuchung der Auswirkung der Rotation des Objekts

Ein Faktor, der mutmaßlich häufig in der Anwendung zum Tragen kommen könnte, wäre der der Rotation des Objekts relativ zum Scanbereich. Abbildung 4.2 zeigt die zu diesem Zweck untersuchten Rotationen. Die Durchführung des Experiments ergab die in Tabelle 4.7 aufgeführten Ergebnisse.

Um den Effekt von Ausreißern auszugleichen werden die Minima betrachtet. Hierbei wird deutlich, dass Rotation nur eine sehr geringe Auswirkung auf die Messungen zu haben scheint. Zwar weichen die Ergebnisse voneinander ab, dies ist jedoch innerhalb der auch in den vorhergegangenen Experimenten beobachteten und somit zu erwartenden Schwankungen. Weiterhin scheinen mit der gewählten Methodik zur Volumenschätzung tatsächlich die Effekte des Fittings eines achsenparallelen Quaders nicht aufzutreten, da sonst ein Anstieg der gemessenen Werte bei größeren Rotationen zu erwarten gewesen wäre.



**Abbildung 4.2:** Mit dem Boden nach oben gerichteter kleiner KLT in verschiedenen Rotationen: (a) keine, (b) etwa  $10^\circ$ , (c) etwa  $45^\circ$ . Roter Kreis markiert die Position des KLT im Scanbereich.

Rotation	Volumen $\varnothing[\text{cm}^3]$	$\sigma [\text{cm}^3]$	Min $[\text{cm}^3]$
(a) $0^\circ$	826.044	1.177.969	88.244
(b) ca. $10^\circ$	240.154	273.766	80.008
(c) ca. $45^\circ$	88.001	5.614	82.336

**Tabelle 4.7:** Volumenschätzung von Objekt (a) aus Abbildung 1.1 mit verschiedenen Rotationen, jeweils Mittel aus drei Schätzungen. Experimente J, Q und R.

### 4.3.2 Untersuchung der Auswirkung der Befüllung des Objekts

Viele Objekte, welche in dieser Arbeit betrachtet werden, sind sogenannte Ladungsträger. Um sicherzustellen, dass diese bei Einlagerprozessen korrekt erfasst werden, wird dieser Faktor im Folgenden untersucht. Die resultierenden Messungen sind in Tabelle 4.8 abgebildet.

Kurzbezeichnung	Volumen $\varnothing[\text{cm}^3]$	$\sigma [\text{cm}^3]$	Min $[\text{cm}^3]$	Max $[\text{cm}^3]$
leer	43.397	2.671	39.299	47.446
befüllt	40.195	2.193	37.295	43.649
umgedreht	194.061	361.280	34.203	1.184.765

**Tabelle 4.8:** Volumenschätzung von Objekt (a) aus Abbildung 1.1 mit verschiedenen Befüllungen, jeweils Mittel aus drei Schätzungen. Experimente A, S und T.

Missachtet man auch hier die Ausreißer und analysiert die Spalte der Minima, so sind auch hier keine Auswirkungen der verschiedenen Fälle sichtbar, welche über die sonst zu erwartenden Schwankungen hinaus gehen. Zwar scheint der Fall, in welchem der KLT umgedreht wurde, stark abzuweichen, auch für diesen ist allerdings aus den rohen Messdaten in Tabelle A.20 ersichtlich, dass dieser nicht signifikant von den sonstigen Messungen abweicht. Da die Befüllung nicht über den oberen Rand des KLT hinausragt, entspricht ebenfalls die Gleichheit dessen Messwert mit

den sonstigen Fällen der Erwartung. Es lässt sich also sagen, dass das System unempfindlich bezüglich des Befüllens von Ladungsträgern ist.

### 4.3.3 Untersuchung der Auswirkung der Intensität des Umgebungslichts

Die Robustheit im Bezug auf die Umgebungshelligkeit hängt von verschiedenen Faktoren ab. Im Falle der kontrollierten Lichtsituation in der Versuchshalle sind hierbei vor allem, neben der Helligkeit der Beleuchtung selbst die Kamera und der Laser von Relevanz. Zur Untersuchung der Eignung des Systems wurden von zwei Objekten jeweils zwei Messreihen angefertigt, wobei eine unter 70% und die andere unter 100% Intensität des Hallenlichts durchgeführt wurden. Um Effekte aufgrund von gestiegenen Einflüssen von Reflektionen in relativ dunkleren Umgebungen erkennen zu können, wurden ein KLT aus glattem Kunststoff und ein Karton aus Kartonage untersucht, wobei letzterer weniger reflektierend ist. Die Ergebnisse dieser Messreihen sind in Tabelle 4.9 aufgeführt.

