



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Carsten Fries

Realisierung eines dreidimensionalen Laserscanners auf Basis der
Lichtschnitttechnik

Carsten Fries

Realisierung eines dreidimensionalen Laserscanners auf Basis der
Lichtschnittechnik

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Technische Informatik
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Andreas Meisel
Zweitgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Gunter Klemke

Abgegeben am 26. Juni 2009

Carsten Fries

Thema der Bachelorarbeit

Realisierung eines dreidimensionalen Laserscanners auf Basis der Lichtschnitttechnik

Stichworte

3D-Laserscanner, 3D-Vermessung, 3D-Rekonstruktion, Laser-Scanner, Laserscanning, Laser-Triangulation, Lichtschnitttechnik, Lichtschnittverfahren, Triangulationsverfahren

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Realisierung eines dreidimensionalen Laserscanners auf Basis der Lichtschnitttechnik. Es wird die Entwicklung eines hochgenauen Laserscanners, ausgehend von den verwendeten Materialien bis zur Softwarerealisierung und -Implementierung detailliert beschrieben. Vermessungsergebnisse werden zur Darstellung der Leistungsfähigkeit unter analytischen Kriterien textuell und grafisch vorgestellt.

Carsten Fries

Title of the paper

Realization of a three-dimensional laser scanner based on the light striping technique

Keywords

3D laser scanner, 3D measurement, 3D reconstruction, laser scanner, laser scanning, laser triangulation, light striping technique, sheet of light imaging, triangulation

Abstract

This bachelor-thesis focuses on the realization of a three-dimensional laser scanner based on the light striping technique. The development of a highly accurate laser scanner is described in detail from the materials used to the software realization and implementation. Survey results of the capabilities will be displayed textually and graphically from an analytical criteria point of view.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Stand der Technik	1
1.2. Zielsetzung	2
1.3. Gliederung	3
2. Technologien und Verfahren	4
2.1. Taktile Verfahren	4
2.2. Berührungslose Verfahren	5
2.2.1. Lichtlaufzeit	5
2.2.2. Triangulation	5
3. Grundlagen	9
3.1. Nichtlineare Ausgleichsrechnung	9
3.2. Koordinatentransformation	10
3.2.1. Translation	10
3.2.2. Rotation	11
3.3. Perspektivische Transformation $\mathbb{P}^2 \mapsto \mathbb{P}^2$	12
4. Technischer Aufbau	14
4.1. Gerüst	14
4.2. Verkleidung	16
4.3. Kamera	17
4.4. Laser	18
4.5. Drehmesstisch	19
4.6. Kalibrierungsvorrichtung	19
5. Realisierung	21
5.1. Kalibrierung	23
5.2. Bildaufnahme	23
5.3. Bildanalyse	24
5.4. Rekonstruktion der 3D-Koordinaten	25
5.5. Registrierung	26
5.6. Vernetzung	28
5.7. Modellierung	29
5.8. Nachbearbeitung	30
5.8.1. Beseitigung von Punktstörungen	30
5.8.2. Lochbeseitigung	30
5.8.3. Glätten der Oberfläche	31
5.8.4. Simplifizierung	32
5.8.5. Formatierung der Punktmenge	33

6. Implementierung	34
6.1. Betriebssystemunterstützung	34
6.2. Grafische Oberfläche	35
7. Auswertung	41
7.1. Präzision	41
7.2. Geschwindigkeit	43
7.3. Struktur- und Materialeinfluss	44
7.4. Messergebnisse	44
7.4.1. Problematisches Messobjekt	45
7.4.2. Komplexe Form	45
7.4.3. Geometrische Formen	46
7.4.4. Weitere Messresultate	48
8. Zusammenfassung und Ausblick	52
8.1. Stand der Arbeit	52
8.2. Weiterentwicklungen	53
A. Verwendete Hilfsmittel	54
A.1. Bibliotheken	54
A.2. Bild- und Grafikprogramme	54
A.3. Softwaresysteme zur Darstellung und Weiterverarbeitung von Punktmengen	55
A.4. Weitere Hilfsmittel	55
B. Inhalt der beiliegenden DVD	56
Abbildungsverzeichnis	57
Tabellenverzeichnis	59
Quellenverzeichnis	60

1. Einleitung

1.1. Stand der Technik

Die dreidimensionale Objektvermessung dient zur Erfassung von Oberflächenstrukturen und der Bestimmung der räumlichen Geometrie von Körpern. Durch die bis heute rasante technologische Entwicklung ist die 3D-Objektvermessung in vielen Bereichen vertreten.

In der Qualitätskontrolle¹ erfassen Vermessungssysteme Produkte und Werkstücke im Produktionsprozess dreidimensional, um anschließend einen Soll-Ist-Vergleich durchzuführen. Somit können frühzeitig Produktionsfehler, die durch Umwelteinflüsse wie wechselnder Temperatur und Luftdruck oder Maschinenverschleiß entstehen, erkannt und sofort notwendige Korrekturen vorgenommen werden.

Im Bereich der Orthopädie sind Behandlungsverläufe und Therapieergebnisse ohne gesundheitsschädliche Strahlenbelastung messbar. Animierte Bewegungsstudien werden zum Beispiel durchgeführt, um Prothesen vorab zu testen. Somit kann die bestmögliche Passform bei Prothesen, Schuhen oder Kleidung für jede Person erzielt werden.

Die Archäologie rekonstruiert virtuell beschädigte wertvolle Objekte, wie jahrhundertealte Skulpturen oder Ausgrabungsstätten, um ihre ursprüngliche Form zu erhalten. Zahlreiche digitale Kunstkataloge und Objektausstellungen sind in den letzten Jahren durch berührungslose, hochgenaue und schnelle 3D-Objektscanner entstanden.²

Dieser kleine Einblick von vielen möglichen Anwendungsgebieten³ zeigt, dass sich die 3D-Objektvermessung in der Industrie, Fertigung und Forschung etabliert hat. In der Zukunft wird sich die Technologie und damit die Leistungsfähigkeit der technischen Geräte weiterentwickeln, was eine noch größere Verbreitung der 3D-Objektvermessung erwarten lässt.

¹Detaillierte Informationen zur Qualitätskontrolle in der Industrie finden sich in (Bertagnolli, 2004)

²Digitale Archäologie: Link und Sättele (2009)

³Weitere Anwendungsgebiete sind die Robotik, Physik, Kriminologie u.a.

1.2. Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Vollendung eines Laserscanners auf Basis der Lichtschnitttechnik, zur 3D-Vermessung von Gegenständen.

Diese Arbeit baut auf zwei Bachelorarbeiten auf. Die eine ermöglichte die Kalibrierung der Systemkomponenten und die Erfassung von Weltkoordinaten einer Schnittebene.⁴ In einer zweiten entwickelte ein Diplomand ein passendes Steuerungssystem, mit dem ein Drehteller über einen Schrittmotor und einer Positioniersteuerung ansteuerbar ist.⁵

Aufbauend auf den zwei genannten Arbeiten soll im Rahmen dieser Bachelorarbeit ein Gesamtsystem so entwickelt werden, dass alle zur Vermessung notwendigen Schritte über eine grafische Benutzeroberfläche bedienbar werden:

- Die Kalibrierung ist so zu erweitern, dass der Anwender schrittweise durch den Kalibrierungsvorgang geleitet wird.
- Nachdem die Systemkomponenten aufeinander kalibriert sind, sollen Gegenstände, die in ihrer Oberflächenstruktur oder deren Körper zu bestimmen sind, einzeln in einer abgedunkelten Umgebung auf einem per Schrittmotor ansteuerbaren Drehteller platziert werden können, um nachfolgend über eine Software den Messvorgang zu steuern. Die ermittelten Weltkoordinaten der Schnittebenen sollen im Messvorgang zu 3D-Weltkoordinaten umgerechnet werden können, sodass nach Vollendung des Messvorgangs eine Punktwolke entsteht.
- Mit Hilfe zwei zu integrierende Programme sind Punktwolken in flächenbasierte Modelle überzuführen und darzustellen.
- Ein textuell und grafisch dokumentierter Sourcecode des Messsystems ist in die grafische Benutzeroberfläche einzubinden. Im Laufe der Entwicklung entstandene Messergebnisse sind zur Veranschaulichung der Leistungsfähigkeit des Laserscanners in einer gesonderten Ansicht darzustellen.
- Bei dem resultierenden Laserscannersystem ist besonders darauf zu achten, dass soft- und hardwareseitig der Licht- und Materialeinfluss minimal zu halten, und die Geschwindigkeit zu maximieren ist.

⁴Realisierung eines Laser-Triangulationssensors zur 3D-Objektvermessung: Schuhfuss (2007)

⁵Entwicklung eines Steuerungsmoduls für einen 3D-Laserscanner: Reimann (2008)

1.3. Gliederung

Die vorliegende Bachelorarbeit ist in 8 Kapitel gegliedert. Diese Kapitel haben folgende Inhalte:

- Kapitel 1** beschreibt den heutigen Stand der dreidimensionalen Objektvermessung und erläutert das Ziel dieser Arbeit.
- Kapitel 2** gibt einen Überblick über existierende Technologien und Verfahren.
- Kapitel 3** stellt für das notwendige Verständnis dieser Arbeit Mathematik- und Bildverarbeitungsgrundlagen vor.
- Kapitel 4** beschreibt den technischen Aufbau des Laserscanners.
- Kapitel 5** beschreibt detailliert die einzelnen Phasen zur Ermittlung dreidimensionaler Punktwolken und deren Weiterverarbeitung.
- Kapitel 6** erläutert die Bedienung der entwickelten Software zur Steuerung und Handhabung des Laserscanner-Systems. Ebenso werden die Voraussetzungen der Softwarenutzung beschrieben.
- Kapitel 7** bewertet die Messergebnisse des Laserscanners im Bezug auf Präzision, Geschwindigkeit, Struktur- und Materialeinfluss.
- Kapitel 8** fasst die Resultate dieser Bachelorarbeit zusammen und stellt mögliche Weiterentwicklungen vor.

2. Technologien und Verfahren

Für die räumliche Abtastung von Objekten zur dreidimensionalen digitalen Rekonstruktion ist eine Vielzahl von Messprinzipien bekannt. Diese Messprinzipien sind in taktile- und berührungslose Verfahren unterteilt. Nachfolgend werden typische und das in dieser Arbeit angewendete Verfahren erläutert.

Inhalt

2.1. Taktile Verfahren	4
2.2. Berührungslose Verfahren	5
2.2.1. Lichtlaufzeit	5
2.2.2. Triangulation	5
Punkttriangulation	6
Lichtschnittechnik	6
Codierter Lichtansatz	7

2.1. Taktile Verfahren

Mit den taktilen Verfahren werden Messungen mit einem sehr geringen Verlust an Genauigkeit vorgenommen. Zur oberflächigen taktilen Vermessung wird eine Koordinatenmessmaschine⁶ (siehe Abbildung 2.1) in der industriellen Qualitäts- und Fertigungskontrolle eingesetzt. Die Vermessung findet mit einem präzise gefertigten Tastkopf statt, der die Oberflächenstruktur des Objektes schrittweise abtastet. Nach jeder Berührung des Tastkopfes mit dem Objekt wird eine Messung angestoßen, welche die aktuelle Position ermittelt und speichert. Nachdem die Oberflächenstruktur durch die gemessenen Positionswerte ermittelt wurde, kann die Form rekonstruiert werden. Der Messbereich ist dabei in X-, Y- und Z-Richtung bis zu mehreren Metern möglich. Dabei werden Genauigkeiten von $0,1 \mu\text{m}$ erzielt. Da der Tastkopf das Objekt bei der Vermessung berührt, ist das Risiko der Beschädigung oder gar Zerstörung von empfindlichen Objekten gegeben. Der Kaufpreis von taktilen Messinstrumenten ist sehr hoch. Des Weiteren benötigt das Verfahren viel Zeit bei der Erfassung von komplexen Objekten.

Aufgrund der genannten Nachteile ist dieses Verfahren nicht für den Anwendungsbereich dieser Arbeit geeignet. Daher wird nicht weiter auf dieses Verfahren eingegangen.

⁶Eine Koordinatenmessmaschine vermisst nicht ausschließlich taktil. In der Industrie werden auch berührungslose Koordinatenmessmaschinen produziert und verwendet.



Abbildung 2.1.: 3D-Koordinatenmessmaschine der Firma Wenzel GearTec GmbH.⁷

2.2. Berührungslose Verfahren

Berührungslose Messverfahren haben in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Ein Objekt zeiteffizient und zerstörungsinvariant vermessen zu können, ohne es zu berühren, führte zu zahlreichen Verfahren. In diesem Unterkapitel wird auf die aktiven Messmethoden der berührungslosen Verfahren eingegangen. Passive Messmethoden benötigen im Gegensatz zu aktiven Messmethoden keine zusätzliche Lichtquelle und greifen daher nicht in den zu vermessenden Bereich ein. Mehr Informationen über passive Verfahren finden sich in GÜHRING⁸.

2.2.1. Lichtlaufzeit

Bei dem zur Abstandsmessung eingesetztem Lichtlaufzeit-Verfahren wird die Laufzeit (engl. „Time-of-Flight“) eines Laserlichtimpulses zum Objekt und zurück gemessen. Das Verfahren benötigt einen Lichtsensor und eine Lichtquelle. Die Abstandsmessung beginnt mit der Aussendung eines Lichtimpulses der Lichtquelle in Richtung des Objektes. Dieses reflektiert den Lichtimpuls und ermöglicht dadurch die Aufnahme des ausgesandten Lichtimpulses durch den Lichtsensor. Mit der gegebenen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals (Lichtgeschwindigkeit) und der gemessenen Dauer des Lichtimpulses, kann der Abstand zwischen dem Lichtsensor und dem Objekt ermittelt werden, indem die Hälfte der gemessenen Dauer mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals multipliziert wird. Mit diesem Messverfahren sind in Abhängigkeit der störungsfreien Lichtimpulsübertragung und der Reflexionsverhältnisse, hohe Genauigkeiten über mehrere Kilometer möglich. Für Präzisionsmessungen im Nahbereich ist das Lichtlaufzeit-Verfahren eher nicht geeignet.

2.2.2. Triangulation

Bei den Triangulationsverfahren stehen eine Lichtquelle, ein elektronischer Bildwandler und das zu vermessende Objekt in einem Dreieck mit den zugehörigen drei Triangulationswinkeln zueinander.

⁷Bildquelle der 3D-Koordinatenmessmaschine: Rauth (2009)

⁸Gühring (2001) [S.14-17].

Während die Lichtquelle einen Punkt-, eine Linie- oder ein Lichtmuster auf das Objekt projiziert, wird die beleuchtete Oberfläche von einem elektronischen Bildwandler, zumeist eine CMOS-, CCD-Kamera oder ein PSD⁹ erfasst. Die Position des Messpunktes wird anhand einer einmaligen Kalibrierung der Lichtquelle mit dem elektronischen Bildwandler ermittelt. Laserlicht bietet den großen Vorteil der Verwendung sehr dünner Lichtpunkte bzw. Lichtstreifen. In Kombination mit einem hochauflösenden elektronischen Bildwandler, können somit Genauigkeiten von 0,01 mm erzielt werden.

Nachfolgend werden drei typische Triangulationsverfahren, die sich in der Lichtquelle unterscheiden, erläutert.

Punkttriangulation

Das Punkttriangulationsverfahren benutzt als Lichtquelle einen Punktlaser, sodass nur ein Messpunkt pro Zeiteinheit, erfasst werden kann. Aufgrund der hohen Zeitintensität bei einigen tausend Messpunkten, wurden das Lichtschnittverfahren und der codierte Lichtschnittansatz entwickelt.

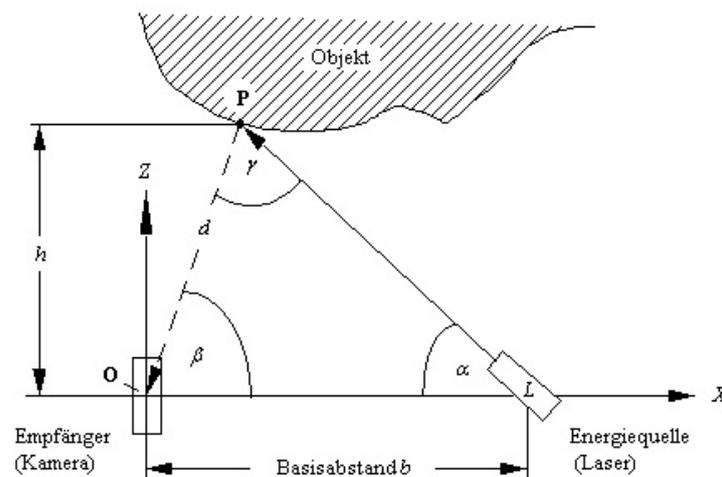


Abbildung 2.2.: Veranschaulichung der Punkttriangulation mit den drei Triangulationswinkeln α , β und γ , dem Basisabstand b zwischen der Kamera und dem Laser, und der Höhe h und die Distanz d zwischen der Kamera und dem Objektpunkt P .¹⁰

Lichtschnitttechnik

In dieser Bachelorarbeit wurde das Lichtschnittverfahren angewendet, welches es ermöglicht, mit einem Linienlaser eine gesamte Linie und damit einen Lichtschnitt des Objektes gleichzeitig zu vermessen. Dies erhöht die Geschwindigkeit enorm.

⁹PSD steht für „Position Sensitive Device“ und ist ein Sensor welcher zur ein- oder zweidimensionalen Ortsbestimmung eines Lichtpunktes verwendet wird.

¹⁰Bildquelle: Klette u. a. (1996)

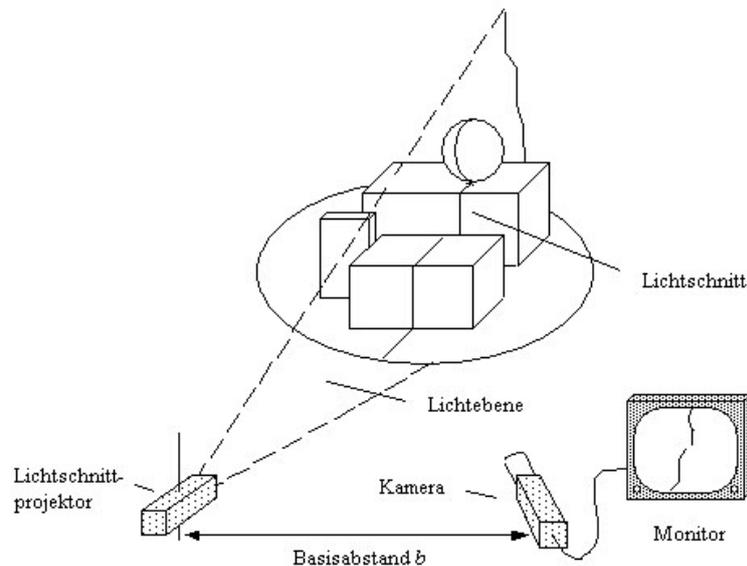


Abbildung 2.3.: Das Prinzip der Lichtschnitttechnik.¹¹

Eine Weiterentwicklung des Lichtschnittverfahrens ist die gleichzeitige Projektion von mehreren Lichtstreifen. Dies ermöglicht die Erfassung des gesamten Objektes bzw. der maximal möglichen Größe des Messbereiches und reduziert damit die Anzahl der aufzunehmenden Bilder. Die Schwierigkeit bei dieser Erweiterung liegt jedoch in der eindeutigen Zuordnung der projizierten Lichtstreifen im Kamerabild.

Die Fortentwicklung dieses Gedankens führt zum codierten Lichtschnittverfahren.

Codierter Lichtansatz

Beim „Codierten Lichtansatz“ wird ein binär-¹², farbcodiertes oder Moiré-Muster¹³ mit einem Lichtmusterprojektor flächenhaft auf das Objekt projiziert. Das Problem bei einfachen Lichtmustern ist die Verdeckung von projiziertem Licht, sodass eine eindeutige Identifizierung und Indizierung zwischen projiziertem und im Kamerabild sichtbarem Laserlicht nicht vollständig gegeben ist. Dieses Problem wird behoben, indem ein für das System bekanntes codiertes Muster auf das zu vermessene Objekt projiziert wird.¹⁴

Die nachfolgenden Abbildungen veranschaulichen den binär- und farbcodierten Lichtansatz.

¹¹ Bildquelle über das Prinzip der Lichtschnitttechnik: Klette u. a. (1996)

¹² Aus Gründen der Fehlertoleranz wird vorzugsweise in der Praxis der Graycode verwendet.

¹³ Es existieren noch weitere Codierarten wie u.a. das Phasenshiftverfahren.

