

Konstruktion und Implementierung eines prototypischen 3D-Linien-Laserscanners

David Wichter

Master-Projektstudium

Betreuer: Professor Dr.-Ing. Jörg Lohscheller

Trier, Abgabedatum

Kurzfassung

Die vorliegende Ausarbeitung dokumentiert und erläutert die Umsetzung des Lichtschnittverfahrens zum Vermessen von dreidimensionalen Objekten. Dabei wird in der Einleitung zuerst auf die Motivation und Ziele des Projektes eingegangen. Anschließend werden die theoretischen und mathematischen Grundlagen für das Verfahren zusammengefasst. Es folgt die Beschreibung der konkreten Implementierung, in der sowohl die Konstruktion einer Scannervorrichtung als auch die in Software gegossene Vorgehensweise erläutert wird. Die Arbeit schließt mit einer Evaluierung der Ergebnisse, welche anhand praktischer Messungen dargelegt wird, und einem Fazit, in dem ein Ausblick für Verbesserung und Erweiterungen gegeben wird.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Das Verfahren in der Theorie	3
2.1 Das mathematische Modell einer Kamera.....	3
2.1.1 Die Kamerakalibrierung	5
2.2 Der Lichschnitt	9
3 Implementierung	11
3.1 Scanner Konstruktion	11
3.2 Der Scavorgang	14
3.2.1 Kalibrierung der internen Kameraparameter	14
3.2.2 Datenerhebung	15
3.2.3 Schwellwertbestimmung	16
3.2.4 Kalibrierung der externen Kameraparameter.....	19
3.2.5 Bestimmung der Laserlinie	19
3.2.6 Berechnung der Weltkoordinaten	21
4 Ergebnisse.....	23
4.1 Laserlinienbestimmung	23
4.2 Messgenauigkeit	24
5 Fazit	28
Literaturverzeichnis	29

1

Einleitung

In allen sich mit Phänomenen und Gegenständen der erfahrbaren Außenwelt beschäftigenden Bereichen von Wissenschaft und Industrie ist das Vermessen eben jener Gegenstände von höchstem Interesse. Die Messtechnik als Schnittstelle zwischen der empirischen und der mathematisch-quantifizierten Welt ermöglicht erst als solche das Aufstellen und Validieren von Modellen, welche erfahrene Realitäten abbilden sollen. Es überrascht also nicht, dass gerade im Zuge von technologischem Fortschritt auch immer neue Methoden und Möglichkeiten gesucht werden, Objekte von Interesse zu vermessen.

Eine dieser (realtiv) neuen Methoden besteht in dem Abtasten von Objekten mittels eines Lasers. Dieses Verfahren wurde zuerst in den 60er Jahren erfolgreich eingesetzt, auch wenn die ersten industriellen Anwendungen noch ca. 20 Jahre auf sich warten ließen (vgl. [Ebr11]). Dabei wird ein Laser auf ein zu vermessendes Objekt projiziert und mittels der räumlichen Informationen, die über den Laseremitter an sich, die Laserprojektion oder den Blickwinkel des Betrachters der Projektion bekannt sind, wird eine Distanzvermessung vorgenommen. Welche dieser Informationen wie verarbeitet wird, hängt von dem eingesetzten Verfahren ab. Bei den meisten Verfahren werden aus genügend gesammelten Distanzen dann 3D-Modelle des zu vermessenden Objektes angefertigt. Man spricht dann von einem 3D-Laserscanning.

Industrielle Laserscanner werden heutzutage in vielen Bereichen der Vermessungstechnik benutzt und sind von der Minenvermessung (vgl. [rie16]) bis zur Forensik (vgl. [Zol16]) in allen möglichen Anwendungsbereichen vertreten. Diese Scanner weisen eine hohe Genauigkeit auf, sind für Privatpersonen meistens jedoch zu teuer. Da jedoch auch die Funktionsweisen von professionellen Laserscannern fundamentalen Prinzipien folgen, sind die an sich eingesetzten Verfahren vergleichsweise leicht nachzuvollziehen. Daher wurde für die vorliegende Ausarbeitung der Versuch unternommen, einen „Do It Yourself“-Laserscanner zu bauen. Dieser soll das Lichtschnittverfahren als eine konkrete Art des Laserscannings erfolgreich mit Hilfe von Matlab als Entwicklungsumgebung umsetzen. In der Implementierung ist die Konstruktion einer Scan-Vorrichtung, die zugehörige Software und das Durchführen des Vermessungsverfahrens an sich enthalten. Es wurde vor allem auf die Einhaltung folgender Design-Prinzipien geachtet:

Simplizität

Der Scanner sollte einfach zu konstruieren und zu bedienen sein. Außerdem sollten sich sowohl die Berechnungen als auch die Software, in der besagte Berechnungen stattfinden, leicht nachvollziehen lassen. Dies macht den Umgang mit dem Scanner komfortabler und begünstigt Nachbauten.

Bezahlbarkeit

Der Scanner sollte preisgünstig konstruierbar sein und auch ohne High-End-Komponenten akzeptable Ergebnisse liefern.

Genauigkeit

Ohne genaue Ergebnisse ist das Unterfangen einer Vermessung unnütz. Daher muss der Laserscanner unter der Annahme einiger Randbedingung möglichst genaue und reproduzierbare Messergebnisse liefern, welche das gemessene Objekt gebührend präzise als 3D-Modell abbilden.

In den folgenden Kapiteln wird zuerst auf die mathematische Theorie des Lichtschnittverfahrens eingegangen. Es folgt die konkrete Implementierung und die Beschreibung, wie der Scanner konstruiert wurde und wie bei einem einzelnen Scavorgang die Vermessung und Datenverarbeitung durchgeführt wird. Anschließend werden die Ergebnisse begutachtet und es wird erläutert, wie erfolgreich die Hauptbearbeitungsschritte der Laserlinienerkennung und Koordinatenberechnung sind und warum. Geschlossen wird mit einem Fazit, welches alternative Techniken sowie mögliche weiterführende Schritte und Verbesserungen anführt.

2

Das Verfahren in der Theorie

In diesem Kapitel wird auf die theoretischen Grundlagen des Verfahrens eingegangen. Es handelt sich dabei um eine Zusammenfassung, welche die wichtigsten Konzepte für das weitere Verständnis aufbereiten soll und beschränkt sich daher auf das Wesentliche. Weiterführende Lektüre, welche für die folgenden Abschnitte auch als Quelle gedient hat, ist unter anderem zu finden bei [Sim], [Matb] oder [Rah].

2.1 Das mathematische Modell einer Kamera

Das Lichtschnittverfahren macht sich nicht nur den eingangs erwähnten Laser zu Nutze, sondern nutzt zusätzlich eine Kamera um die räumlichen Informationen des vermessenen Objektes zu rekonstruieren. Die Kamera dient dabei als Betrachter der projizierten Laserlinie. Mathematisch wird hier das Modell einer Lochkamera zugrunde gelegt. Bei diesem Modell wird angenommen, dass Lichtstrahlen, die von einem Objekt reflektiert werden, durch den Fokuspunkt der Kamera fallen, dort gebündelt werden, und anschließend auf der anderen Seite des Fokuspunktes auf eine gegenüberliegende Projektionsfläche geworfen werden. So entsteht auf der Projektionsfläche das invertierte Bild des Objektes. Abb. 2.1 verdeutlicht das Modell.