Kurzbezeichnung	Dimmstufe	Volumen $\varnothing$ [cm <sup>3</sup> ]	$\sigma$ [cm <sup>3</sup> ]	Min [cm <sup>3</sup> ]
(a) kleiner KLT	70%	59.352	39.289	40.481
(a) kleiner KLT	100%	43.397	2.671	39.299
(c) Karton	70%	111.173	90.441	36.655
(c) Karton	100%	122.047	174.062	35.034

**Tabelle 4.9:** Volumenschätzung von Objekten aus Abbildung 1.1 unter verschiedenen heller Beleuchtung, jeweils Mittel aus zehn Schätzungen. Experimente U, A, V und C.

Bei Betrachtung der Werte fällt auf, dass die Messreihen, die mit 70% Hallenlichtintensität aufgezeichnet wurden, etwa 1.000 cm<sup>3</sup> größere Messwerte liefern. Zwar liegt auch dies in zu erwartenden Schwankungen der Messung, betrachtet man jedoch die rohen Messwerte, so ist dieses Muster auch dort zu erkennen.

Da die unter 100% Hallenlicht geschätzten Werte näher an der ermittelten Ground Truth liegen, liegt die Vermutung nahe, dass Reflektionen die Genauigkeit in Messungen unter 70% Lichtintensität beeinträchtigen. Dies wird jedoch dadurch widerlegt, dass der Effekt auch bei Objekt (c), welches aus Pappe besteht, auftritt.

Ungeachtet der Ursache hat das untersuchte System jedoch somit das entgegengesetzte Problem zu den alternativ betrachteten Systemen: die Präzision scheint in intensiv ausgeleuchteten Umgebungen zu steigen. Dies erhöht die Praktikabilität des Systems maßgeblich.

## 4.4 Untersuchung der Messungsdauer

Die Dauer zur Durchführung einer Volumenschätzung hängt von zwei Parametern ab. Diese sind die Größe des zu erfassenden Objekts und der gewünschte Laserlinienabstand. Beide Parameter verändern jedoch effektiv die selbe relevante Größe: die Größe des Koordinatenraums der Laserprojektion.

Bei der Aufzeichnung der Messserie ist die Größe des Koordinatenraums relevant, da ein größerer Koordinatenraum gegebenenfalls eine längere Musterserie und somit zusätzliche Aufnahmen bedeutet. Eine Aufnahme dauert mit dem eingesetzten System etwa eine Sekunde (circa 1090 ms). Somit lässt sich die benötigte Zeit mit der Formel  $\log_2(w) + \log_2(h)$  berechnen, wobei  $w$  die Breite und  $h$  die Höhe des Koordinatenraums ist.

Bei der nachfolgenden Rekonstruktion und Volumenberechnung ist die Größe des Koordinatenraums relevant, da ein größerer Koordinatenraum tendenziell zu einer Punktwolke mit mehr Punkten folgt. Die benötigte Zeit lässt sich jedoch nicht direkt berechnen. Dies hat verschiedene Gründe. Zum Ersten ist die Auflösung der Kamera relevant. Die resultierende Punktwolke kann aufgrund der Rekonstruktionsmethodik maximal so viele Punkte haben, wie die Bilder der Musterserie Pixel haben. Bei zunehmend größeren Koordinatenräumen flacht also die benötigte Zeit ab. Zum Zweiten ist die Menge an Punkten in der Punktwolke davon abhängig, wie viel der Musterprojektion im Kamerabild sichtbar ist. Bei Erfassung eines Fasses etwa verdeckt das Fass mehr von der hinter ihm liegenden Projektion als dies etwa ein Sichtlagerkasten tun würde. Somit müssen verschieden viele Punkte rekonstruiert und verarbeitet werden, was die benötigte Zeit beeinflusst.

Exemplarisch werden in Abbildung 4.3 die benötigten Zeiten in beiden Schritten für jeweils einer Wiederholung von drei Experimenten dargestellt. Die konkreten Messungen wurden jeweils so ausgewählt, dass sie keinen Ausreißer darstellen. Des Weiteren wurden einmalige Startzeiten, wie die Zeit zum Initialisieren der Kameras vernachlässigt. Die Zeiten für die Volumenschätzung wurden auf einem MacBook mit Intel Core i7 6-Core 2,6 GHz CPU und 16 GB Arbeitsspeicher durchgeführt.