¹⁴ Nähere Informationen über den codierten Lichtansatz finden sich in: Pagés u. a. (2003), Zhang u. a. (2002) und Bunke und Jiang (1997)

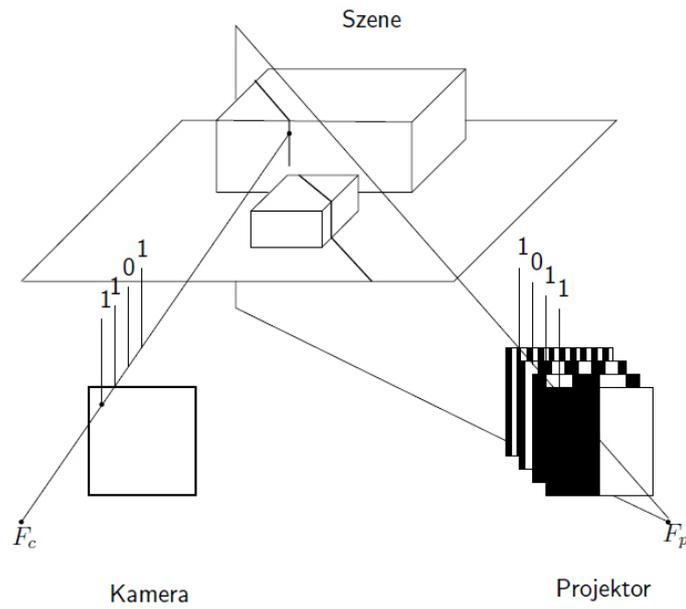


Abbildung 2.4.: Darstellung des binärcodierten Lichtschnittverfahrens.¹⁵

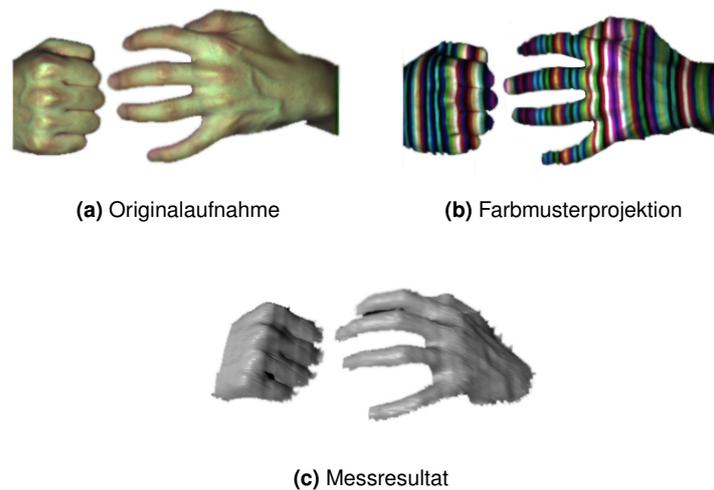


Abbildung 2.5.: Angewandte farbcodierte Lichtschnitttechnik.¹⁶

¹⁵Bildquelle über den binärcodierten Lichtansatz: Bunke und Jiang (1997)

¹⁶Bildquelle über die farbcodierte Lichtschnitttechnik: Zhang u. a. (2002)

3. Grundlagen

In diesem Kapitel werden die benötigten Grundlagen der Bildverarbeitung und der Mathematik für das Verständnis der Realisierung des in dieser Arbeit entwickelten Laserscanners beschrieben.

Inhalt

3.1. Nichtlineare Ausgleichsrechnung	9
3.2. Koordinatentransformation	10
3.2.1. Translation	10
3.2.2. Rotation	11
3.3. Perspektivische Transformation $\mathbb{P}^2 \mapsto \mathbb{P}^2$	12

3.1. Nichtlineare Ausgleichsrechnung

Die nichtlineare Ausgleichsrechnung wird eingesetzt, wenn mehr nichtlinear zusammenhängende Messwerte y_i als unbekannte Parameter x_1, \dots, x_n eines Modells vorliegen und damit keine eindeutige Lösung der unbekannt Parameter berechnet werden kann. Zur Lösung des Ausgleichsproblems wird versucht, mit den möglichst kleinsten Abweichungen, eine gegebene nichtlineare Modellfunktion in die vorhandenen Messwerte einzupassen.

Das in dieser Arbeit verwendete numerische Lösungsverfahren ist der Gauß-Newton-Algorithmus. Im Wesentlichen wird versucht die unbekannt Parameter so an die gesuchte Modellfunktion anzupassen, dass die Summe der Fehlerquadrate minimal ist. Im Falle einer Funktion $f(x_1, \dots, x_n)$ mit n unbekannt Parametern gilt:

$$\sum_{i=1}^m |f(x_i) - y_i|^2 \rightarrow \min \quad (x_* \in \mathfrak{R}^n, m > n) \quad (3.1)$$

Mit Hilfe der Gauß-Newton-Iteration

$$|f(x) + f'(x) \cdot \Delta x| = 0 \quad (x \leftarrow x + \Delta x) \quad (3.2)$$

kann das nichtlineare Ausgleichsproblem iterativ bestimmt werden. Somit wird wie beim Newton-Verfahren, die Funktion in jedem Iterationsschritt durch eine lineare Näherung ersetzt.

Mit einem Standardverfahren kann das dabei entstehende lineare Ausgleichsproblem gelöst werden.

Eine detaillierte Beschreibung des Gauß-Newton-Verfahrens und der Lösung vom linearen Ausgleichsproblem ist in ÜBERHUBER¹⁷ beschrieben.

3.2. Koordinatentransformation

Mit einer Koordinatentransformation können Koordinaten bezüglich eines Koordinatensystems verschoben, rotiert und skaliert werden. In diesem Unterkapitel wird auf die Translation und Rotation im 2D und 3D-Raum eingegangen.

3.2.1. Translation

Die Translation im zweidimensionalen Raum ermöglicht die Verschiebung von Koordinaten in zwei Richtungen auf eine andere Raumposition. Bei einem Koordinatensystem mit einer X und Y-Achse, kann positiv und negativ in diese beiden Richtungen verschoben werden. Daraus ergibt sich, dass ein Punkt P_q mit den Koordinaten (x_q, y_q) auf die Zielposition $P_z(x_z, y_z)$ abgebildet wird, indem der positive bzw. negative Versatz $\Delta x, \Delta y$ auf den Punkt P_q addiert wird. Es lassen sich damit die Translationsgleichungen

$$\begin{aligned}x_z &= x_q + \Delta x \\y_z &= y_q + \Delta y\end{aligned}\tag{3.3}$$

und die Translationsmatrix

$$\begin{bmatrix} x_z \\ y_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_q \\ y_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}\tag{3.4}$$

aufstellen.

Für den 3D-Raum ist das Koordinatensystem um die Z-Achse erweitert und damit ändert sich die Translationsmatrix zu

$$\begin{bmatrix} x_z \\ y_z \\ z_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_q \\ y_q \\ z_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}\tag{3.5}$$

¹⁷Überhuber (1995) [S.226-246 und S.339-341]

3.2.2. Rotation

Bei einer Rotation im zweidimensionalen Raum werden das Koordinatensystem bzw. die zu drehenden Objektpunkte rotiert. Nachfolgend werden die Rotationsgleichungen hergeleitet.

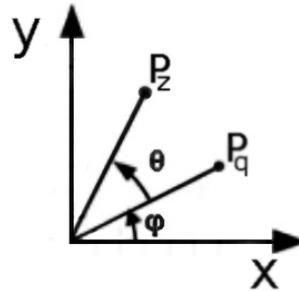


Abbildung 3.1.: Der trigonometrische Zusammenhang einer Rotation.

In einem Koordinatensystem mit einer x- und y-Achse, soll ein Punkt P_q auf den Punkt P_z gedreht werden. Der Punkt P_q ist in Polarkoordinaten beschrieben und hat somit einen Ursprungsabstand r und einen Winkel φ . Dabei ist der Winkel φ zwischen der x-Achse und der Linie, die den Ursprungsabstand darstellt, aufgespannt. Dadurch ergeben sich die Polarkoordinaten für den Punkt P_q

$$\begin{aligned}x_q &= r \cdot \cos \varphi \\y_q &= r \cdot \sin \varphi\end{aligned}\quad (3.6)$$

Zur Ermittlung der Zielpunktcoordinate $P_z(r, \varphi + \theta)$, die um den Rotationswinkel θ zusätzlich gedreht ist, lassen sich mit den Additionstheoremen

$$\begin{aligned}\cos(\varphi + \theta) &= \cos \varphi \cdot \cos \theta - \sin \varphi \cdot \sin \theta \\ \sin(\varphi + \theta) &= \cos \varphi \cdot \sin \theta + \sin \varphi \cdot \cos \theta\end{aligned}\quad (3.7)$$

und unter Verwendung von $x_q = r \cdot \cos \varphi$ und $y_q = r \cdot \sin \varphi$ die gesuchten Rotationsgleichungen

$$\begin{aligned}x_z &= x_q \cdot \cos \theta - y_q \cdot \sin \theta \\ y_z &= x_q \cdot \sin \theta + y_q \cdot \cos \theta\end{aligned}\quad (3.8)$$

herleiten.

Bei einer Rotation ist darauf zu achten, dass die Drehung um den Koordinatenursprung und nicht um die Objektmittelpunkte stattfindet. Deshalb wird üblicherweise zuerst das Objekt in das Rotationszentrum mit einer Translation \underline{T}^{-1} verschoben. Anschließend erfolgt mit einer Rotationsmatrix \underline{R} die Drehung. Nach der Rotation muss der Punkt mit der Translation \underline{T} zurückverschoben werden. Insgesamt ergibt sich eine von rechts nach links zu lesende Matrix $\underline{M} = \underline{T} \cdot \underline{R} \cdot \underline{T}^{-1}$, die aus zwei Matrizenmultiplikationen zusammengesetzt ist.

Die Rotation im 3D-Raum unterscheidet sich vom zweidimensionalen Raum darin, dass jeweils um die x-, y- und z-Koordinatenachse gedreht werden kann. Es ergeben sich damit die drei Rotationsmatrizen:

$$\underline{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\underline{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\underline{R}_z = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.3. Perspektivische Transformation $\mathbb{P}^2 \mapsto \mathbb{P}^2$

Mit der perspektivischen Abbildung können Translationen, Rotationen, Skalierungen, Scherungen, Spiegelungen und projektive Verzerrungen vorgenommen werden. Dabei ist die Aufgabe einer perspektivischen Transformation \underline{H}

$$\underline{H} \cdot \vec{P} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \longrightarrow \vec{P}^* = \begin{bmatrix} x^* \\ y^* \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

die Abbildung eines Punktes der Form $\vec{P} = (x, y, 1)^T$ auf den zugehörigen projizierten Punkt $\vec{P}^* = (x^*, y^*)^T$ der zweidimensionalen Bildebene einer Kamera. Hierbei ist \vec{P} in homogenen Koordinaten und \vec{P}^* in euklidischen Koordinaten dargestellt. Die Rückwandlung von homogenen Koordinaten in euklidische Koordinaten wird ermöglicht, indem durch den dritten Wert des Multiplikationsergebnisses von $\underline{H} \cdot \vec{P}$ dividiert wird:

$$x^* = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \quad (3.13)$$

$$y^* = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \quad (3.14)$$

Die Koeffizienten h_{ij} aus der Abbildungsmatrix \underline{H} sind von den so genannten intrinsischen¹⁸ und extrinsischen¹⁹ Kameraparametern abhängig. Zusätzlich ist zu beachten, dass diese Ab-

¹⁸Die intrinsischen Parameter beschreiben den Zusammenhang des Kamera- und Bildkoordinatensystems. Zu den intrinsischen Parametern gehört die interne Geometrie der Kamera und damit Eigenschaften wie Brennweite, Pixelkoordinaten der Bildmitte, sowie der Skalierungsfaktor.

¹⁹Die extrinsischen Parameter beschreiben bezüglich eines Weltkoordinatensystems die Position und Ausrichtung der Kamera im Raum und damit die äußere Orientierung der Kamera.

bildungsart parallele Geraden nicht auf parallele Geraden abbildet und somit nicht parallelerhaltend ist. Geraden werden jedoch immer auf Geraden abgebildet. Die Abbildung 3.2 stellt diese Eigenschaften grafisch dar. Dabei wird ein Punkt P aus der Ebene $\pi \in \mathbb{P}^2$ auf den zugehörigen Punkt P^* in der Ebene $\pi^* \in \mathbb{P}^2$ abgebildet.

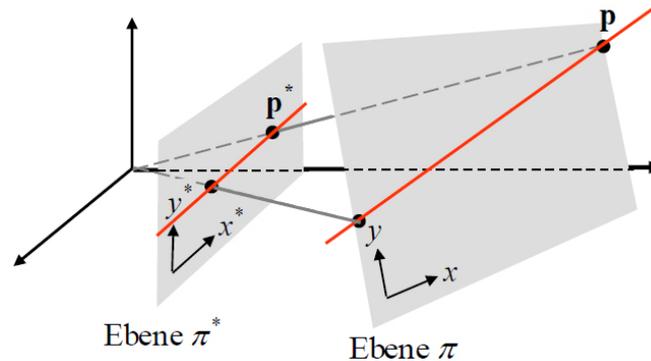


Abbildung 3.2.: Veranschaulichung der Eigenschaften einer perspektivischen Transformation $\mathbb{P}^2 \mapsto \mathbb{P}^2$.²⁰

Die nachfolgende Abbildung 3.3 veranschaulicht die Transformation zwischen der Bild- und Streifenebene mit Hilfe einer perspektivischen Transformationsmatrix H .

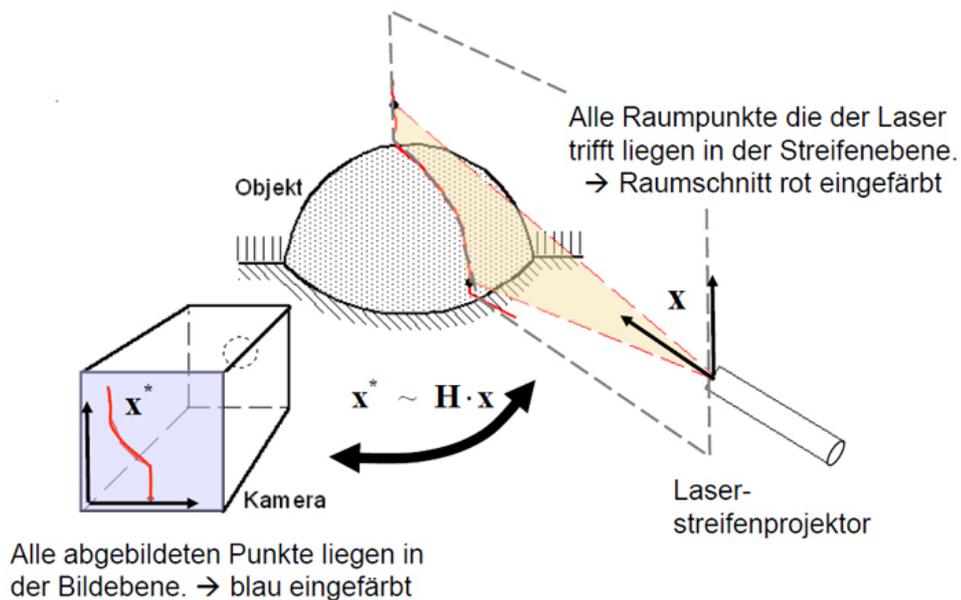


Abbildung 3.3.: Perspektivische Ebene-zu-Ebene Transformation.²⁰

Zur Ermittlung der Zielposition von gemessenen Bildkoordinaten ermöglicht die inverse perspektivische Transformation, die Berechnung der Koordinaten in der Streifenebene.

²⁰Bildquelle: Meisel (2008a)

4. Technischer Aufbau

In diesem Kapitel wird auf die benötigten Baumaterialien und Hardwarekomponenten zur Realisierung eines vollständigen 3D-Laserscannersystems eingegangen. Eine detailgetreue Darstellung des Laserscanners in Form eines Bauplans, ermöglicht es anderen Personen das System nachzubauen und zu nutzen.

Inhalt

4.1. Gerüst	14
4.2. Verkleidung	16
4.3. Kamera	17
4.4. Laser	18
4.5. Drehmesstisch	19
4.6. Kalibrierungsvorrichtung	19

4.1. Gerüst

Das Gerüst besteht weitestgehend aus quadratischen Rexroth-Strebenprofilen²¹ der Firma Bosch. Diese haben die Maße von $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$. Mit zwölf dieser Strebenprofile wird ein Raum aufgezogen. An jeweils zwei der vier vertikalen Strebenprofile ist eine Trägerkonstruktion befestigt. Diese besteht aus weiteren zwei vertikal verstellbaren Strebenprofile und einem horizontal verstellbaren Querträger. Dabei ist ein Querträger zur Befestigung einer Kamera oder eines Lasers vorhanden. Das letzte sich im Gerüst befindende Strebenprofil ist als Querträger für einen mit Schrittmotor ansteuerbaren Drehteller zwischen zwei auf dem Boden befindenden Strebenprofilen montiert. Vier in der Höhe verstellbare Gerüstfüße sind zur Ausrichtung des Gesamtgestells an dem unteren Ende der vertikalen Strebenprofile angebracht.

Befestigt werden die genannten Bestandteile des Gerüsts mit Winkelstützen, Würfelverbindern, Nutensteinen und Zentralschrauben.

²¹Zu finden auf der Internetseite der Firma Bosch, unter der Kategorie „Produkte und Leistungen“, in der Unterkategorie „Montagetechnik“: Bosch (2009)

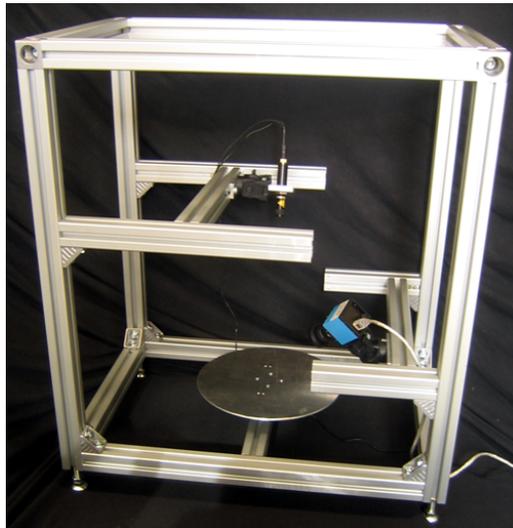


Abbildung 4.1.: Montiertes Grundgerüst mit verstellbaren Kamera- und Laserquerträger und einem befestigten Drehteller.²²

Eine Aufsicht des Laserscanners zur Betrachtung der montierten Strebenprofile und der Trennung der beiden Querträger für die Befestigung einer Kamera und einem Laser ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

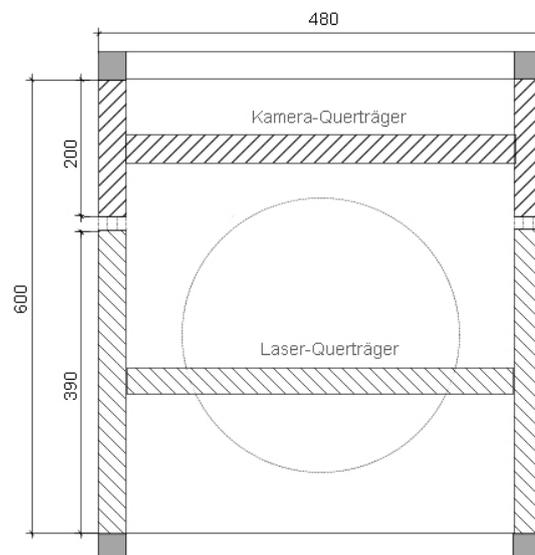


Abbildung 4.2.: Draufsicht des Grundgerüsts mit Maßen in *mm*.

Die zugehörigen Maße der Strebenprofile sind in der Tabelle 4.1 aufgelistet.

²²Bildquelle: Schuhfuss (2007)

Gerüstfläche	Breite	Höhe
Oberseite	480 mm	680 mm
Rückseite	480 mm	740 mm
Linke-Seite	680 mm	740 mm
Rechte-Seite	680 mm	740 mm
Grundseite	480 mm	600 mm

Tabelle 4.1.: Beschreibung der Gerüstmasse in mm.

4.2. Verkleidung

Die Verkleidung des Laserscanners setzt sich aus fünf Verkleidungsflächen und einem zugeschnittenen Tuch zusammen. Jede Verkleidungsfläche hat acht Löcher, sodass mit Nutensteinen, die in die Strebenprofile eingelegt werden, die Verkleidungsflächen mit dem Gerüst verbunden werden können. Jedes Verkleidungsstück ist außerdem von innen mit einer schwarzen nicht Licht reflektierenden Folie beklebt. Um die Kanten des Laserscanners runder darzustellen, wurden im Verhältnis zu den Gerüstmassen die Verkleidungsstücke um jeweils 6 mm verkürzt. Die Maße der Verkleidungsstücke sind in der Tabelle 4.2 aufgelistet.

Ein zugeschnittenes Tuch ist so an die offene Vorderseite des Laserscanners montiert, das zu scannende Objekte einerseits mit Lichteinfall auf den Drehteller gelegt werden können und andererseits, um im Scanvorgang einen komplett abgedunkelten Laserscan zu ermöglichen.

Verkleidungsfläche	Breite	Höhe
Oberseite	474 mm	674 mm
Rückseite	474 mm	734 mm
Linke-Seite	674 mm	734 mm
Rechte-Seite	674 mm	734 mm
Grundseite	474 mm	594 mm

Tabelle 4.2.: Auflistung der Verkleidungsmasse in mm.

Der komplett verkleidete Laserscanner ist in der folgenden Abbildung 4.3 dargestellt.



Abbildung 4.3.: Verkleidung des Laserscanners.

4.3. Kamera

In dieser Arbeit wird die CCD-²³ Monochrom-Kamera „DMK 41BF02“ der Firma „The Imaging Source“²⁴ eingesetzt. Sie verfügt über eine Auflösung von 1280×960 Bildpunkten und überträgt bis zu 15 Bilder pro Sekunde über eine Firewire-Schnittstelle. Als Kameraobjektiv kommt ein hochauflösendes Objektiv „H0514-MP“²⁵, das speziell für den Nahbereich entwickelt wurde, zum Einsatz.