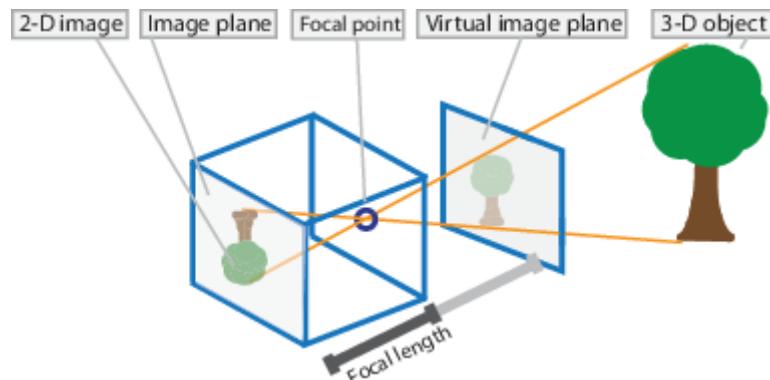


Abb. 2.1: Modell einer Lochkamera. Quelle: [Matb]

Es handelt sich also um eine Projektion vom dreidimensionalen Raum, dem Weltkoordinatensystem, auf eine zweidimensionale Fläche, im Folgenden als Bildebene bezeichnet. Wie diese Projektion stattfindet, hängt vor allem von zwei Kamera-abhängigen Sets an Parametern ab: Den intrinsischen und den extrinsischen Kameraparametern. Erstere hängen lediglich von der Beschaffenheit der Kamera ab und ändern sich nicht wenn die Kamera ihre Position im Raum ändert. Hierunter fallen die Brennweite der Kamera („Focal length“ in der oben stehenden Abbildung) sowie der Ursprung des Bildebenenkoordinatensystems. Außerdem wird hierüber eine Scherung des projizierten Bildes bestimmt. Die intrinsischen Parameter können als

$$K = \begin{pmatrix} f_x & s & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

in einer Matrix zusammengefasst werden, in welcher f_x und f_y für die Brennweite in Pixeln (bei perfekt quadratischen Pixeln gilt $f_x = f_y$), s für die Scherung und y_0 sowie x_0 für die Verschiebung des Bildkoordinatenursprungs in X - und Y -Richtung in Pixeln stehen.

Im Gegensatz dazu definieren die extrinsischen Parameter die Orientierung und die Position der Kamera im Weltkoordinatensystem. Entsprechend werden diese als eine Rotationsmatrix R und ein Ortsvektor T ausgedrückt. Dabei handelt es sich bei T jedoch nicht etwa um die Position der Kamera in Weltkoordinaten, sondern um den Ursprung des Weltkoordinatensystems welcher in dem Koordinatensystem ausgedrückt ist, dessen Ursprung in der Kamera liegt.

Mithilfe dieser Parameter ergibt sich die Kameramatrix P als

$$P = K[R \mid T] \quad (2.2)$$

Sei nun

$$\vec{z}_W = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

ein Punkt im Weltkoordinatensystem, ausgedrückt in homogenen Koordinaten. Dann lässt sich der projizierte Bildpunkt

$$\vec{z}_B = \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

wie folgt berechnen:

$$\vec{z}_B = P * \vec{z}_W \quad (2.5)$$

2.1.1 Die Kamerakalibrierung

Das Kalibrierungsmuster

Um das Lichtschnittverfahren einzusetzen, müssen die internen und die externen Kameraparameter bekannt sein. Die Berechnung dieser Parameter geschieht in einem Prozess namens Kamerakalibrierung. Dabei wird mit der Kamera ein bestimmtes Muster fotografiert, welches es besonders einfach macht, algorithmisch Punkte in diesem Muster zu bestimmen. Ein üblicher Ansatz ist es, als ein solches Muster ein Schachbrettmuster mit einer bekannten Seitenlänge für die einzelnen Quadrate zu verwenden. So wurde auch in der vorliegenden Arbeit verfahren. Das Muster ist in Abb. 2.2 zu sehen. Dieses Muster legt in einem bestimmten Punkt den Koordinatenursprung des Weltkoordinatensystems fest und spannt zugleich die X-Y-Ebene auf. Durch die bekannte Seitenlänge können dann die Weltkoordinaten von weiteren Punkten im Muster bestimmt werden. Wenn die Kamera nun ein Bild des Musters gemacht hat, kann aus diesen Punkten eine Menge von Bildpunkten bestimmt werden, deren entsprechende Weltkoordinaten bekannt sind, und die alle auf der X-Y-Ebene liegen.

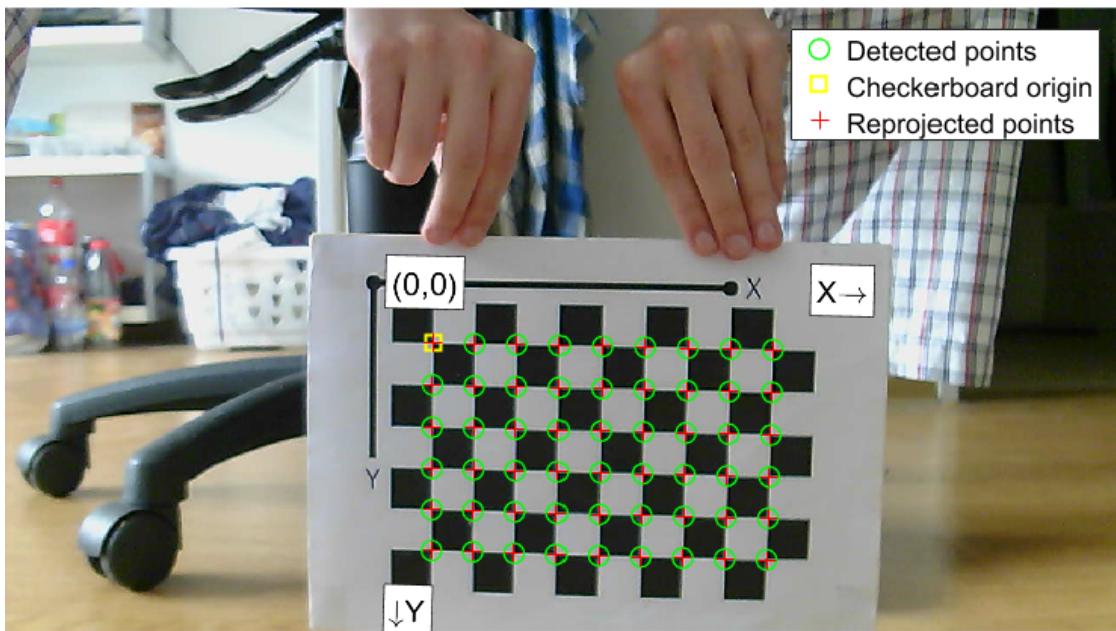


Abb. 2.2: Ein Bild das für die Kalibrierung in Matlab benutzt wurde. Zu sehen ist das Schachbrettmuster mit einer Seitenlänge von 22 Millimetern für ein einzelnes Quadrat. Auf der Basis dieses Musters wird ein Set an Punkten im Weltkoordinatensystem generiert (dargestellt durch die grünen Kreise). Die roten Kreuze markieren die Projektionen dieser Punkte zurück auf die Bildebene nach der Kalibrierung. Der Ursprung des Weltkoordinatensystems befindet sich in der oberen linken Ecke des Schachbrettmusters (markiert durch ein gelbes Quadrat). Das Kalibrierungsmuster spannt so auch die X-Y-Ebene des Weltkoordinatensystems auf.

Berechnung einer Homographie

Alle Punkte, die im Kalibrierungsmuster erkannt wurden, befinden sich wie oben beschrieben auf der X-Y-Ebene. Für sie lässt sich also die Z-Koordinate auf null setzen. Die Projektion dieser Punkte vom Weltkoordinatensystem in die Bildebene kann also anstatt von einer Projektion vom 3D- in den 2D-Raum (wie bei anderen Punkten im Weltkoordinatensystem der Fall) als Projektion von einem 2D- in einen anderen 2D-Raum betrachtet werden. Eine solche Projektion kann als invertierbare projektive Transformation in Form einer Transformationsmatrix ausgedrückt werden. Transformationen dieser Art werden auch als Homographie bezeichnet und meistens mit H notiert. Aus einer einzelnen Fotografie des Kalibrierungsmusters kann eine solche Homographie H berechnet werden, indem die daraus resultierenden Korrespondenzen zwischen Punkten im Weltkoordinatensystem und ihren Projektionen auf der Bildebene betrachtet werden. Die Berechnung, welche angepasst aus [Kri07] übernommen wurde, läuft wie folgt ab:

Seien $\vec{x}_w = (x_w y_w z_w)^T$ ein Punkt auf der Kalibrierungsmusterebene und $\vec{x}_b = (x_b y_b z_b)^T$ ein Punkt auf der Bildebene, beide in homogenen Koordinaten. Dann gilt für die Homographie H , dargestellt als 3×3 -Matrix:

$$\begin{pmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Um homogene Koordinaten in ihr inhomogene Entsprechung umzuwandeln, werden sie durch die Koordinate der hinzugefügten Dimension geteilt. Es gilt für die entsprechenden inhomogenen Koordinaten x_b' und y_b' also:

$$x_b' = \frac{x_b}{z_b}, \quad y_b' = \frac{y_b}{z_b} \quad (2.7)$$

Sei nun o.B.d.A. $z_w = 1$. Aus den Gleichungen 2.6 und 2.7 folgt dann:

$$x_b' = \frac{H_{11}x_w + H_{12}y_w + H_{13}}{H_{31}x_w + H_{32}y_w + H_{33}} \Leftrightarrow \quad (2.8)$$

$$x_b'(H_{11}x_w + H_{12}y_w + H_{13}) = H_{31}x_w + H_{32}y_w + H_{33} \Leftrightarrow \quad (2.9)$$

$$x_b'(H_{11}x_w + H_{12}y_w + H_{13}) - (H_{31}x_w + H_{32}y_w + H_{33}) = 0 \quad (2.10)$$

$$y_b' = \frac{H_{21}x_w + H_{22}y_w + H_{23}}{H_{31}x_w + H_{32}y_w + H_{33}} \Leftrightarrow \quad (2.11)$$

$$y_b'(H_{21}x_w + H_{22}y_w + H_{23}) = H_{31}x_w + H_{32}y_w + H_{33} \Leftrightarrow \quad (2.12)$$

$$y_b'(H_{21}x_w + H_{22}y_w + H_{23}) - (H_{31}x_w + H_{32}y_w + H_{33}) = 0 \quad (2.13)$$

Seien nun die Vektoren \vec{h} , \vec{a}_x , \vec{a}_y definiert als:

$$\vec{h} = (H_{11}, H_{12}, H_{13}, H_{21}, H_{22}, H_{23}, H_{31}, H_{32}, H_{33})^T \quad (2.14)$$

$$\vec{a}_x = (-x_w, -y_w, -1, 0, 0, 0, x_b'x_w, x_b'y_w, x_b')^T \quad (2.15)$$

$$\vec{a}_y = (0, 0, 0, -x_w, -y_w, -1, y_b'x_w, y_b'y_w, y_b')^T \quad (2.16)$$

Man kann \vec{a}_x und \vec{a}_y also aus einer Punktkorrespondenz von Weltkoordinaten zu Bildebenenkoordinaten bilden. Seien nun \vec{a}_{xn} und \vec{a}_{yn} die Vektoren die aus der n -ten Punktkorrespondenz gebildet wurden. Dann lässt sich eine Matrix A definieren mit:

$$A = (\vec{a}_{x1}^T, \vec{a}_{y1}^T, \dots, \vec{a}_{xN}^T, \vec{a}_{yN}^T) \quad (2.17)$$

Nun sind alle Elemente vorhanden um das lineare Gleichungssystem, mit dem wir H berechnen können, aufzustellen:

$$A\vec{h} = 0 \quad (2.18)$$

Da die Homographie H mit jedem Skalierungsfaktor größer null multipliziert werden kann ohne dass sich die Transformation ändert, besitzt sie 8 Freiheitsgrade. Es reichen also mindestens 4 Punktkorrespondenzen aus damit das Gleichungssystem eindeutig für \vec{h} gelöst werden kann.

Bestimmung der Kameraparameter

Aus jedem Bild des Kalibrierungsmusters kann also wie im vorangehenden Absatz beschrieben eine Homographie H berechnet werden. Nach [Zha98] und [Rah] können die Kameraparameter nun mittels dreier solcher Homographien wie folgt berechnet werden:

Sei die Rotationsmatrix $R = (\vec{r}_1 \vec{r}_2 \vec{r}_3)$ und die Translation $T = \vec{t}$ der Kameramatrix dargestellt in ihren Spaltenvektoren. Für alle Punkte, aus denen eine bekannte Homographie H berechnet wurde, gilt, dass sie sich auf dem Kalibrierungsmuster (und damit auch auf der X-Y-Ebene) befinden. Daraus folgt, dass für jeden dieser Punkte $\vec{x}_w = (X \ Y \ 0 \ 1)^T$ und dessen Projektion auf die Bildebene $\vec{x}_b = (U \ V \ 1)^T$ gilt:

$$\vec{x}_b = K(\vec{r}_1 \vec{r}_2 \vec{t}) \vec{x}_w \quad (2.19)$$

Man beachte Ähnlichkeit zu Gleichung 2.6. Für die Homographie $H = (\vec{h}_1 \vec{h}_2 \vec{h}_3)$, dargestellt in ihren Spaltenvektoren, ergibt sich dann:

$$(\vec{h}_1 \vec{h}_2 \vec{h}_3) = \lambda K(\vec{r}_1 \vec{r}_2 \vec{t}) \quad (2.20)$$

mit λ als Skalar. Stellt man diese Gleichung geeignet um, ergibt sich für \vec{r}_1 und \vec{r}_2

$$\vec{r}_1 = \lambda^{-1} K^{-1} \vec{h}_1, \quad \vec{r}_2 = \lambda^{-1} K^{-1} \vec{h}_2 \quad (2.21)$$

Da für r_1 und r_2 gilt, dass sie orthogonal zueinander stehen ($r_1^T r_2 = 0$) und normalisiert sind ($\|r_1\| = \|r_2\| = 1$), gilt:

$$h_1^T K^{-T} K^{-1} h_2 = 0 \quad (2.22)$$

$$h_1^T K^{-T} K^{-1} h_1 = h_2^T K^{-T} K^{-1} h_2 \quad (2.23)$$

Man erhält so zwei Bedingungen für die interne Kameramatrix K . Möchte man alle fünf internen Kameraparameter bestimmen, sind also drei Homographien notwendig. Geht man davon aus, dass keine Scherung bei der Bildprojektion auftritt, kann auch mit zwei Homographien gearbeitet werden. Um die Bedingungen für K nun in die Form eines lösbarren linearen Gleichungssystems gießen zu können, sind einige weitere Definitionen von Nöten. Sei die Matrix B definiert als

$$B = K^{-T}K^{-1} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

mit einem zusammenfassenden Vektor

$$\vec{b} = (B_{11}, B_{12}, B_{13}, B_{22}, B_{23}, B_{33})^T \quad (2.25)$$

Schreibt man nun den i -ten Spaltenvektor von H mit $\vec{h}_i = (h_{i1}, h_{i2}, h_{j3})^T$ lässt sich folgender Vektor

$$\vec{v}_{ij} = (h_{i1}h_{j1}, h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1}, h_{i2}h_{j2}, h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3}, h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3}, h_{i3}h_{j3})^T \quad (2.26)$$

definieren. Die Bedingungen aus Gleichung 2.22 und 2.23 lassen sich dann in folgender Form aufstellen:

$$\begin{pmatrix} \vec{v}_{12}^T \\ \vec{v}_{11}^T - \vec{v}_{22}^T \end{pmatrix} \vec{b} = 0 \quad (2.27)$$

Mit zwei anderen Homographien kann man dann eine 6×6 -Matrix V durch Übereinanderstaplung von der entsprechenden \vec{v} -Vektoren, mit der sich dann folgendes eindeutig lösbar lineare Gleichungssystem ausdrücken lässt:

$$V\vec{b} = 0 \quad (2.28)$$

Ist das Gleichungssystem gelöst und B durch \vec{b} bestimmt, kann man mittels einer Cholesky-Faktorisierung und einer Invertierung K bestimmen. Die externen Kameraparameter können für jede Aufnahme dann unter Anwendung der Gleichung 2.20 für $\lambda = \|K^{-1}\vec{h}_1\|$ folgendermaßen berechnet werden:

$$(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{t}) = K^{-1}H/\|K^{-1}\vec{h}_1\| \quad (2.29)$$

$$\vec{r}_3 = \vec{r}_1 \times \vec{r}_2 \quad (2.30)$$

Als Metrik zu Bestimmung der Güte der Kalibrierung kann der sogenannte Reprojection Error berechnet werden, welcher auch von Matlab verwendet wird (vgl. [Mata] und [Sta]). Er ergibt sich aus den Pixelabständen zwischen den im Bild erkannten Schachbrett-Punkten und den auf das Bild mittels den Kameraparametern zurück projizierten korrespondierenden Weltkoordinaten, zu sehen auch in Abb. 2.2. Laut [Mata] gilt jeder durchschnittliche Fehler von unter einem Pixel als akzeptabel:

„As a general rule, reprojection errors of less than one pixel are acceptable.“

Bei dem in Bild aus Abb. 2.2 wurde ein beispielsweise ein Reprojection Error von 0.2 Pixeln erreicht.