F 1	11 Sekunden	11 Sekunden	22s
I 8	13 Sekunden	13,5 Sekunden	26,5s
H 1	14 Sekunden	17 Sekunden	31s

**Abbildung 4.3:** Darstellung der benötigten Zeit zur Schätzung des Volumens von Experiment (a) F Wiederholung 1, (b) I Wiederholung 8 und (c) H Wiederholung 1. Grau: Dauer der Aufzeichnung der Messserie, Grün: Dauer der Volumenschätzung

Betrachtet man nun (a), die Erfassung des kleinen SLK und somit die Volumenschätzung des kleinsten betrachteten Objekts, und (c), die Erfassung der gewickelten Palette und somit die Volumenschätzung des größten betrachteten Objekts, so wird deutlich, dass die benötigte Zeit nicht besonders stark abweicht. Es kann also gesagt werden, dass das Volumen jedes in der Logistik üblichen Objekts von dem System – in der hier verwendeten Basiskonfiguration – in etwa einer halben Minute geschätzt werden kann. Dabei ist es erforderlich, dass ein Objekt maximal 14 Sekunden still steht, während die restliche Zeit auch später und asynchron ermittelt werden kann.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde zunächst die Anwendung und der Bedarf für Volumenerfassung in logistischen Prozessen dargestellt. Dabei wurde vor allem ein Fokus auf Lagerhaltung, Planung und Transportwesen deutlich, wobei Geschwindigkeit und Zeiteffizienz von besonderer Relevanz waren. Weiterhin wurden bestehende automatisierte und semiautomatisierte Methoden zur Volumenschätzung, welche bereits in der Logistik eingesetzt werden, untersucht.

Im Anschluss wurden verschiedene Methoden zur Ermittlung von Tiefeninformationen betrachtet und ihre Funktionsweise näher erläutert. Zudem wurde vorgestellt wie Punktwolken, die aus den zuvor genannten Methoden resultierten, bereinigt werden können. Für diese bereinigten Punkte wurden dann Methoden zur Abmessungs- und Volumenschätzung eingeführt.

Daraufhin wurde ein System konzipiert, welches, mithilfe der Methodiken, Volumina von logistischen Objekten schätzen soll. Hierbei wurden diese Methodiken verglichen und jeweils die für den Anwendungsfall angemessensten Komponenten bestimmt. Dieses System wurde praktisch umgesetzt und zur Validierung Experimente konzipiert, mit welchen das System sowohl bezüglich seiner Parametrisierung, als auch im Vergleich mit den eingangs erwähnten kommerziell verfügbaren Lösungen verglichen werden konnte.

Schließlich wurden diese Experimente durchgeführt, ausgewertet und die Ergebnisse dieser interpretiert. Hieraus ergab sich, dass das System für kleine Objekte bisher ungeeignet ist, da bei diesen Abweichungen von mindestens 927% resultierten. Für Objekte ab der Größe eines kleinen KLT (a) hingegen konnten Ausreißer-Korrigierte Abweichungen von unter 100% für alle Messungen, bei einer Messungsdauer von maximal 31 Sekunden, festgestellt werden. Weiterhin konnten Auswirkungen durch die Rotation und die Befüllung des erfassten Objekts, sowie unerwünschte Auswirkungen des Umgebungslichts nicht festgestellt werden. Es ergab sich jedoch aufgrund der Auswirkung der Position des erfassten Objekts im Projektionsbereich, dass die Kalibrierung nicht ausreichend präzise ist. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Frequenz von Ausreißern in den Messergebnissen die Praktikabilität des Systems einschränkt.

Zusammenfassend stellt sich daher die Frage, ob das System eine angemessene Alternative zu den kommerziellen Lösungen darstellt.

---

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass der vorgestellte Ansatz im allgemeinen funktionsstüchtig ist. Des Weiteren ist dieser aufgrund seiner technischen Anforderungen leicht in der Praxis einführbar, da manche Unternehmen die nötige Hardware bereits in Logistikhallen verbauen. Zudem ist das System sehr praktikabel, da es beliebige Objekte erfassen kann, welche, ohne weitere Anforderungen an ihre Ausrichtung oder Position, für mindestens 14 Sekunden (für das größte betrachtete Objekt) still stehen.