Die Kamera lässt sich in der Tiefe und Höhe durch den am Grundrahmen befestigten verstellbaren Kameraträger beliebig positionieren. Zusätzlich ermöglicht die Halterung der Kamera eine Positionierung in der Breite und einen über 180° Schwenkbereich der Kamera in vertikaler und horizontaler Richtung.

Die Abbildung 4.4 zeigt die am Querträger montierte Kamera.

²³CCD steht für „Charge-Coupled Device“ und ist ein lichtempfindliches Bauteil welches aus einer Vielzahl von Fotodioden besteht.

²⁴Detaillierte Informationen bezüglich der angebotenen Kameras der Firma „The Imaging Source“ finden sich auf: The-Imaging-Source (2009a)

²⁵Auflistung der Objektive der Firma „The Imaging Source“: The-Imaging-Source (2009b)

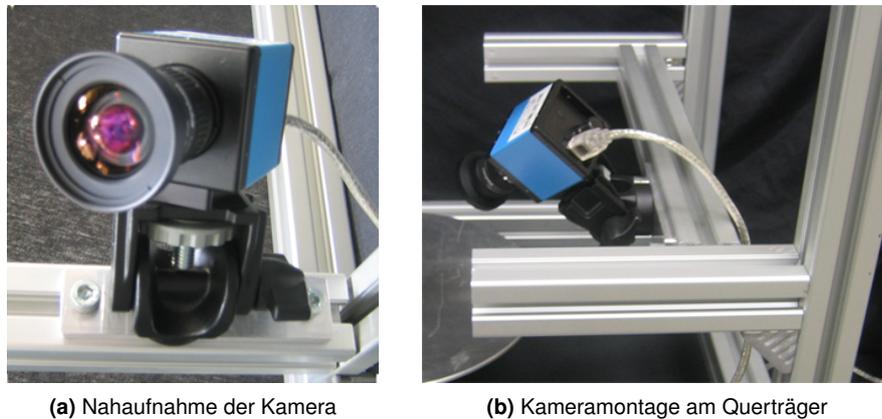


Abbildung 4.4.: Darstellung der montierten Kamera.²⁶

4.4. Laser

Ein Linienlaser mit der Typenbezeichnung „Z10V-TTL-SLG30“ der Firma Z-Laser²⁷ wird in dieser Arbeit verwendet. Dieser Laser hat eine gaußsche Lichtverteilung entlang der Laserlinie mit einer sehr gut fokussierbaren Optik. Der Öffnungswinkel beträgt 30° .

Wie die Kamera ist der Laser ebenfalls auf einem Querträger mit einer Halterung montiert, so dass eine beliebige Positionierung und Ausrichtung eingestellt werden kann. Die Abbildung 4.5 stellt dies grafisch dar.

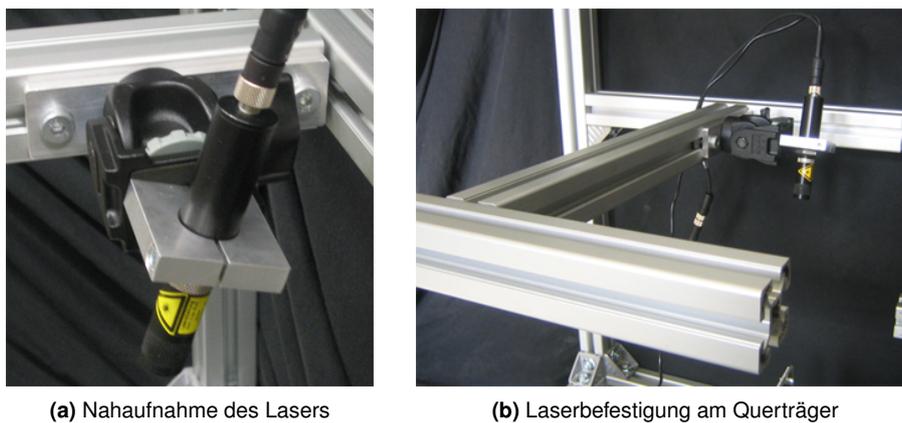


Abbildung 4.5.: Darstellung des angebrachten Lasers.²⁸

²⁶Bildquelle der Kameragrafiken: Schuhfuss (2007)

²⁷Homepage der Firma Z-Laser: Zimmermann und Lang (2004)

²⁸Bildquelle der Lasergrafiken: Schuhfuss (2007)

4.5. Drehmesstisch

Ein Drehmesstisch kommt in der Messtechnik zum Einsatz, wenn ein Objekt nicht aus einem erfassten Blickwinkel komplett vermessen werden kann. Es ist deshalb notwendig, das zu vermessende Objekt zu drehen. Der montierte Drehmesstisch besteht aus einem ansteuerbaren Drehteller, der das Objekt trägt und rotiert. Um die Achsenansteuerung des Drehtellers umzusetzen, wurde zusätzlich eine Positionierungssteuerung installiert und konfiguriert. In dieser Arbeit kam die universale Positionierungssteuerung „PS 90“ in Kombination eines Drehmesstisches „DMT65+SM240“ der Firma OWIS²⁹ zum Einsatz.



(a) Ansteuerbarer Drehteller



(b) Universal-
Positionierungssteuerung
PS 90

Abbildung 4.6.: Drehmesstisch in Kombination mit einer Positionierungssteuerung zur vollständigen Ansteuerung eines Drehtellers.

4.6. Kalibrierungsvorrichtung

Damit die Komponenten des Laserscanners zueinander kalibriert werden können, bedarf es einer Vorrichtung mit Kalibrierungsmerkmalen. Eine Kalibrierungsvorrichtung besteht aus einer Halterung und einem Kalibrierungsbild, das im Kalibrierungsprozess zu identifizierende Merkmale enthält.

Die Vorrichtung wurde aus einer Aluminiumplatte und einer Plexiglasscheibe zusammengesetzt. Befestigt wird die Vorrichtung mit zwei Schrauben, die in zwei auf der Rotationsachse des Drehtellers befindenden Löchern verschraubt werden. Die Abbildung 4.7 zeigt die Vorrichtung mit dem eingesetzten Kalibrierungsmuster. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die Vorrichtung unbedingt in einem 90° Winkel und damit orthogonal zum Drehteller platziert werden muss. Wird die Vorrichtung nicht orthogonal platziert, treten im Kalibrierungsprozess sehr hohe Ungenauigkeiten auf, die im Messvorgang zu großen Vermessungsfehlern führen. Deshalb wird zur Überprüfung der Rechtwinkligkeit ein Geodreieck verwendet.

²⁹Homepage des Herstellers: OWIS (2009)

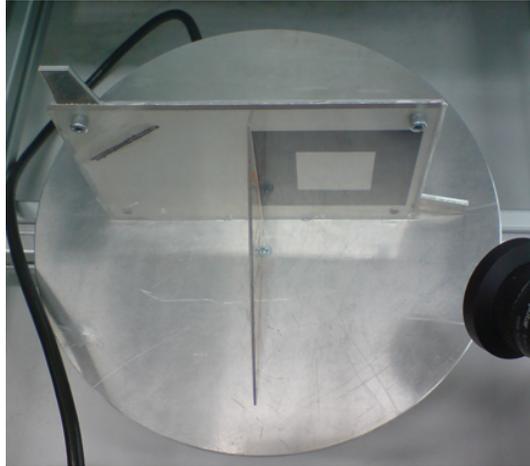


Abbildung 4.7.: Kalibrierungsvorrichtung mit eingelegtem Kalibrierungsmuster.

Das aktuelle Kalibrierungsmuster hat sich gegenüber zahlreichen anderen Mustervariationen durchgesetzt. Bei diesem Kalibrierungsbild werden die gesuchten Merkmale am schnellsten und ohne Falschdeutung von Kanten im Kalibrierungsprozess gefunden.

Das Kalibrierungsbild hat eine weiße Grundfarbe. Mit Hilfe eines aufgedruckten schwarzen Rahmens ergeben sich acht Eckpunkte, die im Kalibrierungsprozess erfasst werden müssen. Diese Merkmale sind im System bekannt. Das Kalibrierungsbild wird zwischen die Aluminiumplatte und der Plexiglasscheibe so eingespannt, das die linke untere Ecke des schwarzen Rahmens direkt auf den Mittelpunkt des Drehtellers liegt.

Nachfolgend ist das Kalibrierungsmuster dargestellt. Es enthält acht Merkmalspunkte, die als Koordinatenpunkte der Form (x, y) im System bekannt sind.

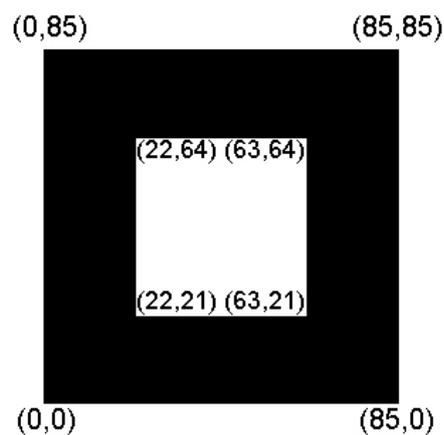


Abbildung 4.8.: Kalibrierungsmuster mit acht im System bekannten Merkmalspunkten.

5. Realisierung

Die Messprozedur zur Oberflächenrekonstruktion ist in acht Phasen gegliedert, die in den nachfolgenden Unterkapiteln ausführlich erläutert werden. Das Übersichtsdiagramm (Abbildung 5.1) veranschaulicht den schematischen Ablauf der 3D-Objektvermessung, ausgehend von der Kalibrierung, über die Erfassung der Laserlinien, bis zur Rekonstruktion der gesuchten Oberflächenstruktur in Form von dreidimensionalen Koordinatenpunkten. Die ersten vier Phasen sind notwendig, um die Oberflächenstruktur zu erfassen. Vier weitere optionale Phasen ermöglichen ein noch detailgetreueres, platzsparendes, modelliertes und digitales Abbild des zu vermessenden Objektes.

Inhalt

5.1. Kalibrierung	23
5.2. Bildaufnahme	23
5.3. Bildanalyse	24
5.4. Rekonstruktion der 3D-Koordinaten	25
5.5. Registrierung	26
5.6. Vernetzung	28
5.7. Modellierung	29
5.8. Nachbearbeitung	30
5.8.1. Beseitigung von Punktstörungen	30
5.8.2. Lochbeseitigung	30
5.8.3. Glätten der Oberfläche	31
5.8.4. Simplifizierung	32
5.8.5. Formatierung der Punktmenge	33

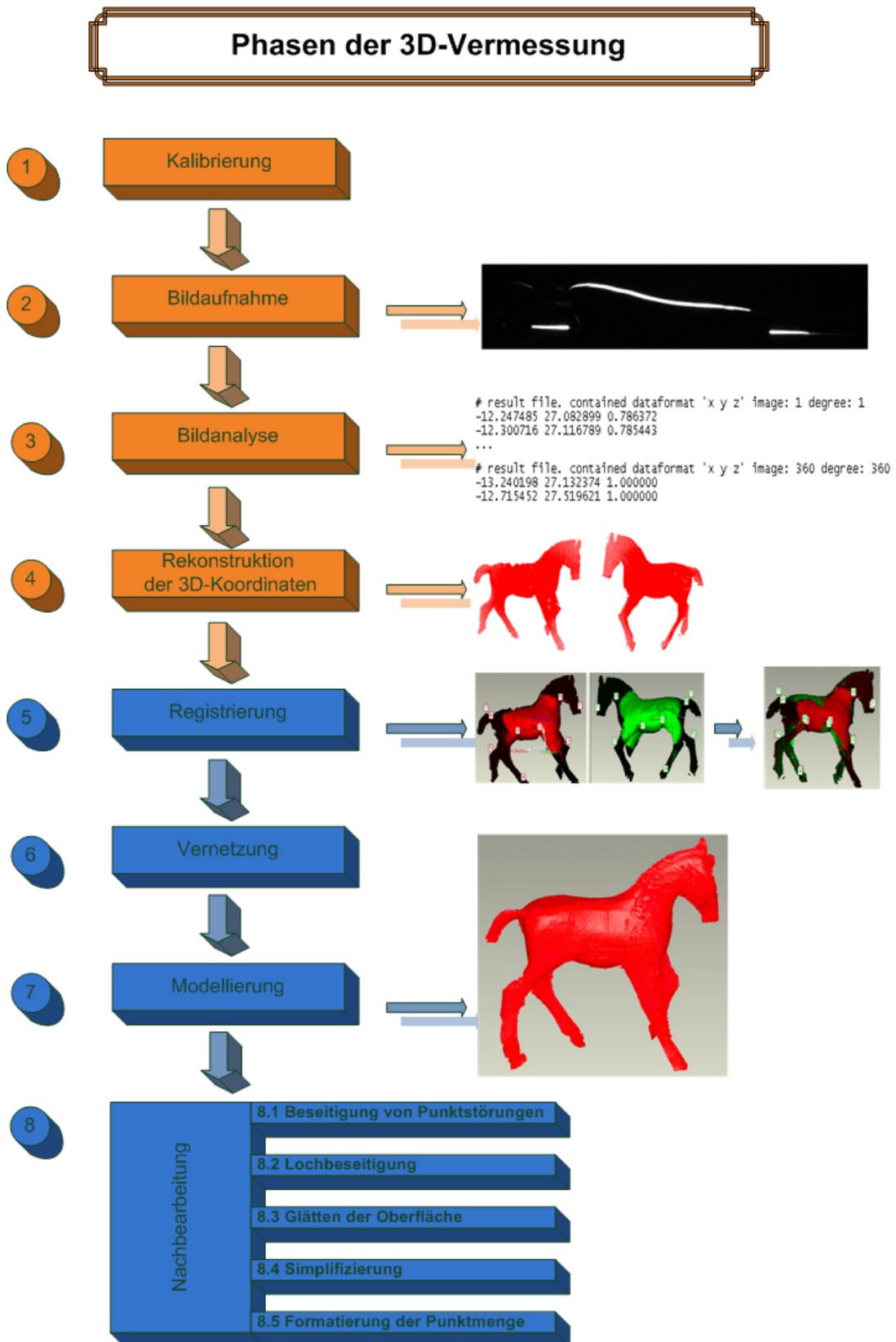


Abbildung 5.1.: Schematische Darstellung der Oberflächenrekonstruktion.

5.1. Kalibrierung

Die erste Stufe eines Messsystems ist die Kalibrierung der Systemkomponenten zueinander. Das Resultat des Kalibrierungsprozesses ist eine Ebene-zu-Ebene perspektivische Transformationsmatrix³⁰, welche es ermöglicht, Koordinaten in der Laserebene auf die korrespondierenden Koordinaten in der Bildebene zu transformieren.

Die exakte Ausrichtung der Kalibrierungsvorrichtung und die möglichst genaue Angabe der intrinsischen und extrinsischen Kameraparameter, sind für die Messgenauigkeit von großer Bedeutung.³¹

Eine ausführliche Beschreibung zur Ermittlung der Ebene-zu-Ebene perspektivischen Transformationsmatrix ist in SCHUHFUSS³² zu finden.

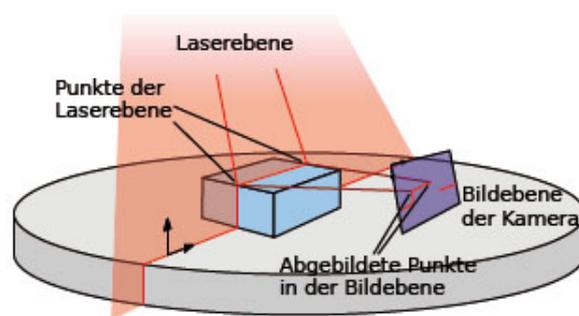


Abbildung 5.2.: Darstellung der Bildakquisition eines Lichtschnitts mit veranschaulichter Laserebene des Weltkoordinatensystems und der Bildebene des Bildkoordinatensystems.

5.2. Bildaufnahme

Nachdem die Kalibrierung erfolgreich abgeschlossen ist, kann ein Objekt auf den Drehteller platziert und vermessen werden. Bei der Vermessung dreht sich der Drehteller um 360 Grad. In dieser Aufnahmephase werden in vorher festgelegten Abschnitten, Bilder mit der Kamera aufgenommen und die zugehörigen Drehwinkel für die spätere Verarbeitung zwischengespeichert. Die aufgenommenen Bilder zeigen jeweils einen Lichtschnitt und damit einen weißen Linienschnitt vom Objektumriss.

³⁰Die perspektivische Transformation wurde im Kapitel 3.3 auf der Seite 12 beschrieben.

³¹Die intrinsischen und extrinsischen Kameraparameter wurden im Kapitel 3.3 auf der Seite 12 erläutert.

³²Schuhfuss (2007) [S.19-28]

5.3. Bildanalyse

Nach der Aufnahmephase werden in der Bildanalyse die Punkte auf der Laserlinie präzise und schnell erfasst.

Um die Erfassungsgeschwindigkeit zu steigern ist eine Bildvorverarbeitung vor jeder Bildanalyse von Nöten. In dieser wird ein so genanntes „Clipping“ durchgeführt. Clipping bezeichnet das Betrachten eines bestimmten Bereiches, der die zu verarbeitenden Informationen enthält. Dieser Bereich, der als „Region of Interest“ bezeichnet ist, wird vorab der Objektvermessung durch ein mit vier Punkten aufgespanntes Polygon gebildet. Der Geschwindigkeitsgewinn liegt in der nachfolgenden reduzierten Anzahl an Bildpixeln über die iteriert wird.

Die Detektion der Laserlinie im Bild startet mit einer Iteration über die Bildpixel beginnend in der linken oberen Ecke der „Region of Interest“. Bei jedem Pixel wird überprüft, ob dieser einen Helligkeitsschwellwert übersteigt. In dem Fall, dass der Helligkeitswert des Pixels größer als der Schwellwert ist, wird er als erkannter Punkt markiert. Andernfalls ist der Punkt nicht weiter von Bedeutung und wird ignoriert.

Ein vor dem Vermessungsstart einstellbarer Reflexionsfilter überprüft im aktivierten Zustand den Pixel im Fall einer Markierung, um eine weitere Bedingung. Da ein Punkt durch eine Reflexion o.ä. entstehen kann, findet an dieser Stelle eine Überprüfung der umliegenden Pixel statt, um eine Bildstörung auszuschließen.³³

Im Nachhinein werden mit Hilfe aller markierten Punkte, die Mittelpunkte der Laserlinie ermittelt. Im letzten Abschnitt der Bildakquisition müssen diese erkannten Mittelpunkte von der Bildebene in die Laserebene transformiert werden. Dies geschieht, indem jeder erkannte Mittelpunkt der Laserlinie mit der in der Kalibrierung berechneten inversen perspektivischen Transformationsmatrix multipliziert wird.

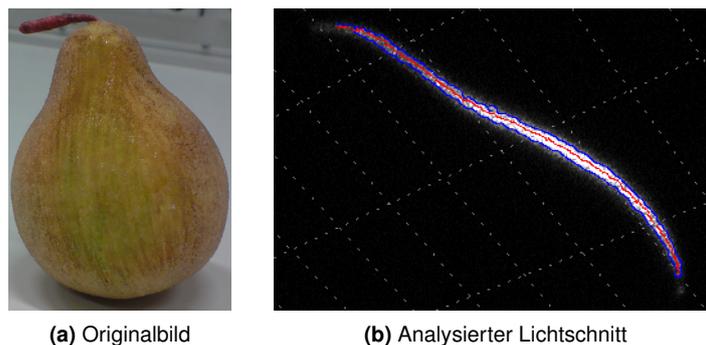


Abbildung 5.3.: Analyse eines Lichtschnittes. Die blau markierten Punkte stellen die identifizierten Kantenpunkte der Laserlinie dar. Rot markierte Punkte kennzeichnen die ermittelten Mittelpunkte.

³³Weitere Informationen zum Reflexionsfilter finden sich in (Schuhfuss, 2007).

5.4. Rekonstruktion der 3D-Koordinaten

Die vollständige Rekonstruktion der 3D-Koordinaten erfordert eine weitere Transformation. In der Bildaufnahmephase wird zu jedem Bild der Drehwinkel θ zwischengespeichert. Diese Bildinformation wird verwendet, um die erkannten Koordinatenpunkte aus der Bildanalysephase an die richtige Position im Weltkoordinatensystem zu positionieren. Mit Hilfe einer Rotationsmatrix \underline{R} ³⁴ werden die erkannten Koordinaten $P_q(x_q, y_q, 1)$ mit einer Rotation um die Y-Achse des Weltkoordinatensystems an die richtige Position $P_z(x_z, y_z, z_z)$ rotiert:

$$\vec{P}_z = \begin{bmatrix} x_z \\ y_z \\ z_z \end{bmatrix} = \vec{P}_q \cdot \underline{R} = \begin{bmatrix} x_q \\ y_q \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Die Nachfolgende Abbildung 5.4 stellt diese Rotation grafisch dar.

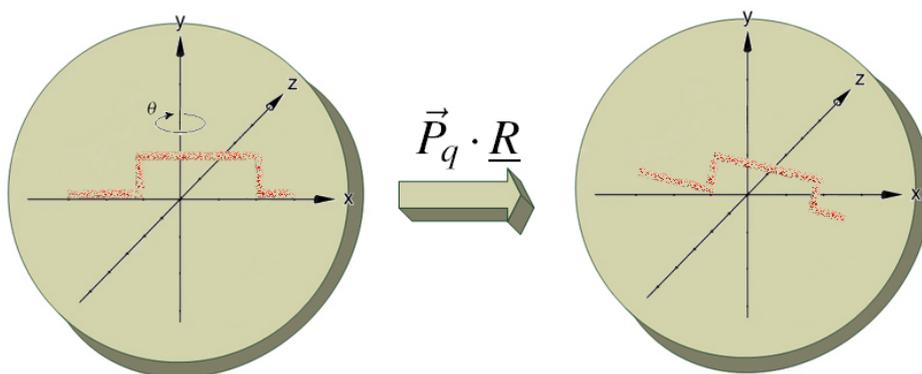


Abbildung 5.4.: Rekonstruktion der 3D-Koordinaten.