Auch wenn alle in diesem Kapitel aufgeführten linearen Gleichungssysteme theoretisch rein linear gelöst werden können, ist dies in der Praxis keine durchführbare Lösung. Durch Rauschen während der Messung würden keine verwendbaren Ergebnisse berechnet werden. Vielmehr wird ein Algorithmus angewandt, in dem das Problem als Minimierungsproblem formuliert und mittels der Minimum-Likelihood-Methode gelöst wird. Die Details dieses Ansatzes liegen jedoch außerhalb des Zuständigkeitsbereichs dieses Kapitels und können unter anderem bei [Zha98] nachgelesen werden. Dort kann auch eingesehen werden wie mit Linsenverzerrung umgegangen wird, welche im hier beschriebenen Lösungsverfahren der Einfachheit halber ausgelassen wurde.

2.2 Der Lichschnitt

Die Kameramatrix P projiziert von einem dreidimensionalen Raum auf eine 2D-Bildebene. Dabei gehen die Tiefeninformationen verloren: Die Inverse dieser Matrix P^{-1} kann nicht eindeutig von einem 2D-Bildpunkt auf eine 3D-Weltkoordinate abbilden. Stattdessen bildet sie auf eine Gerade ab, die durch das Zentrum der Kamera und den von P projizierten Bildpunkt verläuft (siehe Abbildung 2.3). Um nun zu rekonstruieren, wo auf dieser Geraden ein aufgenommener Punkt liegt und die vollständigen 3D-Koordinaten zu rekonstruieren, wird das Lichtschnittverfahren eingesetzt. Dabei wird von einem Laserlinienscanner eine Ebene aufgespannt, deren Parameter im Weltkoordinatensystem bekannt sind. Auf der Aufnahme eines zu vermessenen Objektes, welches sich mit der Ebene schneidet, ist dieser Schnitt in Form der auf das Objekt fallenden Laserlinie zu sehen. Jeder Punkt auf der Bildebene, der sich auf dieser Laserlinie befindet, liegt im Weltkoordinatensystem auch auf der aufgespannten Ebene. Es kann also der Schnittpunkt der Gerade, welche durch den Bildpunkt und das Kamerazentrum gegeben ist, und der durch den Laser definierten Ebene berechnet werden. Dieser Schnittpunkt ist dann in Weltkoordinaten gegeben. Wird dies mit allen auf der Laserlinie liegenden Bildpunkten gemacht, kann so eine Punktwolke der Schnittlinie der Ebene mit dem Objekt berechnet werden. Wie die Berechnung konkret stattfindet wird im Zuge von Abschnitt 3.2.6 beschrieben.

Wurde das Objekt auch an anderen Stellen mit dem Laser abgetastet und abfotografiert, kann dieses Verfahren für jede Schnittlinie wiederholt werden. So kann eine Punktwolke berechnet werden, welche sich für jeden berechneten Schnittpunkt immer näher an das Objekt annähert. Wie das Verfahren für die vorliegende Ausarbeitung in die Praxis umgesetzt wurde, folgt im nächsten Kapitel.

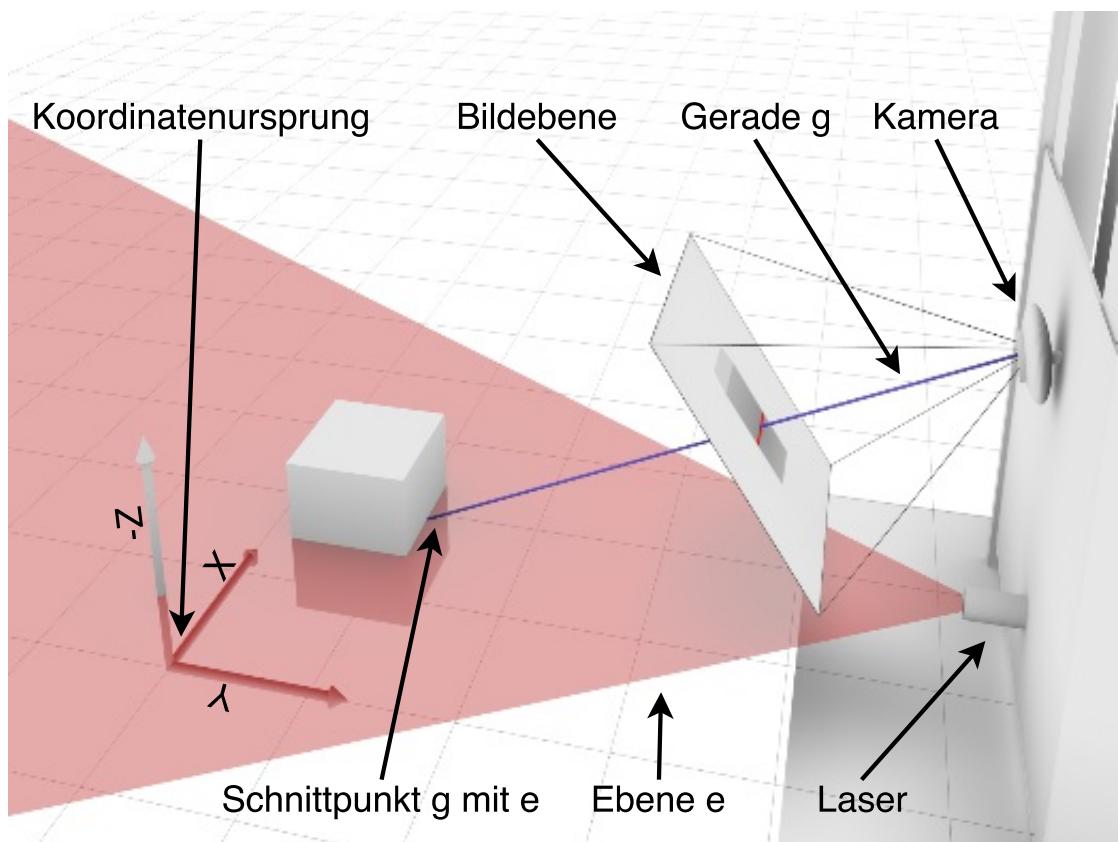


Abb. 2.3: Das Lichtschnittverfahren verbildlicht. Ein Punkt auf der Bildebene mit der inversen Kameramatrix auf eine Grade abgebildet werden, die durch den Punkt in der Bildebene und das Zentrum der Kamera verläuft. Die Tiefeninformationen werden berechnet in dem diese Gerade mit der vom Linienlaser aufgespannten Ebene geschnitten wird. Diese Operation wird für alle Punkte der Bildebene ausgeführt die auf der im Bild sichtbaren Laserlinie liegen.