Gegen eine Einführung des Ansatzes sprechen jedoch zum aktuellen Stand vor allem drei Faktoren: die Ausreißer, die Präzision und die Kalibrierung. Die Ausreißer stellen dabei aktuell die größte Herausforderung dar. Diese traten, wenngleich nicht immer, in einem Großteil der Messserien auf. Wie bei der Auswertung der Experimente deutlich wurde ist eine Lösung gegen diese Ausreißer die mehrfache Wiederholung der Messung mit anschließender Bildung eines Minimums. Dies ist zwar eine umsetzbare Lösung, würde jedoch die Scandauer und somit die erforderliche Zeit, die ein Objekt in Ruhe sein muss, erhöhen. Dies sorgt für große Auswirkungen auf Materialflussprozesse und damit für eine geringere Praktikabilität.

Ähnlich verhält es sich mit der Präzision. Betrachtet man lediglich die Minima der Messreihen, so können die Volumina je nach Anwendungskontext bereits ausreichend sein. Hinzu kommt, dass das tatsächliche Volumen in den meisten Fällen kleiner war, als das gemessene. Somit könnten die durch das System erzeugten Daten zumindest zur Einhaltung von Obergrenzen eingesetzt werden. Die Ausnahme hierzu bilden große Objekte wie das Fass (g) und die gewickelte Palette (h), deren Volumina auch unterschätzt wurden.

Zuletzt wäre eine bessere Kalibrierung notwendig, sodass die Position des Objekts im Scanbereich einen kleineren Einfluss auf das Ergebnis hat. Dies würde sich zusätzlich positiv auf die Präzision des Systems im Allgemeinen auswirken.

Trotz der genannten Faktoren lässt sich sagen, dass es verschiedene Wege gibt, auf die sich die Leistung des Systems sehr wahrscheinlich verbessern ließe. Zunächst könnte die Punktwolkenbereinigung verbessert werden. Da sonstige Störfaktoren wie Reflektionen des Objekts selbst ausgeschlossen werden konnten, und Ausreißer auch ohne Veränderung der Szene auftraten, sind fehlerhaft erkannte Punkte sehr wahrscheinlich Auslöser für die resultierenden Abweichungen. Gegebenenfalls könnten hierzu Alternativen zu DBSCAN evaluiert werden. Weiterhin könnte die Scangeschwindigkeit erhöht werden. In dem aktuellen System wird die Dauer des Scans maßgeblich davon bestimmt, dass das Programm zur Bildserienerfassung nach Wechsel des zu projizierenden Musters eine feste Zeit wartet um so sicherzustellen, dass die Projektion bereits umgeschaltet wurde. Eine engere Integration in das Lasersystem würde dies lösen und könnte so die Erfassungszeit deutlich verkürzen. Zuletzt

könnte die Kalibrierung verbessert und gegebenenfalls optimiert werden. Dazu sollten die vorgestellten Ansätze re-evaluiert werden, um eine autonome Kalibrierung zu ermöglichen.

Abschließend sei erwähnt, dass das Potential weiterer Forschung nicht nur in der Behebung aktuell existenter Schwachstellen liegt. So wäre es beispielsweise möglich, durch die Erweiterung auf mehrere Kameras und mehrere Laser, das erfassbare Feld zu erweitern. Dies würde nicht nur den Einfluss auf Materialflüsse durch gestiegene Flexibilität des Erfassungsorts weiter verringern. Zusätzlich könnten so etwa die aktuell verdeckten Oberflächen eines Objekts aus anderen Perspektiven erfasst und ebenfalls analysiert werden, was die Präzision bei komplexen Objekten erhöhen könnte.

## A Daten und Quellcode

### A.1 Rohdaten der Auswertungen

In der vorangegangenen Arbeit werden Daten häufig nicht direkt, sondern als Mittelwert aus verschiedenen Messungen angegeben. Daher werden im Folgenden die unveränderten Volumina, welche durch das Programm ausgegeben wurden, aufgelistet. Die Auflistung erfolgt in der Reihenfolge des Erscheinens in Kapitel 4.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	41.759,94170230189
2	47.446,05066587711
3	39.299,91258383531
4	42.535,76491249696
5	46.566,88800623084
6	42.217,59040860117
7	40.597,50635294213
8	44.185,29021887268
9	46.172,47811084251
10	43.199,78544880434

**Tabelle A.1:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment A: Erfassung eines kleinen grauen KLT (Objekt (a)) mittig unter dem Laser positioniert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	50.646,46846406588
2	46.275,918609743174
3	45.365,183324911195
4	50.596,11744578925
5	1.499.407,3215105457
6	610.939,8063756834
7	48.174,90913175859
8	341.779,4120672035
9	51.147,2486844488
10	47.897,79226976216