In der rechten Grafik sind die um θ rotierten Koordinatenpunkte eines Lichtschnittes dargestellt.

Die somit ermittelten 3D-Koordinaten beschreiben die Oberflächenstruktur des zu vermessenden Objektes.

Dabei bilden alle 3D-Koordinaten eine Koordinatenmenge, die als so genannte „Punktwolke“ bezeichnet wird. Die beschreibenden Informationen der Punktwolke sind in Abbildung 5.5 dargestellt.

³⁴Beschrieben im Kapitel 3.10 auf Seite 12.

```
# result file. contained dataformat 'x y z' image: 1 degree: 1
-12.247485 27.082899 0.786372
-12.300716 27.116789 0.785443
...

# result file. contained dataformat 'x y z' image: 2 degree: 2
-12.932054 27.027191 0.549012
-12.655300 27.342342 0.558677
...

# result file. contained dataformat 'x y z' image: 3 degree: 3
-12.622746 27.447149 0.339842
-12.838274 26.924780 0.328547
...

# result file. contained dataformat 'x y z' image: 360 degree: 360
-13.240198 27.132374 1.000000
-12.715452 27.519621 1.000000
...
```

Abbildung 5.5.: Formatierung der 3D-Datenmenge.

5.5. Registrierung

Die geometrischen Eigenschaften eines zu vermessenden Objektes lassen es nicht immer zu, dass ein Objekt in einem Scanvorgang vollständig vermessen werden kann.

Beispielhaft sei ein Spielzeugauto auf einem Drehteller positioniert. Dabei sind die Konturen durch die Rotation des Drehtellers von oben und von den Seiten von dem Laser beleuchtet und von der Kamera gut zu erfassen. Der Fahrzeuguntergrund kann nicht vom Laser beleuchtet und des Weiteren auch nicht von der Kamera erfasst werden. Eine vollständige Rekonstruktion der Oberflächenstruktur ist daher nicht mit einem einzigen Scanvorgang möglich. Um den Fahrzeuguntergrund und damit alle Konturen des Objektes erfassen zu können, wird eine zweite Objektvermessung durchgeführt. In dieser wird das Auto auf dem Kopf positioniert.

Die Notwendigkeit für mehrere Objektvermessungen kann ebenfalls durch Anforderungen an das zu vermessende Objekt gegeben sein. Eine Anforderung ist zum Beispiel die hochgenaue Erfassung der Türen und Scheinwerfer eines Kraftfahrzeuges. In diesem Fall bieten sich für diese Fahrzeugkomponenten Nahaufnahmen an, die in einer Registrierung anschließend zusammengefasst werden.

Zwei Registrierungsverfahren zur Vereinigung von überlappenden Oberflächenscans werden weitestgehend unterschieden. Bei der manuellen Registrierung wird mit Hilfe von Passpunkten gearbeitet. Dieses Verfahren kann nur produktiv angewendet werden, wenn mindestens drei korrespondierende Passpunktpaare in den zu registrierenden Punktwolken existieren, und diese ein Dreieck bilden. Um eine gute Vereinigung der Punktwolken zu erzielen, sollten möglichst viele Passpunkte in den Punktwolken markiert werden. Bei den Triangulations- und Laufzeitverfahren ist diese stabile Registrierungsart derzeit das Standardverfahren.

Das zweite Verfahren um Punktwolken zu vereinigen, ist die automatische Registrierung. Mit Hilfe von Algorithmen werden charakteristisch übereinstimmende Punktpaare bzw. Merkmale in den Punktwolken gesucht, um damit anschließend die Registrierung durchzuführen. Der

populärste Algorithmus ist der „Iterative Closest Point (ICP)“³⁵ Algorithmus auf dem zahlreiche Weiterentwicklungen basieren.

Bei der Registrierung von zwei Punktwolken P_1 und P_2 versucht der „Iterative Closed Point“ Algorithmus zu jedem Punkt aus der Punktmenge P_2 den korrespondierenden Punkt in der Punktmenge P_1 zu finden. Mit Hilfe der korrespondierenden Punkte wird eine Transformation T , die aus einer Rotation und einer Translation besteht, berechnet. Diese Transformation ermöglicht die Registrierung der Punktwolke P_2 in P_1 . Somit wird der Algorithmus in drei Phasen eingeteilt. Diese werden iterative durchlaufen:

1. Suche nach den korrespondierenden Punkten aus P_1 und P_2
2. Berechnung der Transformation T zur Registrierung
3. Anwendung der errechneten Transformation T

Der Algorithmus terminiert wenn der Fehler der letzten Iteration einen Schwellwert unterschreitet oder die maximale Anzahl an Iteration erreicht wird.³⁶

Im Nachfolgenden ist eine mit dem Softwareprodukt „Geomagic Studio 9“³⁷ durchgeführte manuelle Registrierung von zwei Oberflächenscans eines Spielzeugautos dargestellt.

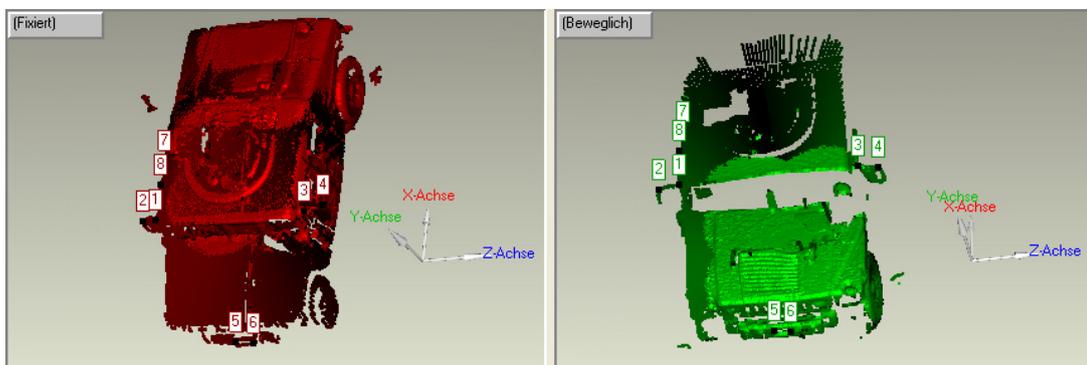


Abbildung 5.6.: Korrespondierende Passpunkte müssen vor der manuellen Registrierung markiert werden.

³⁵Vorgestellt 1992 von Paul J. Besl und Neil D. McKay. Informationen über den Algorithmus und über Weiterentwicklungen finden sich in (Besl und McKay, 1992), (Maurer u. a., 1996) und (Masuda und Yokoya, 1994).

³⁶Die Abbruchkriterien unterscheiden sich in der Praxis.

³⁷Homepage des Herstellers: Geomagic (2009)

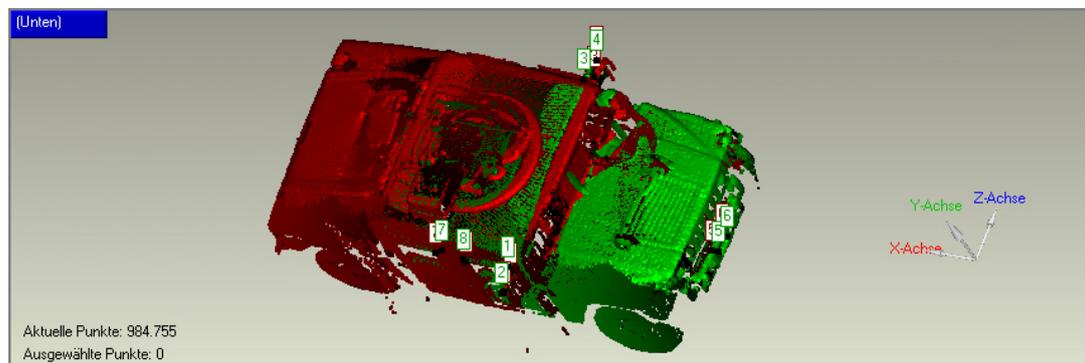


Abbildung 5.7.: Ergebnis einer manuellen Registrierung zweier Oberflächenscans zu einer Punktwolke.

5.6. Vernetzung

Die Vernetzungsphase befasst sich mit der Erzeugung eines Polygonnetzes, welches im Sprachgebrauch häufig auch als „Mesh“ oder „Wireframe“ bezeichnet wird. Gebräuchliche Polygone bestehen aus drei, vier oder fünf Eckpunkten³⁸.

In dieser Bachelorarbeit wurde das Programm „Point Cloud“ der Firma SYCODE³⁹ in die entwickelte Software integriert. Es ermöglicht eine Erzeugung eines Polygonnetzes, bestehend aus Polygonen mit jeweils drei Eckpunkten. Dazu werden alle Punkte einer Punktmenge analysiert und über eine Dreiecksvermaschung⁴⁰ zu einem Polygonnetz schrittweise aufgebaut. Für die Vermaschung wird zum Beispiel die räumliche Delaunay-Triangulation⁴¹ verwendet.

In dem Fall, dass eine Vernetzung mit aus drei Punkten bestehenden Polygonen durchgeführt werden soll, geht die 2D-Delaunay-Triangulation folgendermaßen vor.

Drei Punkte die ein Dreieck bilden werden gesucht. Dabei dürfen innerhalb eines Kreises (siehe Abbildung 5.8), auf dem diese Punkte liegen, keine anderen Punkte vorhanden sein. Diese entstehenden Dreiecke des Dreiecksnetzes erfüllen somit alle die so genannte Umkreisbedingung. Dadurch wird der kleinste Innenwinkel über alle Dreiecke maximiert.

³⁸Ein Eckpunkt wird im Singular als „Vertex“ und im Plural als „Vertice“ bezeichnet.

³⁹Produktinformationen finden sich auf (Sycode, 2009)

⁴⁰Die Dreiecksvermaschung wird ebenfalls als Triangulierung bezeichnet.

⁴¹Detaillierte Informationen zur räumlichen Delaunay-Triangulation sind in (Fang und Piegl, 1995) und (Cignonia u. a., 1998) nachzuschlagen.

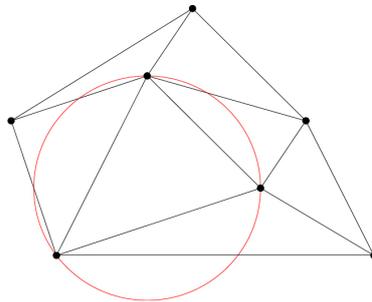


Abbildung 5.8.: Veranschaulichte Umkreisbedingung.⁴²

Die räumliche Delaunay-Triangulation baut auf der 2D-Delaunay-Triangulation auf. Dort besteht statt der Umkreis- eine Umkugelbedingung, welche aus jeweils vier Punkten ein Tetraeder bildet.

Die Abbildung 5.9 stellt das Ergebnis einer vernetzten Punktwolke dar.

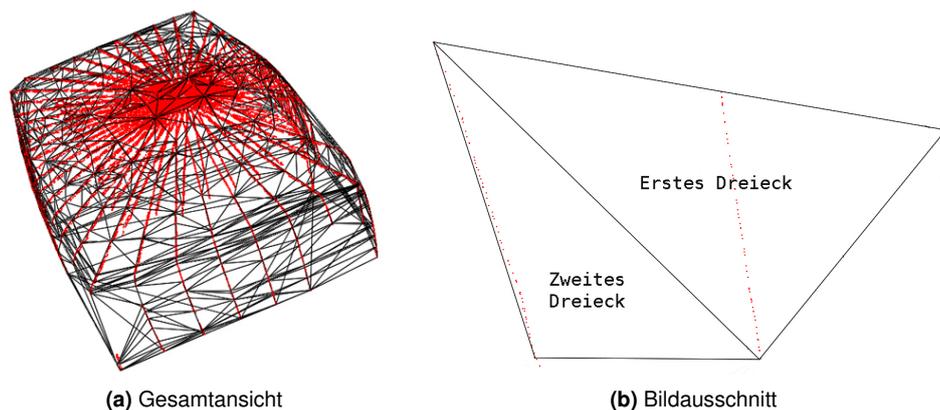


Abbildung 5.9.: Resultat einer Dreiecksvermaschung.

5.7. Modellierung

Nachdem die Grundlage zur Flächenerzeugung geschaffen wurde, können aufbauend auf einem Polygonnetz, Flächen modelliert werden. Dazu werden Polygone gesucht, die Flächen lokal approximieren. Dabei ist es das Ziel den geometrischen Fehler der Approximation möglichst zu minimieren.⁴³

Mit Hilfe des integrierten Programms „Point Cloud“ ist es möglich Polygonnetze modelliert darzustellen. Zwei Arten der Modellierung sind dabei verfügbar und zu unterscheiden. Auf der einen Seite kann ein konvexes Polygonnetz mit einer Wölbung nach außen und zum anderen ein konkaves Polygonnetz mit einer Wölbung nach innen erzeugt werden.

⁴²Bildquelle der veranschaulichten Umkreisbedingung: Hofer und Hutter (2009)

⁴³Wissenswertes über die Modellierung von Punktwolken beschreibt das Paper „Computing and Rendering Point Set Surfaces“ in (Alexa u. a., 2003) anschaulich.

Grauwertinformationen⁴⁴ waren aufgrund der notwendigen kompletten Abdunkelung des Laserscanners während der Vermessung nicht zu erfassen, sodass auch keine Helligkeitsintensitäten der Punkte im „Point Cloud“-Programm Verwendung fand. Dadurch wird das in der Modellierungsphase entstehende Flächenmodell in einer manuell ausgewählten Farbe dargestellt. Realisierbar wäre für jede Objektvermessung ein zweiter simultaner Scanvorgang ohne vollständige Lichtabschottung. Dies würde die Komplexität und Geschwindigkeit für jede komplette Objektvermessung ansteigen lassen. Es könnten aber Helligkeitsinformationen mit der in dieser Arbeit verwendeten Schwarz/Weiß-Kamera mit erfasst werden. Eine Farbkamera wäre mit diesem Prinzip sogar in der Lage, Farbinformationen bezüglich der Objektoberfläche zu erfassen, um mit diesen zusätzlichen Informationen die Originaltextur des Objektes farbig zu rekonstruieren.

5.8. Nachbearbeitung

In der Nachbearbeitungsphase werden, um dem ursprünglichen Objekt noch genauer zu entsprechen, Veränderungen an Punktwolken, Polygonnetzen oder modellierten Modellen durchgeführt. Die fünf Nachbearbeitungsphasen werden nachfolgend erläutert.

5.8.1. Beseitigung von Punktstörungen

Vereinzelnde Punkte die nicht zum vermessenden Objekt gehören, treten immer wieder in Messergebnissen auf. Diese Störungen können leicht erkannt und entfernt werden. Dafür stellt „Geomagic Studio 9“ Operatoren zur Verfügung, mit dem sich falsche Messwerte manuell markieren und entfernen lassen.

5.8.2. Lochbeseitigung

Die Beseitigung von Löchern in der Oberflächenstruktur wird häufig als „Hole Filling“ bezeichnet. Oft wird nach dem Scanvorgang festgestellt, dass bestimmte Bereiche nicht vom Scanner erfasst wurden. Diese entstandenen Löcher im Messergebnis der Oberflächenstruktur sind zum Beispiel auf Abschattungen zurückzuführen.

„Geomagic Studio 9“ ermöglicht die manuelle und automatische Lochbeseitigung. Manuell können Punkte zur Lochfüllung einzeln gesetzt werden. Da dies ziemlich viel Zeit in Anspruch nimmt, bietet sich die automatische präzise Lochbeseitigung an. Dazu muss nur ein Bereich detektiert werden, der den zu füllenden Bereich enthält.

⁴⁴Ein Grauwert kennzeichnet den Helligkeits- oder Intensitätswert eines einzelnen Oberflächenpunktes.

5.8.3. Glätten der Oberfläche

Auf dem Markt existieren zahlreiche Glättungsverfahren, die je nach Oberflächenstruktur des Polygonnetzes ihre Verwendung finden. Sie werden angewendet um Kanten und Ecken eines Polygonnetzes feiner darzustellen. Zu den bekannten Glättungsverfahren gehören Laplace Smoothing, Anisotropische Diffusion, Multiresolution Analysis, Mean Curvature Flow, Gauß-, Median-, Wiener-, Bilateral Filter und weitere.

In dem Fall, dass viele Ausreißer in einer Punktmenge existieren, wird der Median-Filter vorzugsweise, ohne Verschmierungseffekte eingesetzt. In der Bildverarbeitung wird der Median einer Bildpixelmenge folgendermaßen ermittelt. Zuerst werden alle Helligkeitswerte der Bildpixelmenge aufsteigend sortiert. Anschließend wird der Wert in der Mitte, der sortierten Bildpixelmenge, ausgewählt. Dieser ist der Median.

Die in Abbildung 5.10 dargestellte Grafik stellt die Wirkung eines Median-Filters dar. Dabei wurde der Median jeweils aus drei benachbarten Werten berechnet.

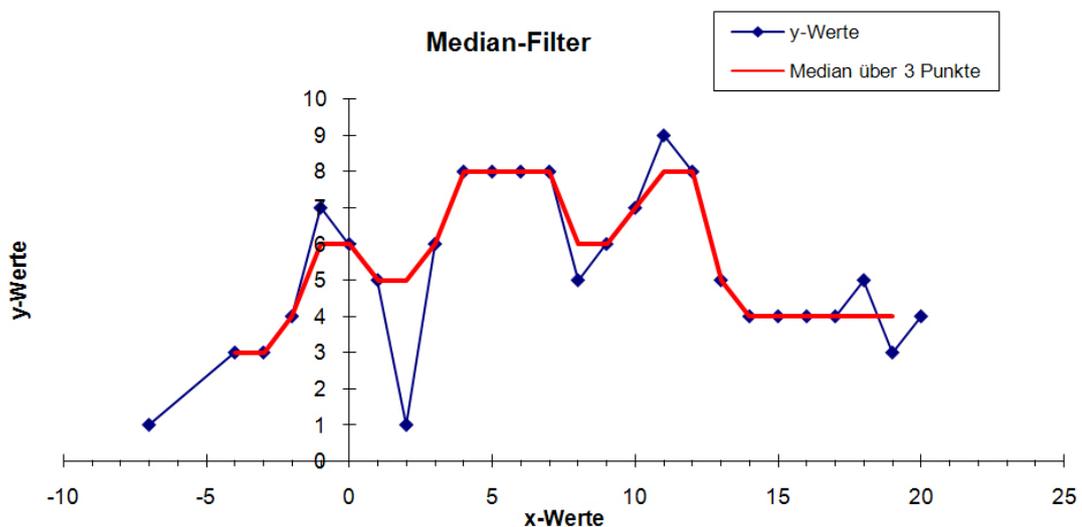


Abbildung 5.10.: Einwirkung eines Median-Filters.

Auf Polygonnetze bezogen wird statt der Helligkeitswerte die Richtung der Einheitsnormalen verwendet. Somit erfolgt eine Änderung der Flächennormalen.

Beim Glättungsverfahren ist es besonders wichtig, dass die geometrischen Merkmale wie Kanten und Ecken erhalten bleiben. Das vermessene Objekt soll nicht vom Originalobjekt verändert, sondern von Störungen befreit werden.

Die in Abbildung 5.11 dargestellten Grafiken zeigen ein mit dem Softwareprodukt „Geomagic Studio 9“ angewandtes Glättungsverfahren. Erkennbar sind der Erhalt der Kanten und die erfolgreiche Oberflächenglättung.

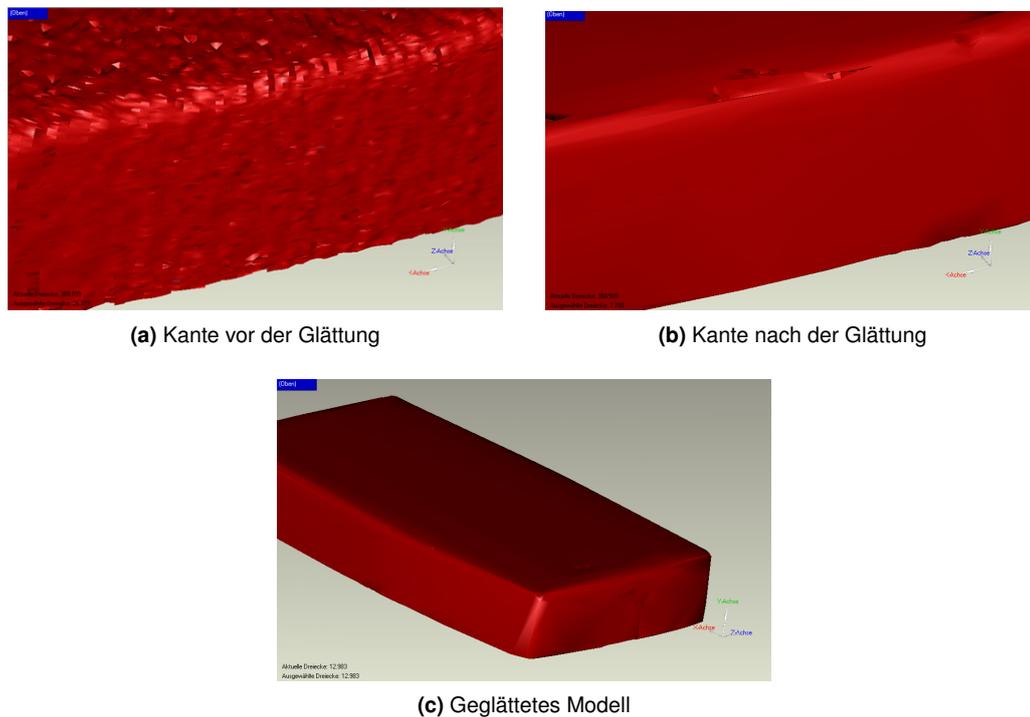


Abbildung 5.11.: Ergebnis eines erfolgreich angewandten Glättungsverfahrens.