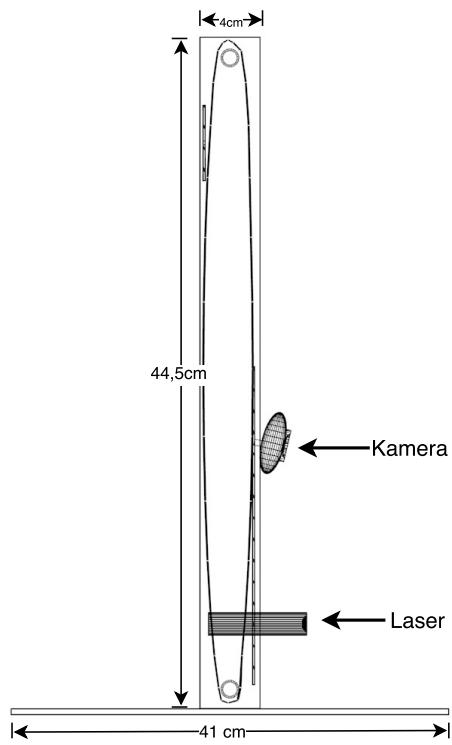
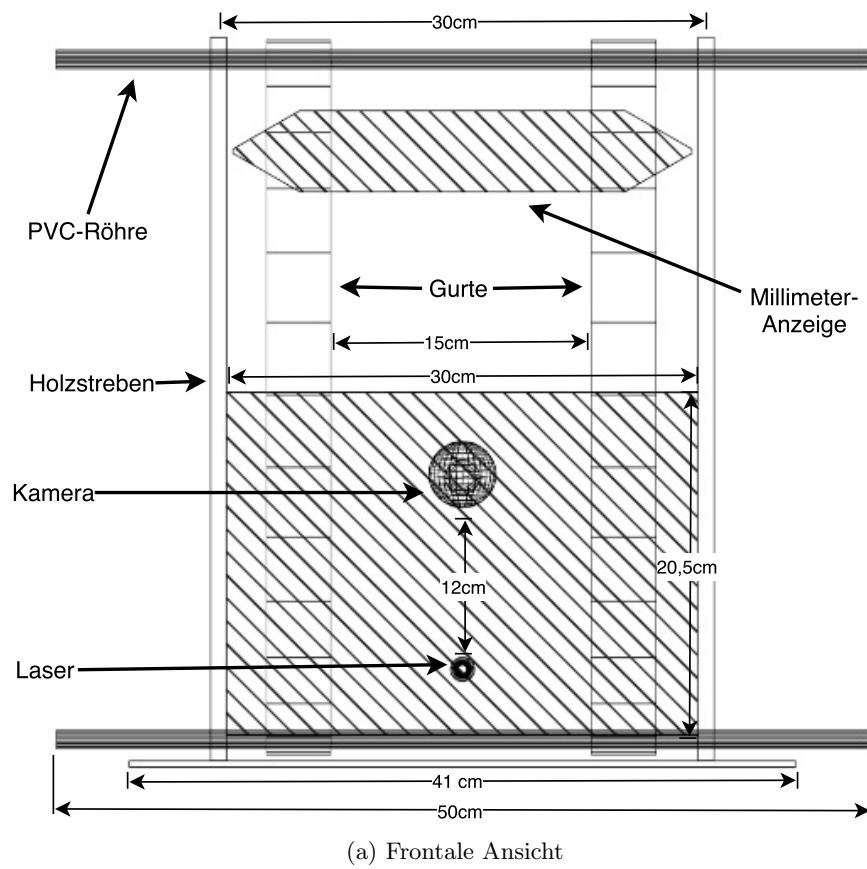
3

Implementierung

3.1 Scanner Konstruktion

Für die Durchführung des Lichtschnittverfahrens ist es zuerst erforderlich, geeignete Daten zu erheben. Mit Daten sind in diesem Kontext die Fotografien gemeint, auf denen das zu vermessende Objekt inklusive der projizierten Laserlinie zu sehen sind. Es ist daher eine Vorrichtung von Nöten, die es ermöglicht, die Webcam und den Laser so zu fixieren, dass das zu vermessene Objekt bei angemessener Genauigkeit leicht fotografierbar ist. Für sowohl den Laser als auch die Kamera besteht die Notwendigkeit, so beweglich zu sein, dass das zu vermessene Objekt an definierten Positionen mit dem Laser abgetastet werden kann, sich das räumliche Verhältnis zwischen Webcam und Laser sich jedoch nicht verändert. Beim vorliegenden Projekt wurde dies unter Berücksichtigung einer Konstruktion realisiert, welche die in Kapitel 1 aufgeführten Designziele erfüllt. Konzeptionell hält sich die Konstruktion an das Schema in Abbildung 3.1, die praktische Umsetzung ist in Abbildung 3.2 zu sehen. Die in dieser Ausarbeitung vorgeschlagene Lösung setzt darauf, Kamera und Laser einem definierten Abstand von 12,5 cm Abstand vertikal übereinander zu fixieren. Zu diesem Zweck werden beide Komponenten auf einer dünnen Holzplatte angebracht. Diese Holzplatte befindet sich auf zum Boden senkrecht befindlichen Schlaufen aus stabilem Gurt, welche um zwei PVC-Röhren gespannt sind. Besagte PVC-Röhren ruhen in horizontaler Lage in zwei Holzstreben, welche wiederum senkrecht auf einer Basis aus dünnem Pappelholz geklebt sind.

Die vom Laser aufgespannte Ebene befindet sich somit parallel zur X-Y-Ebene, die vom Kalibrierungsmuster aufgespannt wird, während die Kamera schräg von oben auf das zu vermessene Objekt schaut. Der Winkel zwischen der Blickrichtung der Kamera und dieser Ebene ist dabei frei wählbar, sofern die Kamera das Kalibrierungsmuster sowie die projizierte Laserlinie in ihrer Gesamtheit fotografieren kann. Das Objekt wird abgetastet indem mittels des Gurts die Holzplatte, auf der Kamera und Laser montiert sind, von unten nach oben bewegt wird. Die Kontrolle, wie weit der Laser über das Objekt bewegt wurde, wird mit der auf der Rückseite installierten Anzeige durchgeführt. Sobald sich Laser und Kamera nach oben bewegen, zeigt die Anzeige an den Seiten der Holzstreben, an denen eine



(b) Seitliche Ansicht

Abb. 3.1: Konzeptzeichnungen des Scanners mit Bemaßung und Beschriftung. Zu sehen ist der schematisch dargestellte Aufbau von vorne und von der Seite.

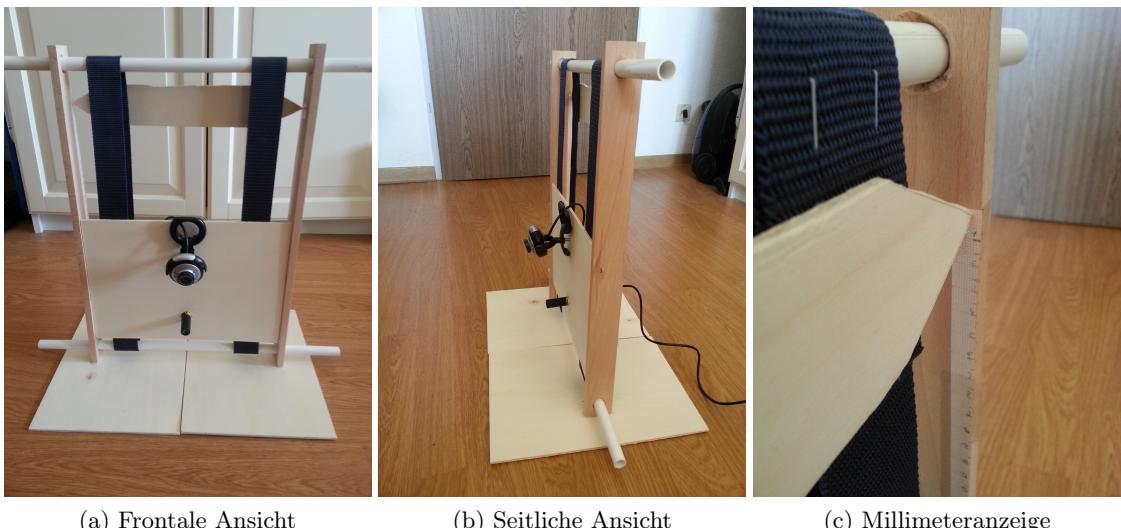


Abb. 3.2: Praktische Realisierung des Scannerkonzeptes aus Abb. 3.1. Zu sehen sind verschiedene Blickwinkel und eine Nahaufnahme der Millimeteranzeige. Mit letzterer wird gemessen, wie weit sich die Holzplatte zwischen Bildaufnahmen entlang der negativen Z-Achse bewegt hat.

Skala in Millimeter-Papier angebracht ist, wie weit genau sich die Holzplatte von der Startposition aus nach oben bewegt hat indem sie sich um den gleichen Betrag nach unten bewegt. In Unterabbildung (c) von Abb. 3.2 ist eine Nahaufnahme der Anzeige zu sehen.

Ein wesentlicher Vorteil der Konstruktion liegt in der Parallelität der Laser-Ebene zum Boden. Auf diese Weise muss bei der späteren Bildverarbeitung der Fall nicht beachtet werden, dass die Laserlinie auf den Untergrund fällt, auf dem das zu vermessene Objekt steht. Wäre dies der Fall, müssten bei der späteren programmatischen Erkennung der Laserlinie die Teile der Linie, die auf das Objekt fallen, von denen, die auf den Untergrund fallen, aufwendig getrennt werden. Ebenfalls macht der Aufbau die Berechnung der Weltkoordinaten im Gegensatz zu vergleichbaren Konstruktionen (wie zum Beispiel bei einem schwenkbaren Scanner wie er in !QUELLE! verwendet wird) unkomplizierter: Da sich die Apparatur zwischen Aufnahmen lediglich entlang der negativen Z-Achse bewegt (siehe Abb. !BILD!) und dieser Abstand bekannt ist, kann auf den Z-Achsen-Anteil des Messungsergebnis der besagte Abstand einfach addiert werden.