**Tabelle A.2:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment B: Erfassung eines großen grauen KLT (Objekt (b)) mittig unter dem Laser positioniert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	37.115,11390759845
2	38.856,08529074134
3	39.891,14489308589
4	40.915,4544853069
5	44.860,47050997482
6	42.6485,3569765333
7	40.321,78480368647
8	40.455,148121696235
9	35.034,199052068645
10	476.539,24299939256

**Tabelle A.3:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment C: Erfassung eines Kartons (Objekt (c)) mittig unter dem Laser positioniert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	52.474,54487125099
2	41.187,4417875855
3	45.603,42793090099
4	44.819,609925022676
5	48.512,95251681438
6	46.836,97327855707
7	43.873,07209945281
8	43.830,74779160642
9	46.125,76081461542
10	47.736,253676965694

**Tabelle A.4:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment D: Erfassung einer blauen Fleischkiste (Objekt (d)) mittig unter dem Laser positioniert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	37.416,86902466351
2	38.491,24099654819
3	38.635,24158648286
4	37.656,09095182621
5	40.058,99934692411
6	36.256,65038242285
7	36.105,66886299652
8	36.081,244987014936
9	36.051,64638255212
10	37.340,15948297379

**Tabelle A.5:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment E: Erfassung eines großen Sichtlagerkastens (Objekt (e)) mittig unter dem Laser positioniert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	34.369,756664998255
2	35.878,439095967035
3	35.092,618957480605
4	38.727,025413106436
5	38.715,08864202767
6	40.316,549030971844
7	36.821,88311603932
8	37.548,70310122636
9	46.767,37846675532
10	38.009,56884014927

**Tabelle A.6:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment F: Erfassung eines kleinen Sichtlagerkastens (Objekt (f)) mittig unter dem Laser positioniert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	230.215,64056914544
2	290.966,7132555386
3	1.231.124,164086414
4	128.831,28071091107
5	188.752,72657913857
6	1.863.833,7977829422
7	187.208,81975661937
8	150.995,28617482976
9	169.064,74691456853
10	263.456,9953365622

**Tabelle A.7:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment G: Erfassung eines Fasses (Objekt (g)) mittig unter dem Laser positioniert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	744.541,4383193826
2	1.072.502,97905415
3	1.034.610,0688226878
4	420.545,86569010175
5	1.480.734,9499961904
6	1.053.033,9341260088
7	686.805,3231318858
8	442.947,3364200615
9	450.866,4373597154
10	748.478,1090908803

**Tabelle A.8:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment H: Erfassung einer gewickelten Palette mit Kisten (Objekt (h)) mittig unter dem Laser positioniert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	235.177,91318758126
2	829.922,0415875949
3	548.165,5643646847
4	548.111,0564678555
5	548.228,0017452536
6	560.172,8514550362
7	1.071.096,3505425341
8	149.277,50774493432
9	762.819,1273544844
10	559.355,7845302118

**Tabelle A.9:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment I: Erfassung eines Fasses (Objekt (g)) mittig unter dem Laser positioniert, mit 70% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	88.244,7322452122
2	2.184.565,454553875
3	205.323,95702399896

**Tabelle A.10:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment J: Erfassung eines kleinen grauen KLT (Objekt (a)) mittig unter dem Laser positioniert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m. Wiederholung von A, um für Experimente K L, M, N, Q und R einen Vergleichswert zu erhalten, welcher kurz zuvor ermittelt wurde um Umwelteinflüsse auszuschließen.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	71.948,70623172335
2	851.714,9594355902
3	72.067,29715362171

**Tabelle A.11:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment K: Erfassung eines kleinen grauen KLT (Objekt (a)) an die der Kamera nahen Kante des Projektionsbereichs positioniert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	32.957,802998042505
2	29.432,02968737721
3	28.937,663259983437

**Tabelle A.12:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment L: Erfassung eines kleinen grauen KLT (Objekt (a)) an die der Kamera fernen Kante des Projektionsbereichs positioniert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	99.132,04652511398
2	104.612,43108075846
3	100.464,32471361406

**Tabelle A.13:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment M: Erfassung eines kleinen grauen KLT (Objekt (a)) an der von der Kamera aus linken Kante des Projektionsbereichs positioniert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	286.721,16754230624
2	1.531.936,39440144
3	88.913,32826774784