Nähere Informationen über gängige Glättungsverfahren und eine intensive Befassung mit einer Erweiterung des Bilateralen Filters finden sich in (Haase, 2005) und (Jones, 2003).

5.8.4. Simplifizierung

Die Simplifizierung befasst sich mit der Reduzierung einer Punktmenge, die eine Punktwolke, ein Polygonnetz oder ein modelliertes Modell beschreibt. Einzelne Flächen eines modellierten Modells werden durch Eckpunkte beschrieben. Eine Reduzierung dieser Punktmenge wird, indem breite und glatte Flächen mit weniger Polygonen beschrieben werden, erzielt. So können zum Beispiel zwei Flächen die jeweils durch drei Eckpunkte definiert sind, auf der gleichen Ebene liegen und derart positioniert sind, das eine Vereinigung beider Flächen zu einer gemeinsamen Flächenbeschreibung führt, von sechs auf drei Beschreibungspunkten reduziert werden. Dabei erfolgt die Flächenreduzierung mit geringer oder sogar ohne Verlust an Genauigkeit. Weitere Informationen bezüglich Simplifizierungsverfahren sind in KEßLER⁴⁵ nachzuschlagen.

⁴⁵Simplifizierungsverfahren finden sich in (Keßler, 2008).

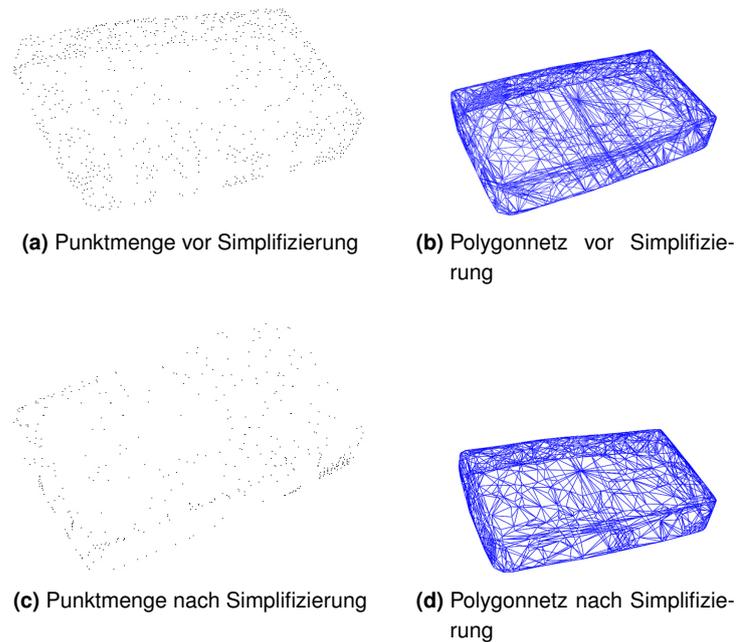


Abbildung 5.12.: Simplifizierung einer Punktmenge.

Die Punktmenge, die ein Polygonnetz beschreibt sind in Abbildung a und c zu sehen. Es ist gut zu erkennen, dass sich mit einer reduzierten Punktmenge (Abbildung c) ein gleich gutes Polygonnetz erzeugen lässt.

5.8.5. Formatierung der Punktmenge

Im letzten Schritt des Realisierungsprozesses wird die Datenmenge, die eine Punktwolke, ein Polygonnetz oder ein modelliertes Modell beschreibt, für die Weiterverarbeitung in anderweitigen Softwareprodukten formatiert abgespeichert.

Damit die objektbeschreibende Punktmenge in „Point Cloud“, „Geomagic Studio“, „AutoCAD“ und in weiteren Softwareprodukten Weiterverwendung finden kann, werden in dieser Phase die Beschreibungsinformationen des Objektes, wie in Abbildung 5.13 dargestellt abgespeichert.

```
-12.247485 27.082899 0.786372
-12.300716 27.116789 0.785443
-12.121478 27.036463 0.788571
-12.086360 27.025757 0.789184
-11.971641 27.002216 0.791187
-11.826903 26.986923 0.793713
-11.935146 26.711134 0.791824
```

Abbildung 5.13.: Formatierung der 3D-Datenmenge.

6. Implementierung

In diesem Kapitel ist die in dieser Arbeit entwickelte Software zur Vermessung von Gegenständen detailliert beschrieben.

Die Software wurde komplett in C++ geschrieben, arbeitet pfadunabhängig und hat eine grafische Benutzeroberfläche, die zur Bedienung des Laserscanners und zur Verarbeitung der Messdaten dient.

Inhalt

6.1. Betriebssystemunterstützung	34
6.2. Grafische Oberfläche	35

6.1. Betriebssystemunterstützung

Das Softwareprodukt wurde so entworfen und entwickelt, dass es auf allen Windows Betriebssystemen einwandfrei funktionieren sollte. Die in der Tabelle 6.1 aufgelisteten Betriebssysteme wurden mit der entwickelten Software erfolgreich getestet.

Betriebssystem

Windows XP Professional (SP3)
Windows XP Media Center Edition (SP3)
Windows Vista Home Premium (SP1)
Windows Vista Business

Tabelle 6.1.: Auflistung der getesteten Betriebssysteme.

6.2. Grafische Oberfläche

Die Laserscannersoftware wird mit einer ausführbaren Datei gestartet. Daraufhin erscheint ein so genannter „Splash Screen“, der den Laserscanner ohne Verkleidung mit seinen einzelnen Komponenten grafisch darstellt.



Abbildung 6.1.: Splash Screen beim Starten der Laserscannersoftware.

Nachdem die Software vollständig geladen ist, erscheint das Hauptmenü. In dem Menü sind vier wichtige Funktionsmöglichkeiten von Bedeutung. Diese sind nummeriert in Abbildung 6.2 dargestellt.

1. Die Nummer eins kennzeichnet die Möglichkeit über „View -> Go to View“ zu jedem gewünschten Ansichtenfenster zu wechseln.
2. Eine komplett auf Doxygen⁴⁶ basierende Code-Dokumentation wird über den mit der Nummer zwei markierten Weg „Help -> Documentation“ aufgerufen. Mit dieser Dokumentation kann der komplette ausführlich dokumentierte Sourcecode des Laserscanners betrachtet werden.⁴⁷
3. Mit dem mit der Nummer drei gekennzeichneten Button wechselt die Ansicht zum Setupbereich des Laserscanners um ein Objekt zu vermessen.
4. Durch das Betätigen des zweiten Buttons auf diesem Ansichtenfenster werden dem Nutzer Scanergebnisse von Objekten, die im Laufe des Entwicklungsprozesses entstanden sind, grafisch dargestellt. Diese sollen einen kleinen Eindruck vermitteln, welche Ergebnisse der Laserscanner erzielen kann.

⁴⁶Internetadresse des Herstellers: van Heesch (2009)

⁴⁷Aufgrund der komplexen Sourcecode-Dokumentation wird in dieser Arbeit nicht weiter auf den entwickelten Sourcecode eingegangen.

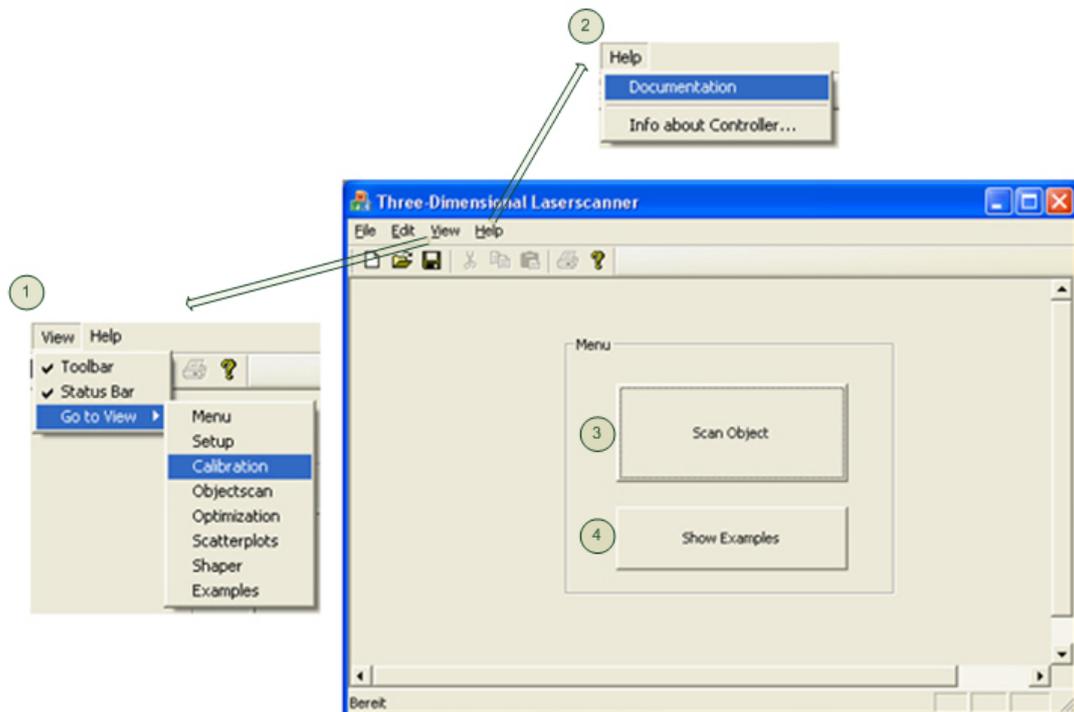


Abbildung 6.2.: Hauptmenü.

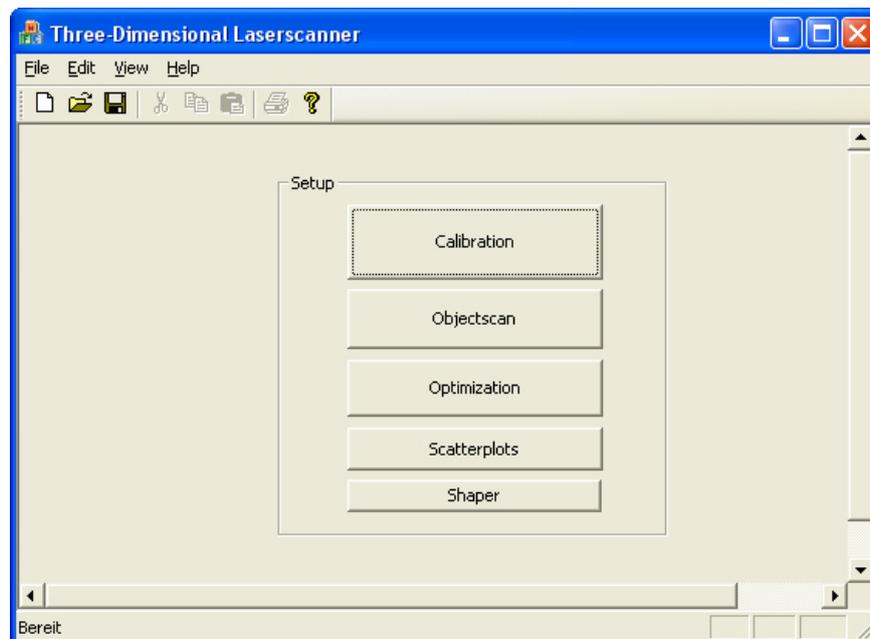


Abbildung 6.3.: Setupmenü.

Das Setupmenü ist die wichtigste Ansicht im gesamten Programm. Ausgehend von dem obersten- von insgesamt fünf vertikal ausgerichteten Buttons, werden diese fünf Arbeitsabläufe schrittweise nach unten abgearbeitet, um ein komplett modelliertes Objekt zu rekonstruieren. Liegen bereits Kalibrierungsergebnisse, Messdaten oder sogar vollständig modellierte Modelle vor, können auch gewünschte Schritte vom Benutzer übersprungen werden.

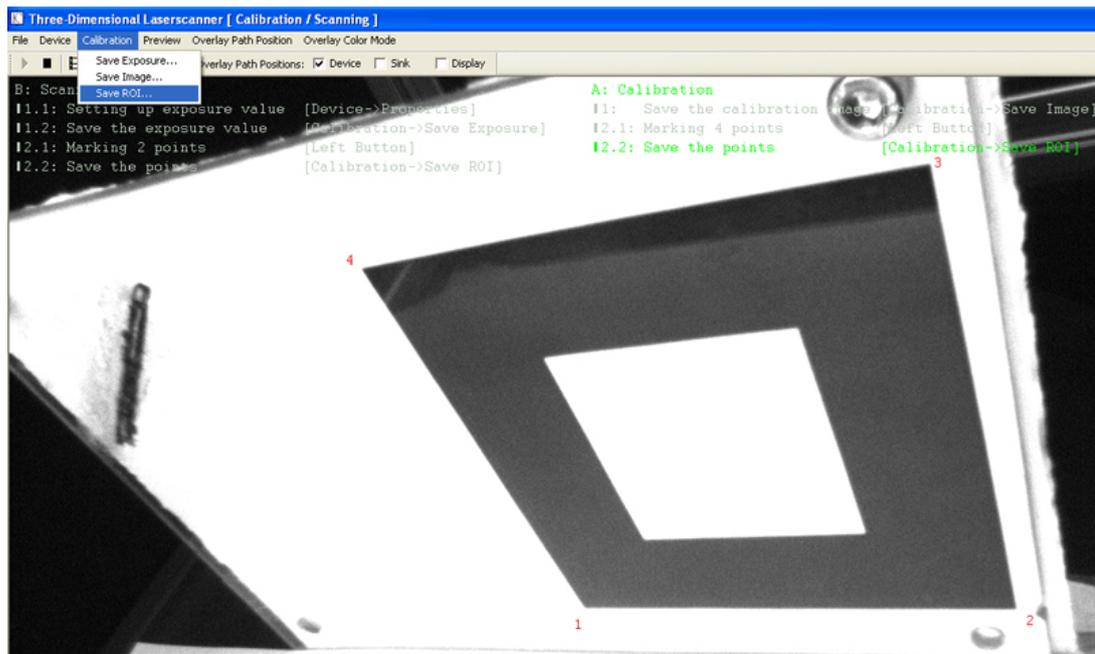


Abbildung 6.4.: Ein Kalibrierungsbild zu speichern und eine „Region of Interest“ mit 4 Punkten aufzuspannen sind Aufgaben der Kalibrierungsvorbereitung.

Stufe 1: Kalibrierung

Der erste Schritt einer vollständigen Vermessung ist die Kalibrierung. Beim Betätigen des Kalibrierungsbuttons wird ein Fenster (Abbildung 6.4) geöffnet, welches beim Anschluss der Laserscanner-Kamera einen Livescreen erscheinen lässt. Im Livestream sollte die zuvor auf dem Drehteller montierte Kalibrierungsplatte mit eingelegtem Kalibrierungsmuster zu sehen sein. Der an dieser Stelle weiterentwickelte Programmcode basiert auf einem von der Firma „The Imaging Source“⁴⁸ entworfenem Sourcecode, der es ermöglicht, einen Livescreen einer Kamera darzustellen und in diesen Text hineinzuschreiben. Der Sourcecode wurde in dieser Arbeit so weiterentwickelt, dass der Benutzer textuell schrittweise durch die vorbereitenden Kalibrierungsschritte geleitet wird. Des Weiteren wurde die Möglichkeit eine „Region of Interest“ in den Livestream zu zeichnen entwickelt und integriert. Dazu werden mit der Maus vier Punkte markiert, welche die „Region of Interest“ aufspannen.

Sind alle Kalibrierungsschritte erfolgreich durchgeführt worden, wechselt der Anleitungstext im Livescreen seine Farbe und das Fenster kann geschlossen werden. Das Schließen des

⁴⁸Internetadresse zum Sourcecode, der es ermöglicht einen Livescreen darzustellen:
The-Imaging-Source (2008b)

Fensters verursacht die Anzeige der eingestellten Kalibrierungsparameter und ermöglicht den Kalibrierungsstart mit dem in Abbildung 6.5 zu sehenden Button, mit der Aufschrift „Calibrati- on“. Daraufhin läuft im Hintergrund der Kalibrierungsprozess, der im Kapitel 5.1 beschrieben wurde. Im Anschluss an dem Kalibrierungsvorgang erscheinen in dem Feld „Debug Informati- ons“ alle berechneten Informationen, wie zum Beispiel die Koeffizienten der Ebene-zu-Ebene perspektivischen Transformationsmatrix.

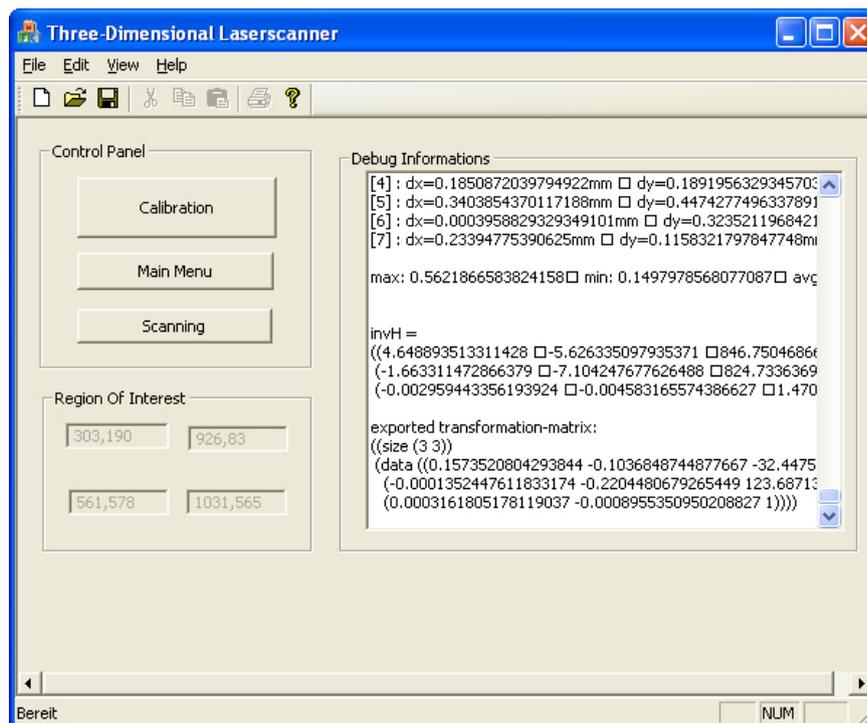


Abbildung 6.5.: Das Ergebnis einer Kalibrierung.

Links unten im Bild sind die 4 Punkte der „Region of Interest“ platziert. Rechts im Bild sind alle wichtigen Informationen einschließlich der Ebene-zu-Ebene perspektivischen Transformationsmatrix des Kalibrierungsprozesses abgelegt.

Stufe 2: Objektvermessung

Anschließend kann zum nächsten Schritt übergegangen werden. Dieser ist die Objektvermessung (Button „Scanning“). Dort erscheint wieder das Fenster mit einem Livescreen. Der Livescreen sollte das auf dem Drehteller platzierte und zu vermessende Objekt mit einem gut ausgerichteten Laser anzeigen. Zuerst muss der Belichtungswert der Kamera eingestellt und gespeichert werden. Der Belichtungswert bestimmt die Lichtintensität durch die das Objekt belichtet wird. Je höher der Belichtungswert ist, desto länger, breiter und intensiver ist die Beschaffenheit der Laserlinie. Dabei ist zu beachten, dass die Laserlinie optimal so eingestellt wird, dass die Linie circa so lang wie der Objektdurchmesser ist und eine Breite von 2-4 mm aufweist.

Eine mit „Maple 12“⁴⁹ berechnete Umrechnungsfunktion transformiert den aktuell eingestellten Belichtungswert x_q in einen anderen Wertebereich, sodass dieser Belichtungswert später in der Objektvermessung geladen und verwendet werden kann. Ausgehend von der Modellfunktion⁵⁰ 6.1 wurde mit Maple und den gegebenen Abbildungskoodinaten, die Quell- und Zielbelichtungswerte, eine nichtlineare Ausgleichsrechnung⁵¹ durchgeführt. Die im Resultat der Ausgleichsrechnung ermittelten drei Koeffizienten a , b und c der Modellfunktion sind in der Formel 6.2 zu sehen. Im zweiten Schritt muss wie in den Vorbereitungseinstellungen zur Kalibrierung eine „Region of Interest“ festgelegt werden. In diesem Fall sollte die „Region of Interest“ den Bereich definieren, indem sich das zu vermessende Objekt während der Bildaufnahme befindet. Dieser Bereich sollte unter dem Aspekt der Zeiteffizienz möglichst exakt bestimmt werden, da sonst Bildflächen analysiert werden, die keine zu erfassenden Messpunkte der Laserlinie enthalten.

$$x_z = \frac{a}{\exp^{b \cdot x_q}} + c \quad (6.1)$$

$$x_z = \frac{9.58}{\exp^{0.0259 \cdot x_q}} - 9.27 \quad (6.2)$$

Nachdem die Vorbereitungsschritte der Objektvermessung durchgeführt wurden, kann das Fenster geschlossen werden. Im Anschluss erscheint ein Fenster (Abbildung 6.6) mit weiteren Einstellungsmöglichkeiten zur Objektvermessung. Nach Angabe der insgesamt aufzunehmenden Bilder innerhalb einer 360 Grad Drehtellerrotation wird der Scanvorgang mit dem mit „Scanning“ bezeichneten Button gestartet. Alle anderen Einstellungen sind optional.