Der Gesamtaufbau setzt auf eine Lösung, die problemlos nachgebaut werden kann und sich dem zu Grunde liegenden Problem so nähert, dass anschließende Verarbeitungen und Berechnungen erleichtert werden. Zudem ist die Konstruktion kostengünstig. In Tabelle 3.1 können die Preise in Euro eingesehen werden, die alle Komponenten (außer Kleinteile wie einzelne Schrauben, Holzleim etc.) gekostet haben. Zusammen kommt der Scanner auf einen Preis von ca. 45,14€

Komponente	Preis in Euro
Kamera „TeckNet C016 USB HD Webcam“	13,99 €
Linienlaser	ca. 20 €
PVC-Röhre	1,69 €
Holzleiste Buche (Seitenstreben)	3,79 €
Pappel-Sperrholz	2,29 €
Gurtband	3,38 €

Tabelle 3.1: Kosten der einzelnen Scanvorrichtungskomponenten

3.2 Der Scavorgang

Für die Umwandlung eines Objekts in eine Reihe von abgetasteten Weltkoordinaten wird in der vorliegenden Implementierung ein Prozess vorgeschlagen, der aus sechs Stufen besteht. Der Gesamtprozess ist schematisch in Abb. 3.3 dargestellt. Der Prozessablauf orientiert sich dabei an der Häufigkeit, mit der einzelne Bearbeitungsschritte pro Messung durchgeführt werden. Die Aktionen, deren Ausführung nur einmal erforderlich ist, um mehrere Scavorgänge ausführen zu können, werden zuerst vorgenommen, während Aktionen, die beispielsweise pro aufgenommenen Bild ausgeführt werden, am Schluss folgen. So werden Teilergebnisse für mehrere Scanprozesse wiederverwendet.

Die Kalibrierung der internen Kameraparameter beispielsweise ist unabhängig von den anderen Umständen des eigentlichen Scavorgangs und muss nicht für jede Messreihe erneut stattfinden, sondern lediglich wenn sich die Fokus-Einstellung der Kamera ändert. In der darauf folgenden Stufe des Scannens werden die nötigen Fotografien aufgenommen, was im Folgenden als Datenerhebung bezeichnet wird. Anschließend werden anhand einiger weniger dieser Bilder weitere Kalibrierungen vorgenommen, welche für einen Messvorgang, bei dem sich das Weltkoordinatensystem und die Position des Objektes sowie des Scanners nicht ändert, als konstant angenommen werden kann. Zuletzt werden auf allen Bildern des Datensatzes die beiden Schritte der Laserlinienerkennung und Weltkoordinatenberechnung ausgeführt, welche für jedes Bild des Datensatzes andere Ergebnisse liefern und damit am Ende der Pipeline stehen. Die als Resultat eines jeden Bildes berechneten Weltkoordinaten werden gesammelt und stehen als Punktwolke zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung. Im Folgenden werden nun die einzelnen Stufen des Scavorgangs einzeln näher erläutert.

3.2.1 Kalibrierung der internen Kameraparameter

In Abschnitt 2.1.1 wurde die Theorie hinter der Kamerakalibrierung bereits erläutert, daher wird das Verfahren an dieser Stelle lediglich aus praktischer Sicht betrachtet. Aus Gründen, welche in 3.2 dargelegt wurden, ist der Kamerakalibrierungsprozess in zwei zeitlich voneinander getrennte Teile gespalten. Am Anfang steht hierbei die Bestimmung der internen Kameraparametern, insbesondere der internen Kameramatrix. Um diese abzuschätzen wurde auf die in Matlab integrierte

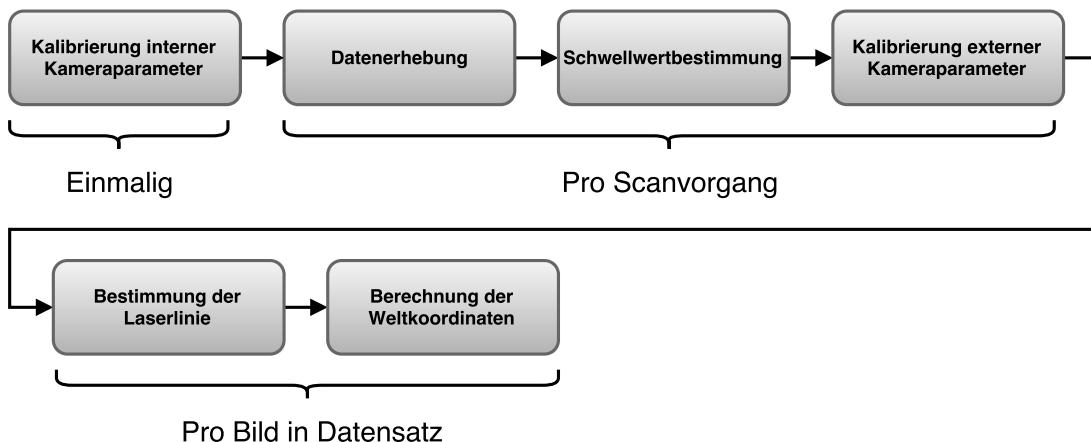


Abb. 3.3: Die Stufen des Scavorgangs schematisch dargestellt

Kamerakalibrierungsapp zurückgegriffen, welche aus einem Set von vorher aufgenommenen Bildern die Kameraparameter (wie in 2.1.1 beschrieben) schätzt. Dabei wird die Reihe der Kalibrierungsbilder in die App importiert und anschließend verarbeitet. Bevor die nun geschätzte interne Kameramatrix als eigenständige Datei exportiert werden kann, werden die Reprojection Errors begutachtet. Diese stellen eine Metrik dar, welche besagt, wie erfolgreich die Kalibrierung verlaufen ist. Bei den dieser Ausarbeitung mitgelieferten Kalibrierungsbildern wurde ein durchschnittlicher Reprojection Error von 0,3572 erreicht. Am Ende der Kalibrierung muss die interne Kameramatrix gespeichert und für die weiteren Schritte hinterlegt werden.

3.2.2 Datenerhebung

In der Phase der Datenerhebung werden die Fotografien des zu vermessenen Objektes aufgenommen. Dabei wird die Konstruktion, die in Kapitel 3.1 beschrieben wurde, verwendet. Zuerst wird die Messplatte in ihre Startposition gebracht, so dass die Millimeter-Anzeige einen Abstand von 0 Millimetern anzeigt (vgl. Abb. ??). Anschließend wird das Schachbrettmuster, das auch bei der Kalibrierung der internen Kameraparametern zum Einsatz kam, so platziert, dass die Kamera alle Quadrate des Musters erkennen kann. Für das erste Bild ist es wichtig eine Aufnahme des Musters zu machen, auf dem das zu vermessene Objekt nicht abgebildet ist. Dieses Bild wird für die Kalibrierung der externen Kameraparameter benötigt, welche im kommenden Abschnitt 3.2.4 beschrieben ist. Von nun an ist es für den Rest des Scavorgangs nicht mehr erlaubt, den Neigungswinkel der Kamera zu ändern, da dies die Rotation der Kamera ändert und damit die Ergebnisse der Kalibrierung der externen Kameraparameter verfälschen würde.

Anschließend wird das zu vermessene Objekt so auf dem Schachbrettmuster platziert. Das Objekt wird bei der ersten Aufnahme so aufgestellt, dass die projizierte Laserlinie in folgenden Bildern das Objekt entlang der negativen Z-Achse in seiner Gesamtheit abtasten kann. Aufgrund der Konstruktion des Scanners liegt

das Schachbrettmuster, auf dem das Objekt steht, dafür auf einer Erhöhung von ca. 9 cm. Für eine korrekte Messung ist es außerdem erforderlich, dass die projizierte Laserlinie dabei in ihrer ganzen Länge zu erkennen ist. Ist das Objekt in Position gebracht, wird die erste Aufnahme durchgeführt. Nun muss die Messplatte mithilfe der Millimeter-Anzeige um einen vorher festgelegten Millimeter-Betrag nach oben bewegt werden. Der festgelegte Betrag muss für die spätere Berechnung der Weltkoordinaten festgehalten werden. Anschließend wird die nächste Fotografie aufgenommen. Dabei ist zu beachten, dass sich zwischen den Bildern nichts anderes als die Messplatte bewegt und der vorher festgelegte Abstand so genau wie möglich eingehalten wird. So wird nun das gesamte Objekt mit dem Laser abgetastet und je nach gewähltem Abstand in Millimetern, den sich die Laserlinie zwischen Aufnahmen entlang der Z-Achse bewegt, ergeben sich mehr oder weniger Bilder, die für die folgenden Phasen abgespeichert werden.