**Tabelle A.14:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment N: Erfassung eines kleinen grauen KLT (Objekt (a)) an der von der Kamera aus rechten Kante des Projektionsbereichs positioniert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	72.228,97576286361
2	84.459,16307904391
3	62.398,69765254227
4	73.178,3156329937
5	256.642,30479559823
6	293.963,30477873166
7	63.452,230465986846
8	84.425,01737788731
9	524.189,74442208797
10	1.644.205,7682635041

**Tabelle A.15:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment O: Erfassung eines kleinen grauen KLT (Objekt (a)) mittig unter dem Laser positioniert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,01m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	62.472,862666714274
2	63.927,96822942649
3	59.239,80196809122
4	268.413,1456556565
5	4.807.248,125856293
6	56.435,26201775401
7	67.619,48916107303
8	67.939,94105685585
9	57.116,30833735066
10	68.288,2613034459

**Tabelle A.16:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment P: Erfassung eines kleinen grauen KLT (Objekt (a)) mittig unter dem Laser positioniert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,05m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	80.008,28022909006
2	556.264,6570267285
3	84.192,40565680187

**Tabelle A.17:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment Q: Erfassung eines kleinen grauen KLT (Objekt (a)) mittig unter dem Laser positioniert und um etwa 10° rotiert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	93.564,65981878035
2	82.336,19111777992
3	88.104,10774405694

**Tabelle A.18:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment R: Erfassung eines kleinen grauen KLT (Objekt (a)) mittig unter dem Laser positioniert und um etwa 45° rotiert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	37.847,05380093624
2	37.760,37549571749
3	39.488,877625709385
4	41.703,995502058686
5	39.806,64360604811
6	43.649,87569302865
7	37.295,991717796875
8	42.936,45258874782
9	40.233,58119429091
10	41.240,53098147065

**Tabelle A.19:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment S: Erfassung eines kleinen grauen KLT (Objekt (a)) mit Kabeln befüllt, mittig unter dem Laser positioniert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	34.203,958963320016
2	36.910,52002184279
3	40.307,35919649144
4	39.711,523262491486
5	35.589,094015481045
6	33.6556,7262171807
7	1.184.765,0728460236
8	156.424,46379976743
9	38.411,878840631405
10	37.734,48629149984

**Tabelle A.20:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment T: Erfassung eines kleinen grauen KLT (Objekt (a)) mit dem Boden nach oben, mittig unter dem Laser positioniert, mit 100% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	40.481,97510953144
2	49.906,56473371985
3	42.898,287543236154
4	45.090,60295643396
5	41.610,35415485312
6	57.967,5425492817
7	50.221,604261063025
8	45.315,91944992406
9	170.195,25417276667
10	49.838,29395128979

**Tabelle A.21:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment U: Erfassung eines kleinen grauen KLT (Objekt (a)) mittig unter dem Laser positioniert, mit 70% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

Wiederholung	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
1	41.040,30266299038
2	42.546,394714569506
3	81.242,42287801193
4	42.367,24005364538
5	40.343,857393178696
6	156.625,1044130276
7	36.655,116428489455
8	259.504,08953201704
9	151.632,7003837547
10	259.778,87663528277

**Tabelle A.22:** Automatisiert ermittelte Volumina für Experiment V: Erfassung eines Kartons (Objekt (c)) mittig unter dem Laser positioniert, mit 70% Hallenlichtintensität und einem Laserlinienabstand von 0,02m.

## **A.2 Quelldateien und sonstige Daten**

Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden mit verschiedenen, speziell für diese entwickelten Programmen berechnet. Zudem wurden für spezielle Aufgaben wie die händische Kalibrierung zusätzliche Hilfsprogramme entwickelt. Diese sind, soweit anwendbar, im Anhang zu finden.

Weiterhin liegt den Ergebnissen eine Reihe an exemplarischen Messungen zu Grunde. Die aus diesen Messungen entstandenen Rohdaten sind ebenfalls im Anhang zu finden.