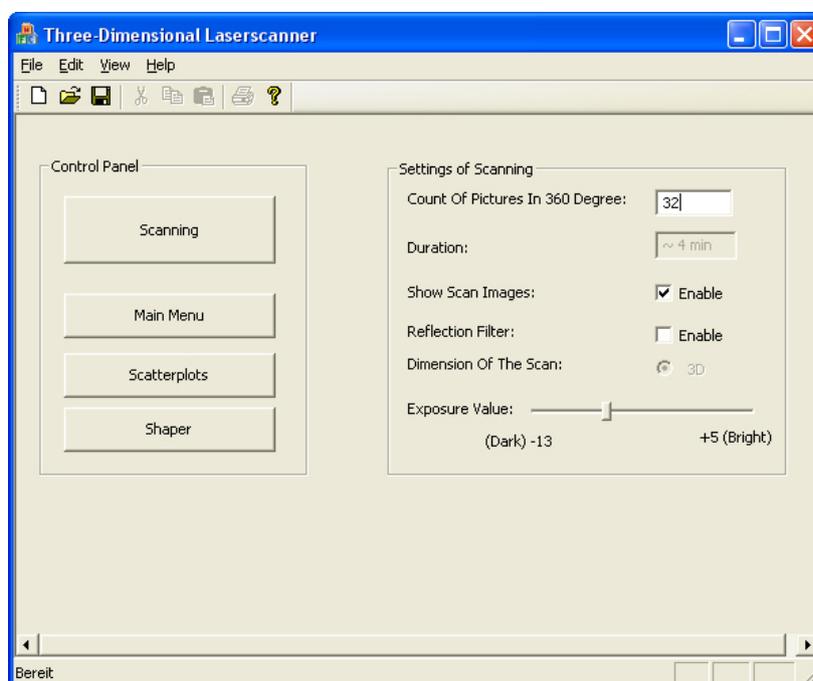


Abbildung 6.6.: Allgemeine Einstellungen zur Objektvermessung.

⁴⁹Homepage des Herstellers: Maplesoft (2009)

⁵⁰Diese Modellfunktion hat sich im Rückblick auf die Genauigkeit der Transformation durchgesetzt.

⁵¹Beschrieben im Kapitel 3.1 auf der Seite 9.

Im Anschluss der Vermessung erscheint ein Popup, der die tatsächliche Vermessungsdauer und die Anzahl der erfassten Objektpunkte wiedergibt.

Die Datenmenge, die erfasst wurde, muss nachfolgend formatiert werden. Dies ist notwendig, damit die Datenmenge zur Weiterverwendung in integrierten- und externen Bildverarbeitungsprogrammen möglich ist. Dazu wird das Fenster (Abbildung 6.7) zur Optimierung aufgerufen. Ebenfalls wurde die Möglichkeit, die Datenmenge auf *mm*-Schritte zu simplifizieren, implementiert.

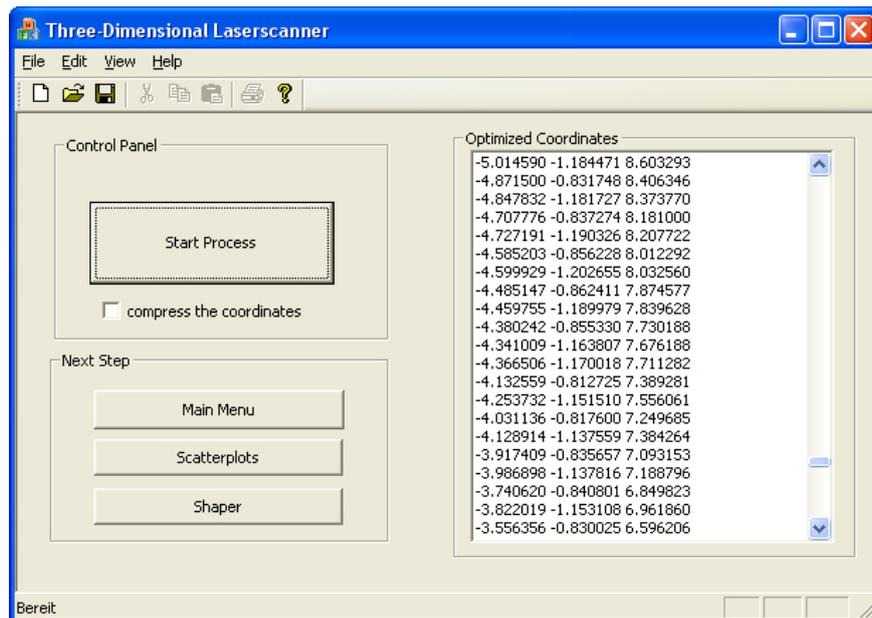
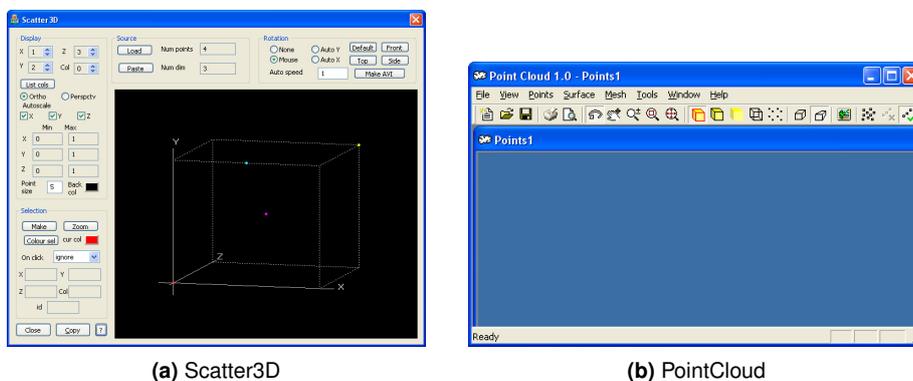


Abbildung 6.7.: Die Formatierung der Datenmenge muss nach der Objektvermessung für interne- und externe Bildverarbeitungsprogramme angepasst werden.

Stufe 3: Darstellung

Zwei integrierte Programme namens „Scatter3D“ und „PointCloud“ lassen sich innerhalb des Programmes aufrufen. Scatter3D wird über den Button „Scatterplot“ gestartet und stellt veranschaulichte Punktmengen dar. PointCloud wird über den Button „Shaper“ ausgeführt und ermöglicht die Darstellung, Bearbeitung und Modellierung von Punktmengen.



(a) Scatter3D

(b) PointCloud

Abbildung 6.8.: Integrierte Programme zur Darstellung und Bearbeitung von Punktmengen.

7. Auswertung

Das siebte Kapitel beschreibt in drei Unterkapiteln die Leistung der Objektvermessung bezüglich der Präzision, Geschwindigkeit, Struktur- und Materialeinfluss und stellt erfolgreiche Scanergebnisse im letzten Unterkapitel vor.

Inhalt

7.1. Präzision	41
7.2. Geschwindigkeit	43
7.3. Struktur- und Materialeinfluss	44
7.4. Messergebnisse	44
7.4.1. Problematisches Messobjekt	45
7.4.2. Komplexe Form	45
7.4.3. Geometrische Formen	46
7.4.4. Weitere Messresultate	48

7.1. Präzision

Die zufällige Abweichung von Werten $x_i \in \Delta x$ um einen Mittelwert \bar{x}_{arith} , wird durch die Präzision beschrieben. Angegeben wird sie als „Standartabweichung σ “:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_{arith})^2}{n - 1}} \quad \begin{array}{ll} x_i & = \text{Messwert} \\ \bar{x}_{arith} & = \text{Arithmetischer Mittelwert} \\ n & = \text{Anzahl Messwerte} \end{array} \quad (7.1)$$

In SCHUHFUSS⁵² wurde versucht die Präzision der Objektvermessung zu ermitteln. Dabei wurde ein Messobjekt per Hand- und mit dem Laserscanner vermessen, um nachfolgend die resultierenden Ergebnisse zu vergleichen. In wesentlicher Abhängigkeit zur Kalibrierung wurde eine Messpräzision von circa einem zwanzigstel Millimeter festgestellt.

Zur Überprüfung der Messpräzision im Bezug auf einen vollständig zu vermessenden Gegenstand, wurde in dieser Arbeit eine Schachtel vermessen.

Um die Präzision des Laserscanners zu ermitteln, wurde dieser Gegenstand jeweils unter denselben Umständen mehrfach vermessen. Die somit ermittelten Resultate spiegeln die Wiederholpräzision wieder. Die Nachfolgende Abbildung 7.1 und Tabelle 7.1 stellen Kennzahlen der Wiederholpräzision im Bezug der y-Richtung in einem festgelegtem Bereich Δx dar.

⁵²Schuhfuss (2007)

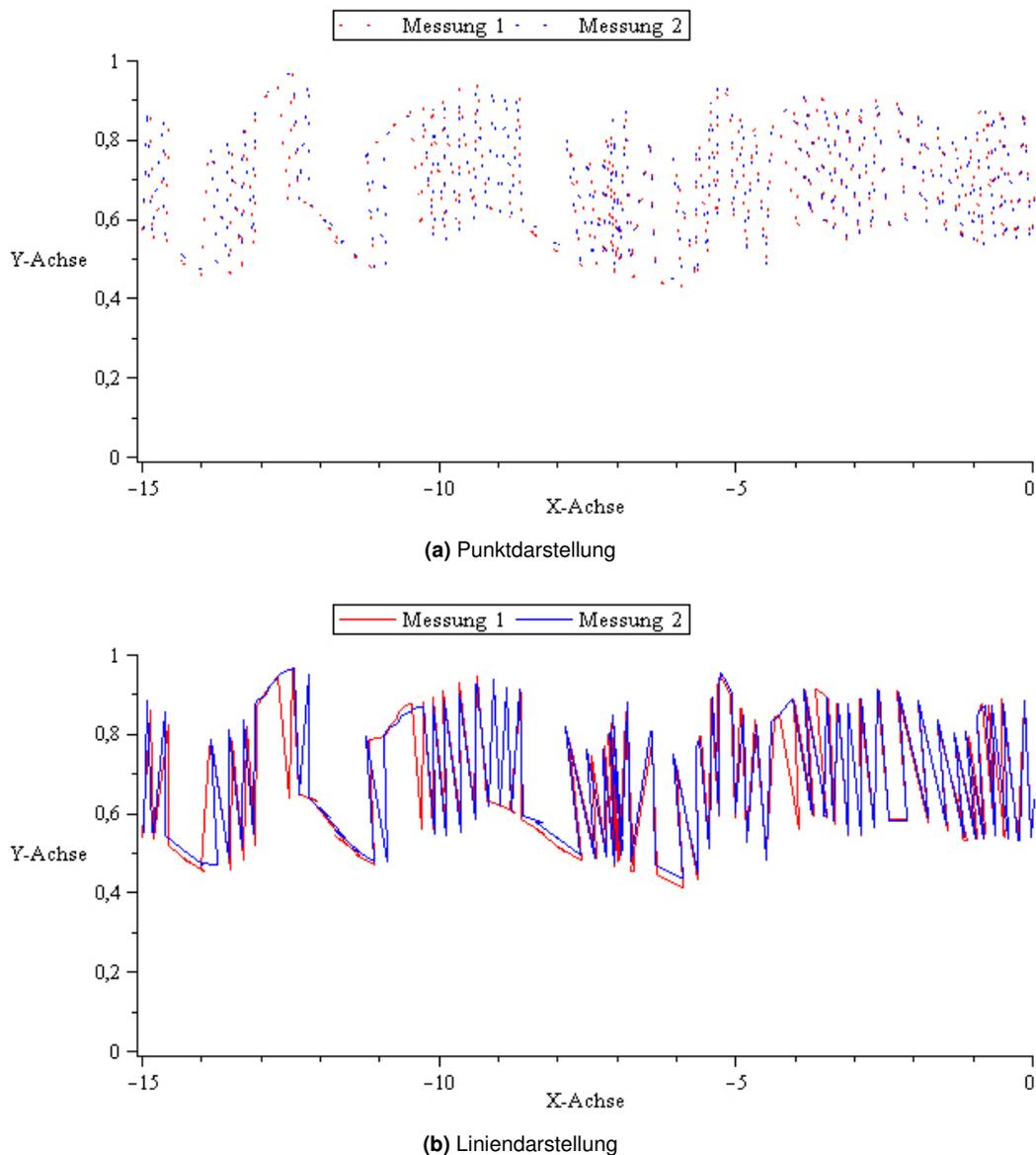


Abbildung 7.1.: Vergleich zweier Messungen desselben Objektes.

Zwei Vermessungen vom gleichen Messobjekt wurden nacheinander unter denselben Umständen durchgeführt. Die beiden Grafiken zeigen die Messwerte in unterschiedlichen Darstellungsweisen in einem Bereich $[-15, 0]$ und damit einen Ausschnitt der Punktmenge die bei der Vermessung erfasst wurde. Es ist gut zu erkennen, dass die zweite- der ersten Messung näherungsweise entspricht. Dies lässt auf eine hohe Wiederholpräzision schließen. Alle Angaben sind in *mm* dargestellt.

Messung	Aufnahmewinkel θ	Bereich Δx	Anzahl Punkte n	y_{min}	y_{max}	\bar{y}_{arith}	σ_y
1	90°	[-20,20]	347	0,132	1,054	0,663	0,213
1	180°	[-15,10]	226	0,123	0,971	0,618	0,207
1	270°	[-20,20]	354	0,248	0,987	0,663	0,187
1	360°	[-15,10]	196	0,062	0,927	0,599	0,207
2	90°	[-20,20]	350	0,132	1,071	0,670	0,215
2	180°	[-15,10]	218	0,123	0,971	0,631	0,211
2	270°	[-20,20]	353	0,248	0,987	0,675	0,186
2	360°	[-15,10]	197	0,062	0,930	0,600	0,206

Tabelle 7.1.: Kennzahlen der Wiederholpräzision.

Δx ist der analysierte Bereich in dem sich die Punkte befinden. y_{min} und y_{max} kennzeichnen den jeweils minimalen und maximalen y -Wert. \bar{y}_{arith} und σ_y stellen den arithmetischen Mittelwert und die Standardabweichung dar. Alle Maßeinheiten, ausgenommen der Messungsnummer, dem Aufnahmewinkel und der Anzahl erfasster Punkte sind in *mm* angegeben.

Das Resultat dieser Kennzahlen stimmt im Wesentlichen mit der ermittelten Messpräzision von SCHUHFUSS überein. Die Wiederholpräzision beträgt damit circa einen zwanzigstel Millimeter.

7.2. Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit ist ein weiteres wichtiges Kriterium für die praktische Anwendbarkeit. Im Laufe der Entwicklung des Laserscanners wurde ein besonders großes Augenmerk auf die Vermessungsdauer gelegt. Die Dauer einer Vermessung hängt von vielen Faktoren ab:

- Zum einen dauert der Kalibrierungsvorgang in etwa zwei Minuten. Er wird nur einmalig, wenn die Kamera oder der Laser neu ausgerichtet wurde, ausgeführt. Größere Zeitschwankungen treten im Kalibrierungsvorgang nicht auf.
- Zum anderen sind Vermessungsphasen vorhanden, in denen Bilder (Lichtsnitte) vom Objekt aufgenommen, die Akquisition der Laserlinie- und die Rekonstruktion der 3D-Koordinaten, durchzuführen sind. Diese Phasen weisen eine hohe Zeitintensität auf.

Um die Geschwindigkeit zu verbessern wurde der näherungsweise bestimmte Multiplikationsfaktor F , der die benötigte Vermessungsdauer eines Bildes repräsentiert, stark gesenkt. Die nachfolgend dargestellte Tabelle 7.2 zeigt den Entwicklungsverlauf des Multiplikationsfaktors F . Alle dargestellten Werte sind Durchschnittswerte, die aus mehreren Scanvorgängen, mit unterschiedlichen Messobjekten ermittelt wurden.

Entwicklungsphase	Multiplikationsfaktor F	Vermessungsdauer	Erfasste Oberflächenpunkte	Optimierung
1	>0,50			
2	0,50	50 <i>min</i>	20.000	Codeoptimierung
3	0,45	45 <i>min</i>	60.000	Vom Ursprung aufgespannte ROI.
4	0,27	27 <i>min</i>	140.000	Komplette Raum-Abdunkelung mittels Verkleidung.
5	0,22	22 <i>min</i>	145.000	Diverse Optimierungen
6	0,10	10 <i>min</i>	145.000	Verbesserte ROI (Region of Interest)

Tabelle 7.2.: Entwicklungsphasen des Multiplikationsfaktors F. Wertangaben sind in Abhängigkeit zu 100 Bildern in 360° angegeben.

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Geschwindigkeit im Laufe der Entwicklung um mehr als das Fünffache verbessert hat. Die Formel 7.2 beschreibt die ungefähr benötigte Zeit für eine komplette Objektvermessung.

$$\text{Vermessungsdauer} = (\text{Kalibrierungsdauer}) + \text{„Anzahl Bilder in 360°“} * \text{„Multiplikationsfaktor F“} \quad (7.2)$$

7.3. Struktur- und Materialeinfluss

Beeinflussbare Faktoren eines zu vermessenden Objektes sind vor der Vermessung besonders zu beachten.

Das Material der Oberfläche sollte die Laserlinie so aufnehmen, dass eine saubere und deutliche Laserlinie auf der Oberflächenstruktur des Objektes abgebildet wird. Matte Oberflächen und Material wie Holz, Ton oder Lehm sind dafür besonders gut geeignet. Glas, beispielsweise im Fenster oder Spiegel, ist dagegen mit keinem erfolgreichen Ergebnis zu erfassen.

Ebenfalls können durch eventuell vorhandene Vertiefungen, Nischen oder Einschnitte in der Oberflächenstruktur Vermessungslücken entstehen. Stofftiere sind von der Materialbeschaffenheit oft sehr plüschig und weisen eine haarige Oberflächenstruktur auf. Das kann zu vielen Lücken im Messresultat führen.

7.4. Messergebnisse

In diesem Unterkapitel werden erfolgreiche Messergebnisse und durch Probleme in der Struktur- und Materialbeschaffenheit entstandene erfolglose Vermessungen, vorgestellt. Alle Angaben bezüglich der Punktmengen sind gerundet angegeben.

7.4.1. Problematisches Messobjekt

Ein zu vermessendes Objekt, welches erhebliche Probleme in der Struktur- und Materialbeschaffenheit aufweist, ist der in Abbildung 7.2 dargestellte Stoffteddy. Die Grafiken verdeutlichen die Schwierigkeit der Erfassung einer haarigen Oberflächenstruktur. Viele große Lücken sind dadurch im Messresultat entstanden. In Nachbearbeitungsphasen konnten diese trotz 400.000 erfasster Oberflächenpunkte, nicht originalgetreu geschlossen werden.

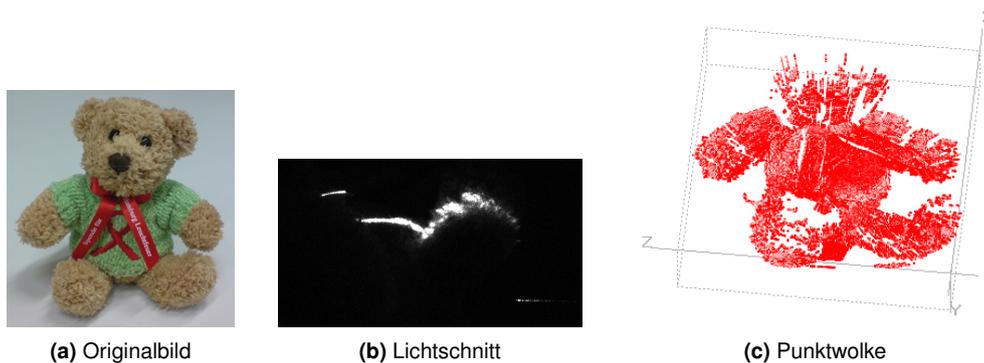


Abbildung 7.2.: Stoffteddy mit einer erheblichen Anzahl von Lücken im Messresultat.

7.4.2. Komplexe Form

Als ein sehr komplexes Messobjekt wurde ein Spielzeugauto vermessen. Das Ergebnis brachte jedoch aufgrund der guten Oberflächenbeschaffenheit, ein sehr detailgetreues Messresultat mit sich. In Abbildung 7.4 sind die Ergebnisse von drei Objektvermessungen in Form von Punktwolken zu betrachten. Ausgehend davon wurden diese drei Punktwolken in einem Registrierungsprozess vereinigt. Das modellierte Endresultat zeigt die Abbildung 7.5.

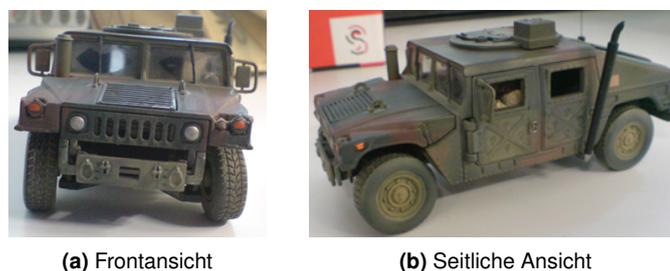


Abbildung 7.3.: Originalbilder eines Spielzeugautos.