3.2.3 Schwellwertbestimmung

Die Laserlinie, welche auf das zu vermessene Objekt projiziert wird und die nötigen Informationen zur Bestimmung der Tiefeninformation der Weltkoordinaten liefert, wird in jedem aufgenommenen Bild neu lokalisiert (vgl. den kommenden Abschnitt 3.2.5). Der Ansatz, die Laserlinie im Bild zu bestimmen, basiert auf einer globalen Schwellwertsegmentierung, mit der die Laserlinie so gleichmäßig wie möglich segmentiert werden kann. Die Bestimmung und Speicherung dieses Schwellwertes geschieht in dem Schritt der Farbkalibrierung. Unter den Voraussetzungen dass

1. die projizierte Laserlinie den höchsten Rotanteil im Bild besitzt und
2. sich die Licht- und Farbumgebung des Datensatzes zwischen Bildern nicht signifikant ändert

kann der globale Schwellwert anhand eines einzelnen Bildes aus dem Datensatz semiautomatisch ermittelt werden, welcher im Anschluss für die restlichen Bilder der Messreihe wiederverwendet werden kann.

Die Schwellwertbestimmung liefert also den Grenzwert, mit der die spätere Lokalisierung der Laserlinie in Pixelkoordinaten am besten funktioniert. Gearbeitet wird dabei in dem YCbCr-Farbraum, da dieser es erlaubt, Farbinformationen von Helligkeitsinformationen zu trennen und den Rotanteil dennoch in einem einzelnen Kanal (dem Cr-Kanal) zu isolieren. Zwar ist dies auch im HSV-Farbraum über den H-Kanal möglich. Durch einen einzelnen Schwellwert im H-Kanal werden jedoch zu wenige Pixel durch den Schwellwert aussortiert, da auch sehr helle Pixel oder Pixel mit einer geringen Sättigung den nötigen Rotanteil besitzen. Auch wenn diesem Problem mit zusätzlichen Schwellwerten für den S- und den V-Kanal begegnet werden kann, wird es durch die hinzugefügten variablen Schwellwerte erheblich schwieriger eine Schwellwertkonstellation zu finden, für die eine Segmentierung der Laserlinie gelingt. Die resultierenden Probleme ähneln den Schwierigkeiten die für den RGB-Farbraum auftreten und in Abschnitt 4.1 ausgiebig erläutert werden. In der vorliegenden Implementierung zeichnet der Benutzer einmalig die Laserlinie mittels eines Splines nach, um diese Richtlinie automatisch unter Anwendung

des in 3.2.5 beschriebenen Verfahrens und steigenden Cr-Grenzwerte mit vielen verschiedenen extrahierten Laserlinien zu vergleichen. Der Cr-Grenzwert, mit dem diejenige Laserlinie extrahiert wurde, welche der manuell ermittelten Richtlinie am nächsten kommt, ist der optimale Grenzwert und wird für die kommenden Laserlinienlokalisierungen abgespeichert.

Wie nah eine Pixellinie dem vom Nutzer bestimmten Spline und damit der Laserlinie kommt, wird mit Hilfe einer Metrik in Form einer Distanzfunktion bestimmt. Diese Distanzfunktion weist zwei Pixellinien eine Distanz zu, welche in der durchschnittlichen Anzahl Pixeln, die beide Linien vertikal voneinander entfernt sind, gemessen wird. Pixellinien denen so eine kleine Distanz zugewiesen wird, sind in einem Bild also näher beieinander als Pixellinien, für die eine hohe Distanz berechnet wird. Im Folgenden wird die verwendete Distanzfunktion definiert.

Sei die Breite des gegebenen Bildes in Pixeln definiert als w und die Höhe in Pixeln als h . Die Spalten des Bildes lassen sich also mit Elementen der Spaltenindex-Menge $C = \{1, 2, 3, \dots, w\}$ indizieren, während die Reihen sich analog mit Indizes der Reihenindex-Menge $R = \{1, 2, 3, \dots, h\}$ bestimmen lassen. Die Position eines Pixels im Bild kann also mittels eines Tupels $p = (c, r)$ mit $c \in C$ und $r \in R$ bestimmen. Eine Pixellinie sei nun definiert als eine rechtseindeutige Relation $L \in C \times R$, welche durch eine Menge von geordneten Tupeln gegeben ist (Beispiel: $L = \{(1, 500), (2, 501), (3, 500), (5, 499)\}$). Die Rechtseindeutigkeit ist hierbei essentiell: Keiner Spalte des Bildes darf mehr als eine Reihe zugewiesen werden. Sei weiterhin mit $\text{Dom}(L) = \{c \in C \mid \exists r \in R : (c, r) \in L\}$ die Definitionsmenge einer gegebenen Pixellinie L gemeint.

Seien nun zwei Pixellinien L_1 und L_2 gegeben. Die Menge

$$S_{1,2} = \{\text{abs}(r_1 - r_2) \mid \exists c \in C : (c, r_1) \in L_1 \wedge (c, r_2) \in L_2\} \quad (3.1)$$

ist dann die Menge aller vertikalen Pixel-Abstände in Pixelspalten, in denen beide Pixellinien eine Pixelkoordinate besitzen. Sei außerdem

$$T_{1,2} = (\text{Dom}(L_1) \cup \text{Dom}(L_2)) \setminus (\text{Dom}(L_1) \cap \text{Dom}(L_2)) \quad (3.2)$$

die Menge aller Spaltenindizes beider Linien, die in der jeweils anderen Pixellinie auf keine Reihe abbilden. Mittels dieser beiden Mengendefinitionen kann nun die Distanzfunktion $D : (C \times R) \times (C \times R) \rightarrow \mathbb{R}$ definiert werden als:

$$D(L_1, L_2) = \frac{1}{|S_{1,2}| + |T_{1,2}|} \sum_{x \in S_{1,2}} x + (|T_{1,2}| * h) \quad (3.3)$$

D berechnet also das arithmetische Mittel aller vertikalen Pixelabstände der beiden Pixellinien. Dort wo die beiden Pixellinien sich horizontal überlappen, kann dafür der Pixelabstand genommen werden. In den Spalten, wo jedoch nur eine Linie definiert ist, kann kein direkter Abstand berechnet werden, daher wird ein „Bestrafungs-Betrag“ in Form der Höhe des Bildes auf die Summe gerechnet. Dieser ermöglicht, dass Pixellinien mit viel horizontaler Überschneidung näher bzw.

in diesem Kontext ähnlicher zueinander eingestuft werden, als Linien, die horizontale Lücken aufweisen. Abb. 3.4 verbildlicht die Berechnung der Metrik etwas deutlicher.