## Literatur

- [1] *1D-Laser-Wegmessensoren*. URL: [https://www.keyence.de/ss/products/measure/measurement\\_library/type/laser\\_1d/](https://www.keyence.de/ss/products/measure/measurement_library/type/laser_1d/) (besucht am 02.01.2024).
- [2] *2D Rotation about a point*. URL: <https://academo.org/demos/rotation-about-point/> (besucht am 21.11.2023).
- [3] Sholto Armstrong. *gray-code-structured-light*. URL: <https://github.com/sjnamstrong/gray-code-structured-light> (besucht am 10.07.2023).
- [4] Thomas Bauernhansl, Hrsg. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien und Migration*. Wiesbaden: Springer Vieweg, op. 2014. ISBN: 978-3-658-04682-8.
- [5] BOSCHE GmbH & Co. KG. *Volumenwaage 3D Silence*. URL: <https://www.bosche.eu/industriewaagen/logistikwaagen/volumenwaagen/volumenwaage-3d-silence> (besucht am 22.11.2023).
- [6] Bundesamt für Strahlenschutz. *Schutzmaßnahmen bei Laseranwendungen*. 2022-10-07. URL: <https://www.bfs.de/DE/themen/opt/anwendung-alltag-technik/laser/schutz/schutz-laser.html> (besucht am 02.01.2024).
- [7] *Camera Calibration*. 2024-01-01. URL: [https://docs.opencv.org/4.x/dc/dbb/tutorial\\_py\\_calibration.html](https://docs.opencv.org/4.x/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html) (besucht am 02.01.2024).
- [8] Wen-Chung Chang et al. „Object volume estimation based on 3D point cloud“. In: *2017 International Automatic Control Conference (CACCS)*. IEEE, 11/12/2017 - 11/15/2017, S. 1–5. ISBN: 978-1-5386-3900-9. DOI: [10.1109/CACCS.2017.8284244](https://doi.org/10.1109/CACCS.2017.8284244).
- [9] Nagesh Singh Chauhan. *DBSCAN Clustering Algorithm in Machine Learning: An introduction to the DBSCAN algorithm and its implementation in Python*. 2022. URL: <https://www.kdnuggets.com/2020/04/dbscan-clustering-algorithm-machine-learning.html> (besucht am 02.01.2024).
- [10] *Depth Camera D455: Intel® RealSense™ Depth and Tracking Cameras*. URL: <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d455/> (besucht am 02.01.2024).
- [11] *Detection of ArUco Markers*. 2024-01-01. URL: [https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial\\_aruco\\_detection.html](https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html) (besucht am 02.01.2024).

- [12] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. *DIN 55423-1: Transportkette für Fleisch und Fleischerzeugnisse: Teil 1: Starre, stapelbare Mehrwegtransport- und Lagerkästen aus Kunststoff; Maße, Gewichte, Ausführung*. Berlin, 2012-09. (Besucht am 02. 01. 2024).
- [13] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. *DIN EN 13698-1:2003: Produktspezifikation für Paletten: Teil 1: Herstellung von 800mm×1200mm Flachpaletten aus Holz*. 2004-01. (Besucht am 02. 01. 2024).
- [14] DS SHOWLASER GmbH. *So funktioniert ein Laser Projektor*. URL: <https://www.ds-lasershows.de/blog/so-funktioniert-ein-laser-projektor/> (besucht am 10. 07. 2023).
- [15] E. Bruce Goldstein und Laura Cacciamani. *Wahrnehmungspsychologie: Der Grundkurs*. 10. vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. Lehrbuch. Berlin: Springer, 2023. ISBN: 978-3-662-65145-2. URL: <https://lehrbuch-psychologie.springer.com/glossar/persistenz-des-sehens-persisten-ce-vision-0>.
- [16] Azmi Haider und Hagit Hel-Or. „What Can We Learn from Depth Camera Sensor Noise?“ In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 22.14 (2022). DOI: [10.3390/s22145448](https://doi.org/10.3390/s22145448).
- [17] Heidler Strichcode GmbH. *Innovative Palettenvermessung mit dem palletcube: Die neue Generation palletcube*. URL: <https://heidler-strichcode.de/palletcube/> (besucht am 10. 07. 2023).
- [18] Hermary. *Coded Structured Light Definition*. 2023. URL: <https://hermary.com/glossary/coded-structured-light/> (besucht am 02. 01. 2024).
- [19] Wu Hongyan et al. „Volume Calculation for Power Equipment Point Cloud Based on Concave Hull Slice Method“. In: S. 302–306. DOI: [10.1109/ICPRE52634.2021.9635231](https://doi.org/10.1109/ICPRE52634.2021.9635231).
- [20] Hao Huadong et al. „The automatic measurement system of large vertical storage tank volume based on 3D laser scanning principle“. In: S. 211–216. DOI: [10.1109/ICEMI.2017.8265768](https://doi.org/10.1109/ICEMI.2017.8265768).
- [21] Intel Corporation. *Beginner’s guide to depth (Updated)*. 2019. URL: <https://www.intelrealsense.com/beginners-guide-to-depth/> (besucht am 11. 12. 2023).
- [22] Jolas Consult GmbH & Co. KG. *Logistikhallen*. 2022. URL: <https://lagerhallen24.de/Logistik-Glossar/Logistikhallen> (besucht am 21. 11. 2023).
- [23] Laserworld AG. *KPPS (deutsch)*. URL: <https://www.laserworld.com/de/glossar-begriffe/81-k/2796-kpps-de.htm> (besucht am 12. 12. 2023).