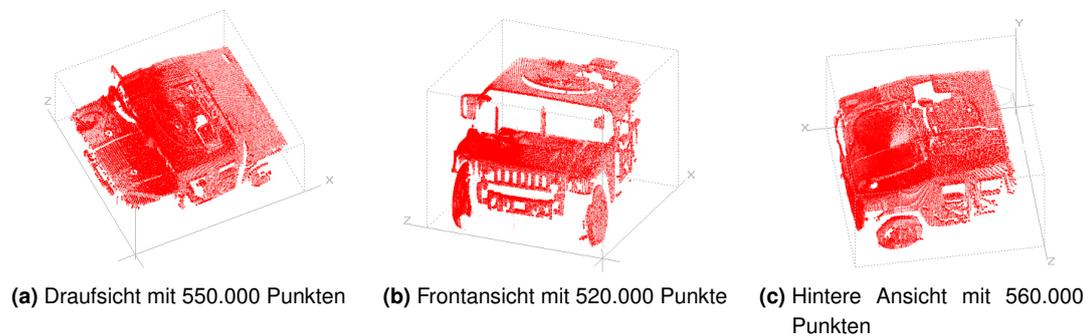
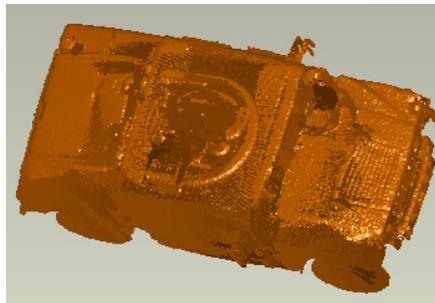


Abbildung 7.4.: Punktwolken des Spielzeugautos.

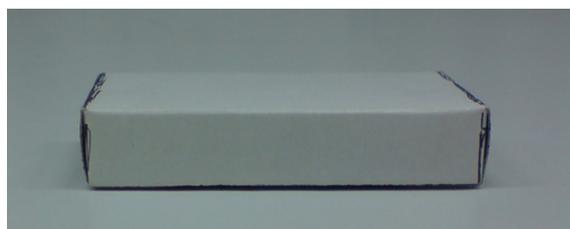


(a) Ergebnis von drei registrierten Flächenmodellen

Abbildung 7.5.: Modellerte Darstellung des Spielzeugautos mit insgesamt 1.600.000 Punkten.

7.4.3. Geometrische Formen

Geometrische Modelle lassen sich durch ihre geometrischen Eigenschaften sehr gut vermessen und modellieren. Ausgehend von Messergebnissen in Form von Punktwolken veranschaulichen die nachfolgenden Bilder die vollständige Rekonstruktion übergehend vom Polygon- zum endgültigen modellierten Modell. Ein Puzzle aus Holz und eine Schachtel aus Papier wurden dafür rekonstruiert.



(a) Papierschachtel



(b) Holzpuzzle

Abbildung 7.6.: Originalbilder der zu vermessenden Objekte.

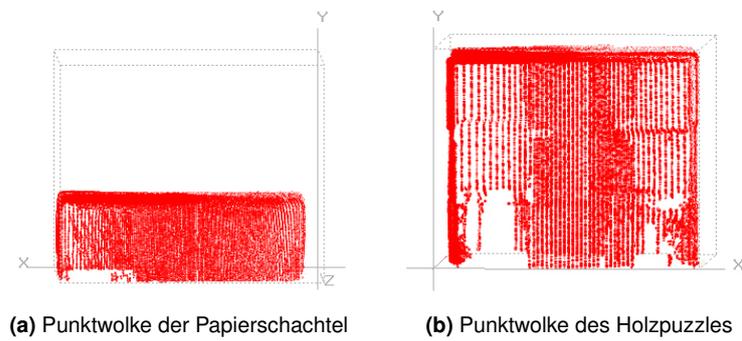


Abbildung 7.7.: Resultate zweier Objektvermessungen.

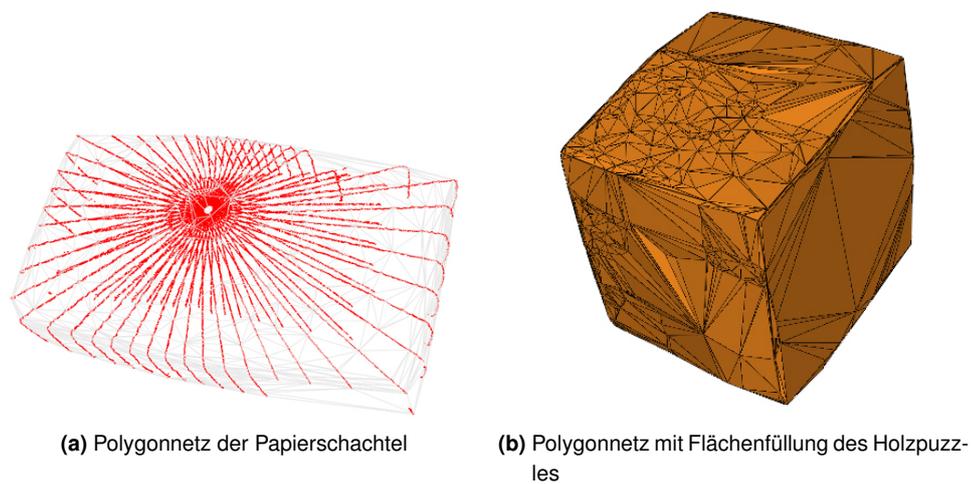


Abbildung 7.8.: Vernetzungsergebnisse der Punktmengen.

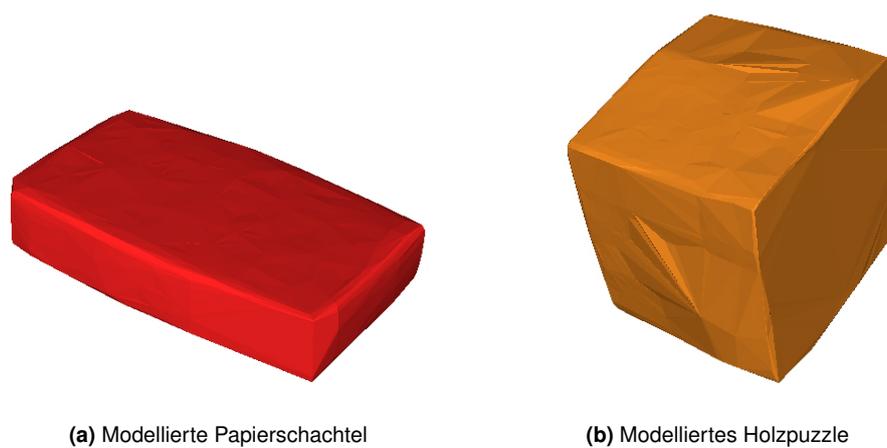


Abbildung 7.9.: Flächenbasierte Darstellung der Messobjekte.

7.4.4. Weitere Messresultate

Eine aus Plastik produzierte Dekobirne wurde in einem Scanvorgang vermessen. Insgesamt erfasste der Laserscanner 470.000 Punkte. Nachbearbeitungsphasen, wie das Korrigieren von Messfehlern und das Füllen von Löchern erbrachten eine korrigierte Punktmenge mit 500.000 Punkten. Ausgehend von einer optimierten Punktmenge, wurde so ein detailgetreues flächenbasiertes Modell aus 1.000.000 Punkten rekonstruiert.

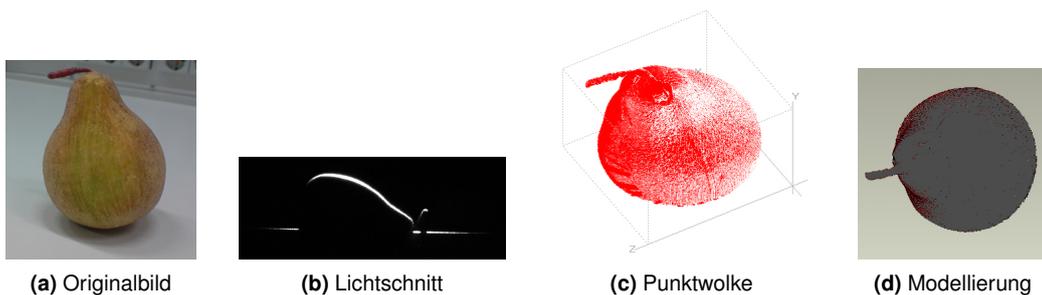


Abbildung 7.10.: Dekobirne aus Plastik.

Weitere ausgewählte Ergebnisse von Scanvorgängen sind den nachfolgenden Abbildungen 7.11 bis 7.16 zu entnehmen.

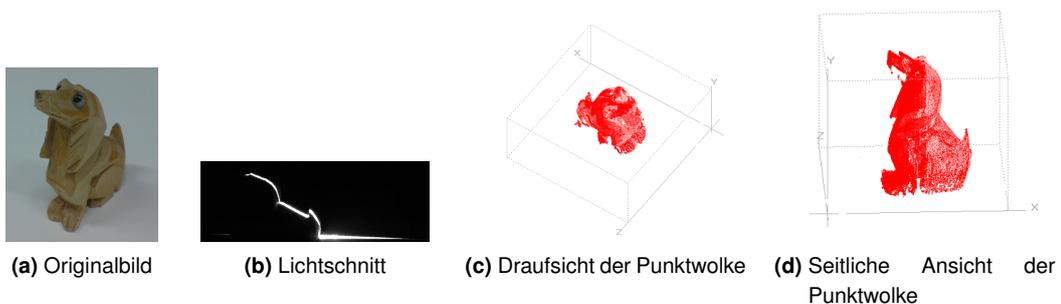


Abbildung 7.11.: Messergebnis mit rund 360.000 erfassten Objektpunkten einer Hundefigur aus Holz.

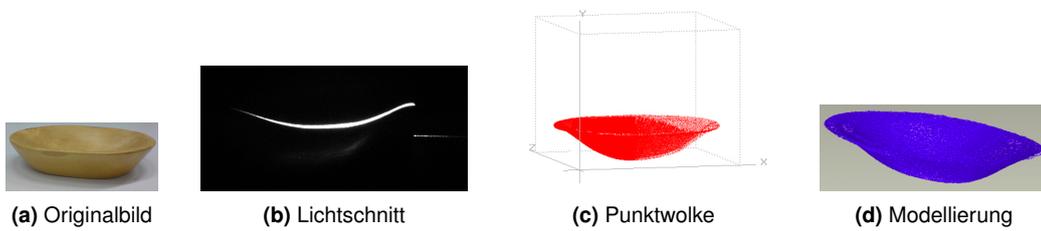


Abbildung 7.12.: Schale aus Holz.

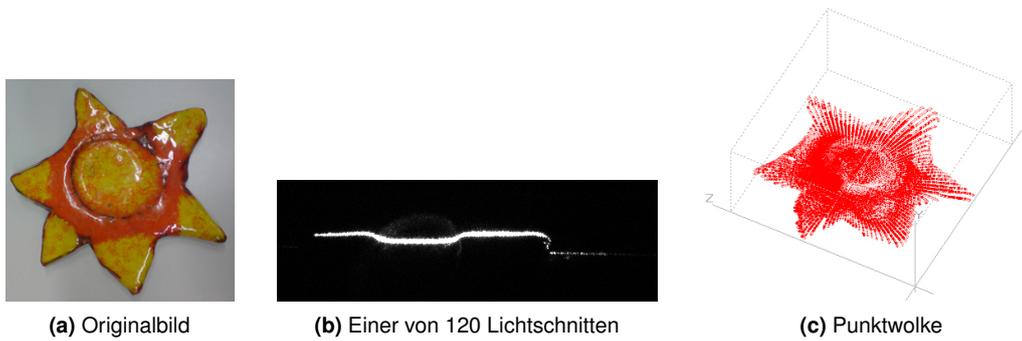


Abbildung 7.13.: Stern aus Ton.

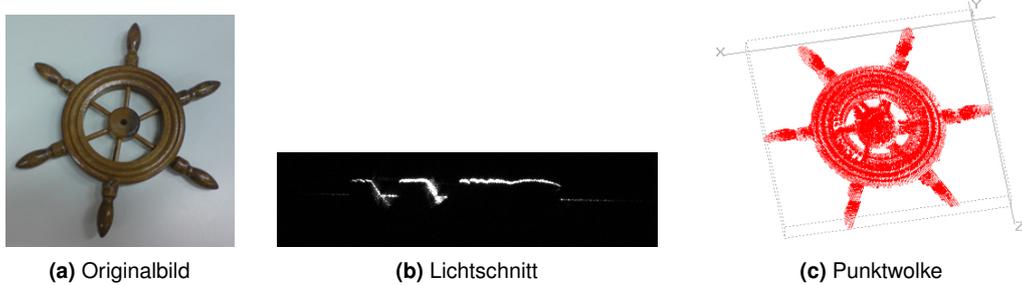
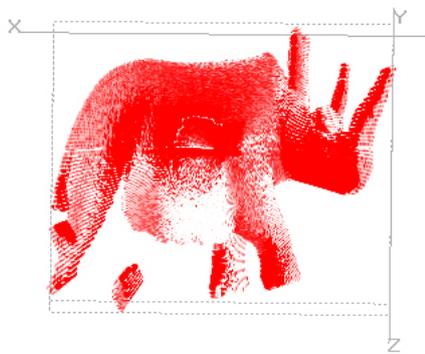


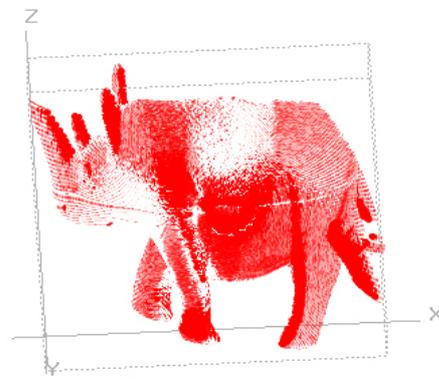
Abbildung 7.14.: Ruder aus Holz.



(a) Originalbild



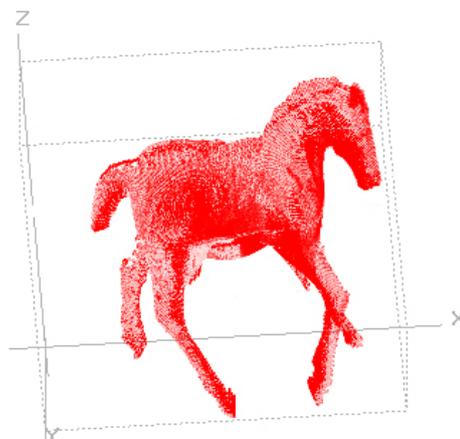
(b) Punktwolke - Scan 1



(c) Punktwolke - Scan 2

Abbildung 7.15.: Nashorn aus Holz.

(a) Originalbild



(b) Punktwolke

Abbildung 7.16.: Holzfigur eines Pferdes.



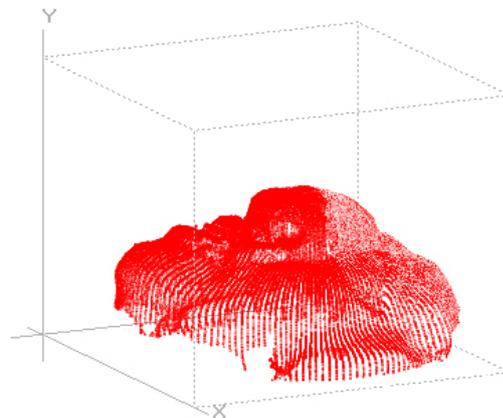
(a) Draufsicht des Originalbildes



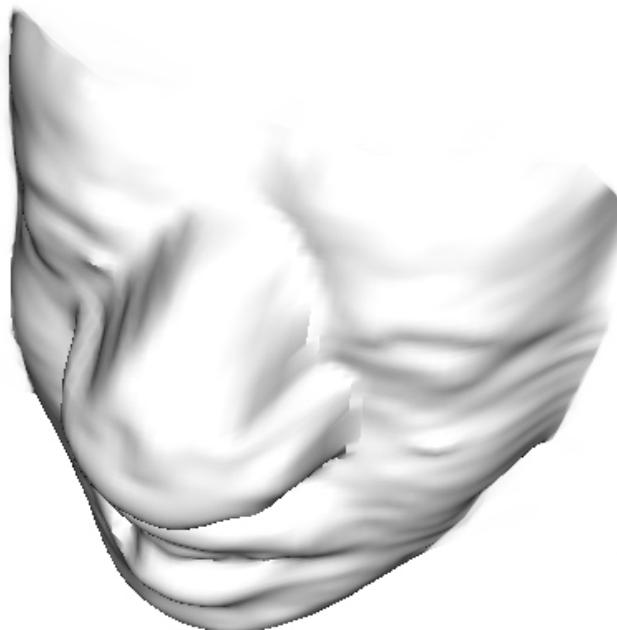
(b) Seitliche Ansicht des Originalbildes



(c) Lichtschnitt



(d) Punktwolke



(e) Modellierung

Abbildung 7.17.: Gesicht aus Ton.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Zunächst werden die wesentlichen Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst. In einem Ausblick folgen mögliche Weiterentwicklungsmöglichkeiten.

Inhalt

8.1. Stand der Arbeit	52
8.2. Weiterentwicklungen	53

8.1. Stand der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit bestand in der Realisierung eines 3D-Vermessungssystems auf Basis der Lichtschnitttechnik.

Aufbauend auf den Arbeiten von SCHUHFUSS⁵³ und REIMANN⁵⁴, wurde der Laserscanner konstruiert. Die Grundlage bestand aus der Kalibrierung der Systemkomponenten zueinander, die 2D-Objektvermessung und der Ansteuerung eines Drehtellers mit Hilfe einer Positionierungseinheit.

Der Laserscanner, der im Wesentlichen aus einer Kamera, einem Linienlaser, einem ansteuerbaren Drehteller, einer Positionierungseinheit und einem verkleideten Gerüst besteht, erzielt dank seiner zwanzigstel Millimeter Präzision sehr gute Messergebnisse. Aufgrund der verbesserten Messgeschwindigkeit, dem reduzierten Licht- und Materialeinfluss, können detailgetreue Rekonstruktionen von Gegenständen, schnell und ohne Störungen, erfasst werden.

Eine grafische Oberfläche, die zur Steuerung des Laserscanners und zur Nachbearbeitung von Punktmengen entwickelt wurde, bietet eine übersichtliche und einfache Handhabung über die Vermessung von Gegenständen und die anschließenden Weiterverarbeitungsmöglichkeiten.

Zusammengefasst wurde ein Laserscanner entwickelt, mit dem sich Gegenstände detailgetreu dreidimensional rekonstruieren lassen.

⁵³Schuhfuss (2007)

⁵⁴Reimann (2008)

8.2. Weiterentwicklungen

Basierend auf den in dieser Arbeit gewonnen Erkenntnissen, können weitere Projekte entstehen.

Am Anfang dieser Arbeit wurden im Kapitel 2.2.2 die drei typischen Triangulationsverfahren, die Punktriangulation, die Lichtschnitttechnik und der codierte Lichtansatz beschrieben. Eine Erweiterung des Lichtschnittverfahrens, sodass mehrere Lichtstreifen gleichzeitig auf das zu vermessende Objekt projiziert werden, ermöglicht die Erfassung des gesamten Objektes bzw. der maximal möglichen Größe des Messbereiches. Dies führt zu einer Reduzierung der aufzunehmenden Bilder.

Für den Vergleich der Triangulationsverfahren bezüglich der Geschwindigkeit und Genauigkeit, würde eine Untersuchung des codierten Lichtansatzes Aufschluss geben. Beim codierten Lichtansatz wird ein binär-, farbcodiertes oder Moiré-Muster mit einem Lichtmusterprojektor flächenhaft auf das Objekt projiziert.

Des Weiteren würde ein besseres Kalibrierungsverfahren zu einer deutlichen Verbesserung der Genauigkeit führen.

Weitestgehend finden Schwarz/Weiß-Kameras in Laserscannern ihre Verwendung. Eine mögliche Untersuchung würde herausfinden, ob mit geringem Geschwindigkeitsverlust Farbinformationen bezüglich des zu vermessenden Objektes gewonnen werden können. Eine Farbkamera könnte in Kombination mit einer Belichtungseinheit agieren, um Farbwerte der Objektoberfläche zu erhalten. Diese Farbinformationen würden eine noch detailgetreuere Darstellung von Punktmengen und Flächenmodellen realisieren.

A. Verwendete Hilfsmittel

Mit Hilfe von Bibliotheken, Softwareprodukten und weiteren weitestgehend öffentlich freien Hilfsmitteln, konnte die in dieser Arbeit beschriebene Laserscannersoftware entwickelt werden. Im folgendem wird auf die verwendeten Hilfsmittel eingegangen.

A.1. Bibliotheken

Die in der Bildverarbeitung verbreitete objektorientierte „LTI-Lib“⁵⁵ hat in dieser Arbeit häufig Verwendung gefunden. Für mathematische Algorithmen oder Bildverarbeitungsverfahren kam die umfangreiche LTI-Bibliothek, in der neuesten Version 1.9 zum Einsatz.

„Boost“⁵⁶ ist eine C++-Bibliothek welche viele Hilfsfunktionen zur Programmiererleichterung zur Verfügung stellt. Die Version 1.3 fand zur Textformatierung Gebrauch.