- [24] *Linienlaser*. 2022-07-06. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Linienlaser> (besucht am 12.12.2023).
- [25] Daniel Moreno und Gabriel Taubin. „Simple, Accurate, and Robust Projector-Camera Calibration“. In: S. 464–471. DOI: [10.1109/3DIMPVT.2012.77](https://doi.org/10.1109/3DIMPVT.2012.77).
- [26] *Obersumme und Untersumme von Integralen*. URL: <https://learnattack.de/schuelerlexikon/mathematik/obersumme-und-untersumme-von-integralen> (besucht am 02.01.2024).
- [27] *Perspective-n-Point (PnP) pose computation*. 2024-01-01. URL: [https://docs.opencv.org/4.x/d5/d1f/calib3d\\_solvePnP.html](https://docs.opencv.org/4.x/d5/d1f/calib3d_solvePnP.html) (besucht am 02.01.2024).
- [28] Practicus AI. *The 5 Clustering Algorithms Data Scientists Need to Know*. 2018. URL: <https://towardsdatascience.com/the-5-clustering-algorithms-data-scientists-need-to-know-a36d136ef68> (besucht am 02.01.2024).
- [29] Werner Purgathofer. *Geometrische Transformationen*. URL: <https://www.cg.tuwien.ac.at/courses/CG1/textblaetter/02%20Geometrische%20Transformationen.pdf> (besucht am 02.01.2024).
- [30] Schneidforum Consulting GmbH & Co.KG. *Laserschneiden, wie funktioniert es? Wie funktioniert das Laserschneiden? Was zeichnet den Laserschneider aus?* 2023-06-12. URL: <https://www.schneidforum.de/schneidwissen/laserschneiden/> (besucht am 12.12.2023).
- [31] sevdesk GmbH. *Intralogistik: Definition, Aufgaben & Intralogistik 4.0*. URL: <https://sevdesk.de/lexikon/intralogistik/> (besucht am 30.11.2023).
- [32] *Sinussatz und Kosinussatz im allgemeinen Dreieck*. URL: <https://de.serlo.org/mathe/2057/sinussatz-und-kosinussatz-im-allgemeinen-dreieck> (besucht am 02.01.2024).
- [33] Casey Stack, Bob Mueller und Scott Huggins. *ILDA Test Pattern*. Hrsg. von Frank Plughoff und Kelly Plughoff. 1995. URL: [https://www.ilda.com/resources/StandardsDocs/ILDA\\_TestPattern95\\_rev002.pdf](https://www.ilda.com/resources/StandardsDocs/ILDA_TestPattern95_rev002.pdf) (besucht am 12.12.2023).
- [34] Studienkreis GmbH. *Kongruenzsätze: Dreiecke konstruieren: Erklärung*. URL: <https://www.studienkreis.de/mathematik/kongruenzsaetze-dreiecke-konstruieren/> (besucht am 02.01.2024).
- [35] *The Basics of LiDAR: Light Detection and Ranging: Remote Sensing*. 2023. URL: <https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/lidar-basics> (besucht am 11.12.2023).

- [36] TUP GmbH & Co. KG. *Automatische Volumenerfassung von Paketen und Paletten*. URL: <https://logistikknowhow.com/erfassungssysteme/automatische-volumenerfassung-von-paketen-und-paletten/> (besucht am 10.07.2023).
- [37] Verband der Automobilindustrie e.V. *VDA 4500: Kleinladungsträger (KLT)-System: Teil 1 (Technische Empfehlung)*. (Besucht am 02.01.2024).
- [38] *Volume measurement system Linecube*. URL: <https://www.bosche.eu/en/logistic-scales/volume-scales/volume-measurement-system-linecube> (besucht am 22.11.2023).
- [39] Patrick Voss-de Haan. *Laser*. 1998. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/laser/8789> (besucht am 02.01.2024).
- [40] *Was ist eine 3D Punktwolke*. URL: <https://www.logxon.com/punktwolke-point-cloud/> (besucht am 02.01.2024).