A.2. Bild- und Grafikprogramme

Der im Kapitel 4 grafisch dargestellte Bauplan des Laserscannergerüsts wurde mit „CADEMIA 1.4“⁵⁷ entworfen. CADEMIA ist ein Softwaresystem zur Lösung von Aufgaben im Bauingenieurwesen.

„Adobe Photoshop CS3“⁵⁸ wurde für die Bildverarbeitung eingesetzt.

Das „Microsoft Office Visio 2007“⁵⁹ -Produkt ist eine weit verbreitete Visualisierungs-Software und fand für Ablaufpläne Verwendung.

⁵⁵Zu finden unter: Alvarado u. a. (2005)

⁵⁶Homepage des Herstellers: Boost (2009)

⁵⁷Als öffentlich freie Software zu finden unter: Beucke u. a. (2009)

⁵⁸Kommerziell erwerbbar auf: Adobe-Systems (2009)

⁵⁹Kommerziell erhältlich unter: Microsoft-Corporation (2008)

A.3. Softwaresysteme zur Darstellung und Weiterverarbeitung von Punktmengen

„Geomagic Studio 9“⁶⁰ kam weitestgehend für die Lochbeseitigung, Registrierung und Modellierung von Punktwolken zum Einsatz.

Mit „Scatter3D“⁶¹ konnten zahlreiche Punktwolken dargestellt werden.

„PointCloud“⁶² diente größtenteils als zweites Modellierungswerkzeug. Ausgehend von geladenen Punktmengen wurden mit diesem Programm, Polygonnetze und Flächenmodelle erstellt.

Des Weiteren wurde „AutoCAD 2008“⁶³ zur Punktmengenverarbeitung genutzt.

A.4. Weitere Hilfsmittel

„Microsoft Visual Studio 2008“⁶⁴ ist ein Entwicklungswerkzeug, mit dem entwickelt und verifiziert wurde.

Die Bildverarbeitungssoftware „IC Imaging Control 3“⁶⁵ kam zur Belichtungseinstellung und als Grundlage zur Darstellung von Livescreens zum Einsatz.

Des Weiteren fand die zur universellen Positioniersteuerung „PS90“⁶⁶, „Maple 12“⁶⁷ zur nicht-linearen Ausgleichsrechnung und „LaTeX“ mit der TeX-Distribution „MiKTeX 2.7“⁶⁸ Verwendung.

⁶⁰Geomagic Studio 9: Geomagic (2009)

⁶¹Scatter3D: Heitler (2007)

⁶²PointCloud: Sycode (2009)

⁶³AutoCAD 2008: Autodesk (2009)

⁶⁴Microsoft Visual Studio 2008: Microsoft-Corporation (2007)

⁶⁵IC Imaging Control 3: The-Imaging-Source (2008a)

⁶⁶Positionierungssteuerung PS90: OWIS (2009)

⁶⁷Maple 12: Maplesoft (2009)

⁶⁸TeX-Distribution MiKTeX 2.7: Schenk (2008)

B. Inhalt der beiliegenden DVD

Dieser Arbeit liegt eine DVD mit folgendem Inhalt bei:

\PDF

Bachelorarbeit mit den dazugehörigen Präsentationsfolien des Kolloquiums im PDF-Format.

\Ergebnisse

Sammlung von zahlreichen Messresultaten in Form von Bildern, Screenshots und Videos.

\Laserscanner-Software

Vollständige lauffähige Laserscannersoftware mit den zur Weiterentwicklung benötigten Sourcedateien.

Nachfolgend ist die Verzeichnisstruktur der Laserscannersoftware beschrieben.⁶⁹

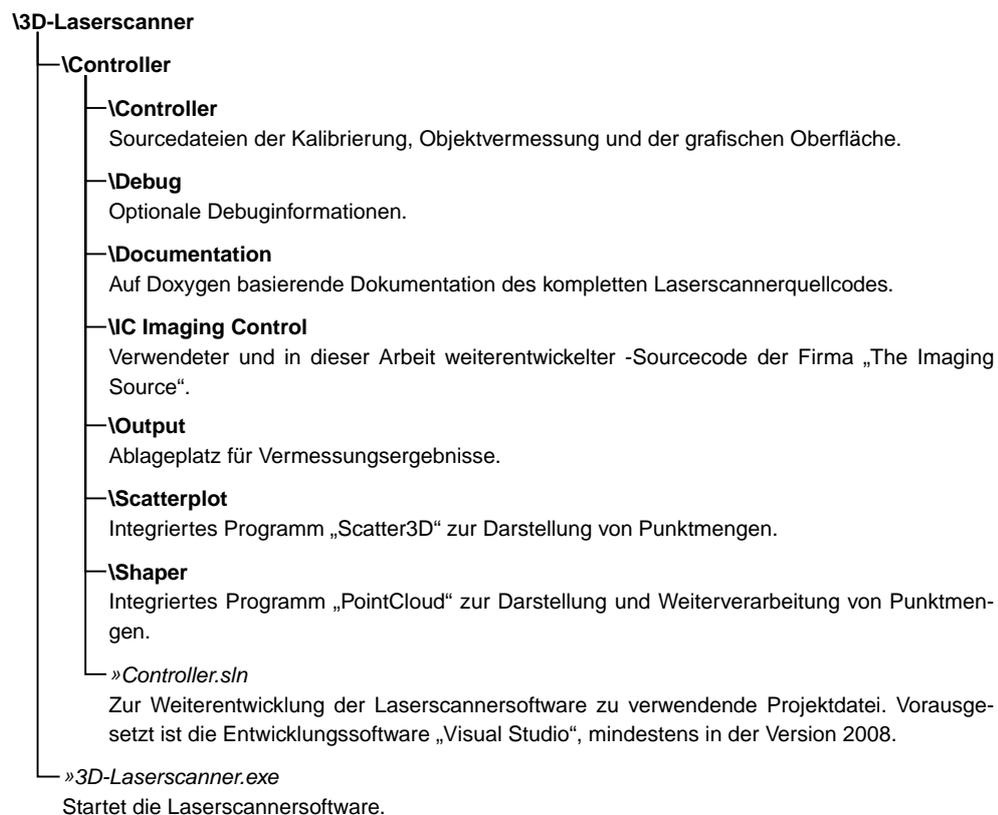


Abbildung B.1.: Verzeichnisstruktur der Laserscannersoftware.

⁶⁹Versteckte Dateien wie Runtime-Librarys, DLL-Dateien o.ä. sind nicht aufgelistet.

Abbildungsverzeichnis

2.1.	3D-Koordinatenmessmaschine	5
2.2.	Triangulation mit einem Lichtpunktprojektor	6
2.3.	Das Prinzip der Lichtschnitttechnik	7
2.4.	Darstellung des binärcodierten Lichtschnittverfahrens	8
2.5.	Angewandte farbcodierte Lichtschnitttechnik	8
3.1.	Der trigonometrische Zusammenhang einer Rotation	11
3.2.	Veranschaulichung der Eigenschaften einer perspektivischen Transformation $\mathbb{P}^2 \mapsto \mathbb{P}^2$	13
3.3.	Perspektivische Ebene-zu-Ebene-Transformation	13
4.1.	Grundgerüst des Laserscanners	15
4.2.	Draufsicht des Grundgerüsts	15
4.3.	Verkleidung des Laserscanners	17
4.4.	Kamera	18
4.5.	Laser	18
4.6.	Drehmesstisch und Positionierungssteuerung	19
4.7.	Kalibrierungsvorrichtung mit eingelegtem Kalibrierungsmuster	20
4.8.	Kalibrierungsmuster	20
5.1.	Schematische Darstellung der Oberflächenrekonstruktion	22
5.2.	Darstellung der Bildakquisition eines Lichtschnittes	23
5.3.	Analyse eines Lichtschnittes	24
5.4.	Rekonstruktion der 3D-Koordinaten	25
5.5.	Formatierung der 3D-Datenmenge	26
5.6.	Korrespondierende Passpunkte einer Registrierung	27
5.7.	Ergebnis einer manuellen Registrierung	28
5.8.	Veranschaulichte Umkreisbedingung	29
5.9.	Resultat einer Dreiecksvermaschung	29
5.10.	Einwirkung eines Median-Filters	31
5.11.	Ergebnis eines erfolgreich angewandten Glättungsverfahrens	32
5.12.	Simplifizierung einer Punktmenge	33
5.13.	Formatierung der 3D-Datenmenge zur Weiterverwendung	33
6.1.	Splash Screen der Laserscannersoftware	35
6.2.	Hauptmenü	36
6.3.	Setupmenü	36
6.4.	Aufgaben der Kalibrierungsvorbereitung	37
6.5.	Das Ergebnis einer Kalibrierung	38
6.6.	Allgemeine Einstellungen zur Objektvermessung	39
6.7.	Formatierungsanpassung der Datenmenge	40

6.8. Integrierte Programme zur Darstellung und Bearbeitung von Punktmengen . . .	40
7.1. Vergleich zweier Messungen desselben Objektes	42
7.2. Stoffteddy mit erheblichen Lücken im Messresultat	45
7.3. Originalbilder eines Spielzeugautos	45
7.4. Punktwolken des Spielzeugautos	46
7.5. Modellierte Darstellung eines Spielzeugautos	46
7.6. Originalbilder von zu vermessenden Objekten	46
7.7. Resultate zweier Objektvermessungen	47
7.8. Vernetzungsergebnisse von Punktmengen	47
7.9. Flächenbasierte Darstellung von Messobjekten	47
7.10. Dekobirne aus Plastik	48
7.11. Messergebnis einer Hundefigur	48
7.12. Schale aus Holz	49
7.13. Stern aus Ton	49
7.14. Ruder aus Holz	49
7.15. Nashorn aus Holz	50
7.16. Holzfigur eines Pferdes	50
7.17. Gesicht aus Ton	51
B.1. Verzeichnisstruktur der Laserscannersoftware	56

Tabellenverzeichnis

4.1. Beschreibung der Gerüstmasse	16
4.2. Auflistung der Verkleidungsmasse	16
6.1. Auflistung der getesteten Betriebssysteme	34
7.1. Kennzahlen der Wiederholpräzision	43
7.2. Entwicklungsphasen des Multiplikationsfaktors F	44

Quellenverzeichnis

Literaturquellen

- [Alexa u. a. 2003] ALEXA, Marc ; BEHR, Johannes ; COHEN-OR, Daniel ; FLEISHMAN, Shachar ; LEVIN, David ; SILVA, Claudio T.: *Computing and Rendering Point Set Surfaces*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2003
- [Benker 2003] BENKER, Hans: *Mathematische Optimierung mit Computeralgebrasystemen: Einführung für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Wirtschaftswissenschaftler unter Anwendung von Mathematica, Maple, Mathcad, Matlab und Excel*. Springer, 2003. – ISBN 3-540-44118-2
- [Überhuber 1995] ÜBERHUBER, Christopher W.: *Computer-Numerik 2*. Springer, 1995. – ISBN 3-540-59152-4
- [Bertagnolli 2004] BERTAGNOLLI, Frank: *Vollautomatische robotergestützte 3D-Oberflächenvermessung zur Qualitätssicherung von Werkstücken*. In: VDI/VDE Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.): *Sensoren und Messsysteme 2004*, VDI-Berichte 1829, 2004. – ISBN 3-18-091829-2
- [Besl und McKay 1992] BESL, Paul J. ; MCKAY, Neil D.: *A method for registration of 3-D shapes*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992
- [Brüderlin und Meier 2001] BRÜDERLIN, Beat ; MEIER, Andreas: *Computergrafik und geometrisches Modellieren*. Vieweg+Teubner, 2001. – ISBN 3-519-02948-0
- [Bunke und Jiang 1997] BUNKE, Horst ; JIANG, Xiaoyi: *Dreidimensionales Computersehen - Gewinnung und Analyse von Tiefenbildern*. Springer, 1997. – ISBN 3-540-60797-8
- [Cignonia u. a. 1998] CIGNONIA, Paolo ; MONTANIA, Claudio ; SCOPIGNO, Roberto: *DeWall - A fast divide and conquer Delaunay triangulation algorithm in E-d*. Elsevier Science Ltd., 1998
- [Fang und Piegl 1995] FANG, Tsung-Pao ; PIEGL, Les A.: *Delaunay triangulation in three dimensions*. IEEE Computer Graphics and Applications, 1995
- [Haase 2005] HAASE, Jens: *Glättung von Polygonnetzen in medizinischen Visualisierungen*. Diplomarbeit - Institut für Simulation und Graphik, 2005
- [Haberäcker 1989] HABERÄCKER, Peter: *Digitale Bildverarbeitung - Grundlagen und Anwendungen*. München/Wien : Hanser, 1989. – ISBN 3-446-15644-5
- [Hofer und Hutter 2009] HOFER, Simon ; HUTTER, Matthias: *Delaunay-Triangulation - Konstruktion und Anwendung*. Berner Fachhochschule - Technik und Informatik, 2009

- [Jähne u. a. 1995] JÄHNE, Bernd ; MASSEN, Robert ; NICKOLAY, Bertram ; SCHARFENBERG, Harald: *Technische Bildverarbeitung - Maschinelles Sehen*. Berlin/Heidelberg/New York : Springer, 1995. – ISBN 3-540-58641-5
- [Jones 2003] JONES, Thouis R.: *Feature Preserving Smoothing of 3D Surface Scans*. Master thesis - Massachusetts Institute of Technology, 2003
- [Kaiser und Kecher 2008] KAISER, Ulrich ; KECHER, Christoph: *C/C++*. Galileo Press, 2008. – ISBN 978-3-89842-839-2
- [Keßler 2008] KESSLER, Christoph: *Simplifizierung polygonaler Oberflächen*. Diplomarbeit - Fraunhofer Institut Techno- und Wirtschaftsmathematik, 2008
- [Klette u. a. 1996] KLETTE, Reinhard ; KOSCHAN, Andreas ; SCHLÜNS, Karsten: *Computer Vision - Räumliche Information aus digitalen Bildern*. Braunschweig/Wiesbaden : Vieweg, 1996. – ISBN 3-528-06625-3
- [Kraus 2000] KRAUS, Karl: *Photogrammetrie: Topographische Informationssysteme*. Walter de Gruyter, 2000. – ISBN 3-110-18164-9
- [Masuda und Yokoya 1994] MASUDA, Takeshi ; YOKOYA, Naokazu: *A robust method for registration and segmentation of multiple rangeimages*. Proceedings of the 1994 Second CAD-Based Vision Workshop, 1994. – ISBN 0-818-65310-8
- [Maurer u. a. 1996] MAURER, Calvin R. ; ABOUTANOS, Georges B. ; DAWANT, Benoit M. ; MACIUNAS, Robert J. ; FITZPATRICK, Michael: *Registration of 3-D images using weighted geometrical features*. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1996
- [Niedermaier 2006] NIEDERMAIER, Elke: *Latex: Das Praxisbuch*. Franzis, 2006. – ISBN 3-77236-930-8
- [Pagés u. a. 2003] PAGÉS, Jordi ; SALVI, Joaquim ; GARCIA, Rafael ; MATABOSCH, Carles: *Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003. – ISBN 0-7803-7736-2
- [Paulus und Hornegger 1995] PAULUS, Dietrich W. R. ; HORNEGGER, Joachim: *Pattern Recognition and Image Processing in C++*. Braunschweig/Wiesbaden : Vieweg, 1995. – ISBN 3-528-05491-3
- [Reimann 2008] REIMANN, Christian: *Entwicklung eines Steuerungsmoduls für einen 3D-Laserscanner*. Diplomarbeit. 2008
- [Schuhfuss 2007] SCHUHFUSS, Martin: *Realisierung eines Laser-Triangulationssensors zur 3D-Objektvermessung*. Bachelorarbeit. 2007
- [Tönnies 2005] TÖNNIES, Klaus D.: *Grundlagen der Bildverarbeitung*. München : Pearson Studium, 2005. – ISBN 3-8273-7155-4
- [Willms 2008] WILLMS, André: *Einstieg in Visual C++ 2008*. Galileo Press, 2008. – ISBN 978-3-8362-1193-2
- [Wolf 2006] WOLF, Jürgen: *C++ von A bis Z*. Galileo Press, 2006. – ISBN 3-89842-643-2
- [Zhang u. a. 2002] ZHANG, Li ; CURLESS, Brian ; SEITZ, Steven M.: *Rapid Shape Acquisition Using Color Structured Light and Multi-pass Dynamic Programming*. Department of Computer Science and Engineering, 2002

Internetquellen

- [Adobe-Systems 2009] ADOBE-SYSTEMS: *Adobe Photoshop*. Zugriffsdatum: 17.05.2009.
URL: <http://www.adobe.com/de/products/photoshop/>
- [Alvarado u. a. 2005] ALVARADO, Pablo ; DOERFLER, Peter ; CANZLER, Ulrich: *LTI-Lib*. Homepage des LTI-Lib-Projektes der RWTH Aachen, Stand: 24.11.2005.
URL: <http://ltilib.sourceforge.net>
- [Autodesk 2009] AUTODESK: *AutoCAD*. Zugriffsdatum: 17.05.2009.
URL: <http://www.autodesk.de>
- [Beucke u. a. 2009] BEUCKE, Karl ; BURGER, Christian ; FIRMENICH, Berthold ; NOCKEN, Peter M.: *CADEMIA*. Zugriffsdatum: 17.05.2009.
URL: <http://www.cademia.org>
- [Boost 2009] BOOST: *Boost C++ Libraries*. Stand: 02.05.2009.
URL: <http://www.boost.org>
- [Bosch 2009] BOSCH: *Bosch Rexroth*. Zugriffsdatum: 08.04.2009.
URL: <http://www.boschrexroth.com>
- [Geomagic 2009] GEOMAGIC: *Geomagic Studio*. Zugriffsdatum: 17.05.2009.
URL: <http://www.geomagic.com/de/products/studio/>
- [Gühring 2001] GÜHRING, Dipl.-Ing. J.: *3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stand: 21.11.2001.
URL: http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=980546680&dok_var=dl&dok_ext=pdf&filename=980546680.pdf
- [van Heesch 2009] HEESCH, Dimitri van: *Doxygen*. Zugriffsdatum: 30.04.2009.
URL: <http://www.doxygen.org>
- [Heitler 2007] HEITLER, Dr. W.: *Scatter3D*. Stand: 02.06.2007.
URL: <http://www.st-andrews.ac.uk/~wjh/scatter3d/>
- [Link und Sättele 2009] LINK, Matthias ; SÄTTELE, Manuel: *Digitale Archäologie*. Stand: 16.04.2009.
URL: <http://www.digitale-architektur.de>
- [Maplesoft 2009] MAPLESOFT: *Maple*. Zugriffsdatum: 17.05.2009.
URL: <http://www.maplesoft.com/products/maple/>
- [Meisel 2008a] MEISEL, Prof. Dr.-Ing. A.: *3D Bildverarbeitung*. Vortragsfolien zu Grundlagen der 3D-Bildverarbeitung, Stand: 03.03.2008.
URL: <http://www.informatik.haw-hamburg.de/1708.html>
- [Meisel 2008b] MEISEL, Prof. Dr.-Ing. A.: *Robot Vision*. Vorlesungsskript des Faches Robot Vision, Stand: 07.03.2008.
URL: http://www.informatik.haw-hamburg.de/wp_robot_vision.html

- [Microsoft-Corporation 2007] MICROSOFT-CORPORATION: *Microsoft Visual Studio*. Stand: 19.11.2007.
URL: <http://msdn.microsoft.com/de-de/vstudio/products/>
- [Microsoft-Corporation 2008] MICROSOFT-CORPORATION: *Microsoft Office Visio*. Zugriffsdatum: 02.12.2008.
URL: <http://office.microsoft.com/visio/>
- [OWIS 2009] OWIS: *OWIS Staufen*. Zugriffsdatum: 16.05.2009.
URL: <http://www.owis-staufen.de>
- [Rauth 2009] RAUTH, Hans-Helmut: *Wenzel GearTec*. Zugriffsdatum: 16.05.2009.
URL: <http://www.wenzel-geartec.de>
- [Schenk 2008] SCHENK, Christian: *MikTeX*. Stand: 08.02.2008.
URL: <http://www.miktex.org>
- [Sycode 2009] SYCODE: *Point Cloud*. Zugriffsdatum: 17.05.2009.
URL: http://www.sycode.com/products/point_cloud/
- [The-Imaging-Source 2008a] THE-IMAGING-SOURCE: *IC Imaging Control*. Zugriffsdatum: 21.09.2008.
URL: <http://www.imagingcontrol.com>
- [The-Imaging-Source 2008b] THE-IMAGING-SOURCE: *Overlay*. Zugriffsdatum: 21.09.2008.
URL: http://www.imagingcontrol.com/en_US/support/documentation/class/Overlay.htm
- [The-Imaging-Source 2009a] THE-IMAGING-SOURCE: *Cameras*. Stand: 16.05.2009.
URL: <http://www.theimagingsource.com/products/cameras/>
- [The-Imaging-Source 2009b] THE-IMAGING-SOURCE: *Lenses*. Stand: 16.05.2009.
URL: <http://www.theimagingsource.com/products/optics/lenses/>
- [Zimmermann und Lang 2004] ZIMMERMANN, Kurt M. ; LANG, Thomas: *Z-LASER*. Stand: 14.01.2004.
URL: <http://www.z-laser.com>

Versicherung über Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel

**"Realisierung eines dreidimensionalen Laserscanners auf
Basis der Lichtschnitttechnik"**

im Sinne der Prüfungsordnung nach §24(5) ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Hamburg, 26. Juni 2009

Ort, Datum

Unterschrift