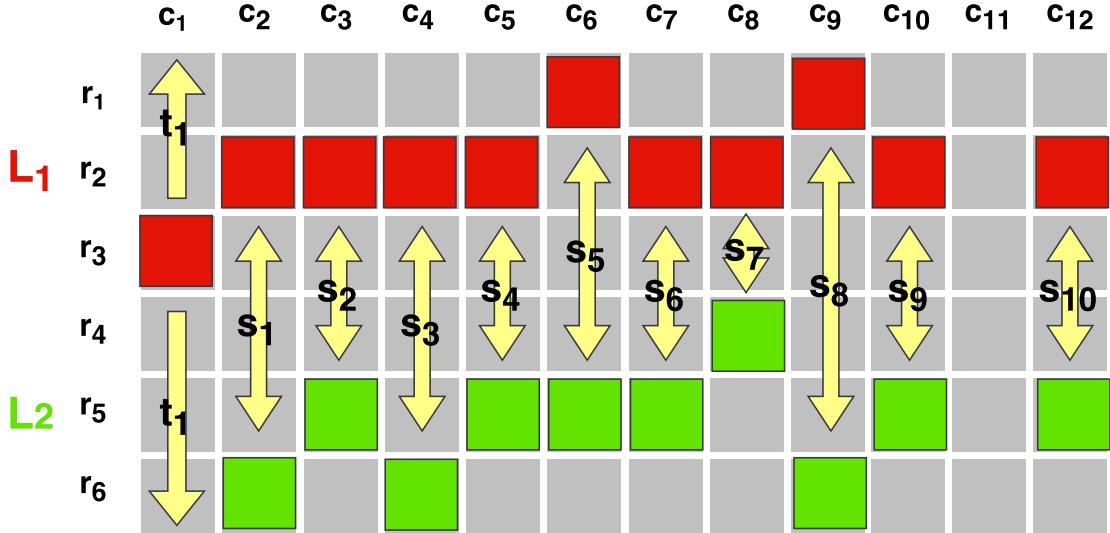


Abb. 3.4: Berechnung der Distanz zwischen zwei Linien. Zu sehen ist ein Schema der Berechnung aus Gleichung 3.3. Die einzelnen grauen Kästchen stellen Pixel aus einem Bild mit Spalten $C = \{c_1 \dots c_{12}\}$ und Reihen $R = \{r_1 \dots r_6\}$ dar. Die rot und grün eingefärbten Pixel sind Elemente von L_1 und L_2 und $S = \{s_1 \dots s_2\}$ und $T = \{t_1\}$ entsprechen den Definitionen aus Gleichungen 3.1 und 3.2. Für den oben abgebildeten Beispielfall ergibt sich $D(L_1, L_2) = \frac{1}{1+10} * ((1 * 6) + 3 + 2 + 3 + 2 + 3 + 2 + 1 + 4 + 2 + 2) \approx 2,72$

Zusammengefasst läuft die Schwellwertbestimmung folgender Maßen ab: Zuerst wird der Benutzer dazu aufgefordert mittels einiger Punkte die horizontal verlaufende projizierte Laserlinie mittels eines Splines nachzuzeichnen. Anschließend wird der globale Cr-Grenzwert mit null initialisiert. Die erste Laserlinie wird mit diesem Grenzwert lokalisiert (siehe dazu 3.2.5) und mit der oben beschriebenen Metrik D wird die Ähnlichkeit der gefundenen Linie zum „Goldstandard“ bestimmt. Der aktuelle Cr-Grenzwert wird nun vorläufig als am besten passender Grenzwert vermerkt. Als nächstes wird der Grenzwert um einen bestimmten Wert erhöht und die Laserlinie wird wieder lokalisiert. Wenn diese Linie näher an der vom Benutzer festgelegten Pixellinie (dem Goldstandard) liegt, wird der neue, erhöhte Cr-Grenzwert als optimal vermerkt. Dieses Verfahren geht so lange weiter, bis für einen neuen Grenzwert keine Linie gefunden werden kann, die näher am Goldstandard liegt. Der gefundene Grenzwert wird nun für die folgenden Schritte des Scavorgangs gespeichert.

3.2.4 Kalibrierung der externen Kameraparameter

Für die Berechnung der Koordinaten der projizierten Laserlinie nicht nur in Kamera- sondern auch in Weltkoordinaten, ist es nötig, die Position und Rotation der Kamera im Weltkoordinatensystem zu kennen. Diese Informationen werden im Schritt der Kalibrierung der externen Kameraparameter bestimmt. Sofern die Kamera zwischen Bildaufnahmen nicht bewegt wird, muss diese Kalibrierung nur einmal ausgeführt werden. Dafür ist eine Aufnahme des Schachbrettmusters notwendig, welches wie in 3.2.2 beschrieben aufgenommen werden muss. Anhand dieses Bildes werden aus dem Schachbrettmuster die Punkte im Weltkoordinatensystem und deren korrespondierende Bildpunkte generiert. Mittels ersterer und letzterer Punktemengen und den internen Kameraparametern aus Schritt 3.2.1 kann Matlab anschließend die Position und Rotation der Kamera gemäß dem in Kapitel 2.1.1 vorgestellten Verfahren ermitteln.

3.2.5 Bestimmung der Laserlinie

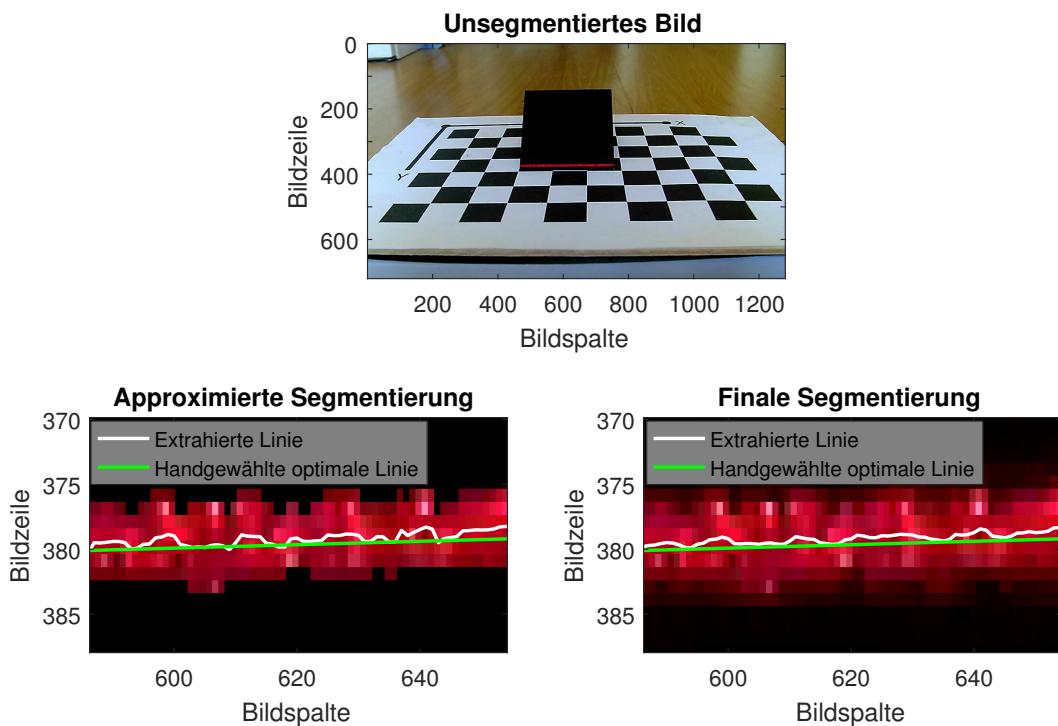


Abb. 3.5: Extraktion der Laserlinie. Zu sehen sind Ausschnitte der Segmentierung der Laserlinie in einem Bild (oben). Die beiden unteren Bilder zeigen die zu erst stattfindende angenäherte Segmentierung durch den globalen Schwellwert (links unten) und die anschließende Erweiterung der Laserliniensegmentierung (rechts unten). Es ist zu erkennen, dass sich die extrahierte Linie im Bild rechts unten eher an die manuell bestimmte Linie annähert als im Bild links daneben.

Bevor aus der Laserlinie die Tiefeninformationen gelesen werden können, muss die Position der Linie in Bildkoordinaten bestimmt werden. Da sich die Laserlinie von Bild zu Bild durch die Projektion auf die Objektgeometrie verformen kann und nicht für den gesamten Datensatz gleich bleibt, muss dieser Teil als erster Schritt des Verfahrens für jedes einzelne Bild des Datensatzes ausgeführt werden. Als erstes wird hierfür die Laserlinie mittels des Cr-Grenzwerts segmentiert, der wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben ermittelt wurde. Es entsteht eine Maske, in der alle Pixel, die unter dem Cr-Grenzwert liegen, geschwärzt werden. Es bleibt also nur die Segmentierung der Laserlinie übrig (vgl. Abb. 3.5). Nun kann für jede Spalte abgeschätzt werden, wo in dieser Spalte die Laserlinie auftritt, falls sie denn überhaupt in dieser Bildspalte zu finden ist. Dies geschieht indem ein arithmetisches Mittel über die Reihenindizes der gegebenen Spalte berechnet wird, welche mit den Rotwerten des jeweils indizierten Pixels gewichtet wird. Gegeben seien die bestehenden Definitionen aus Abschnitt 3.2.3. Sei zudem $Red(c, r)$ für $c \in C$ und $r \in R$ der Rotwert des Pixels (c, r) . Die Menge aller zu einem Spaltenindex $c \in C$ gehörenden Reihenindizes sei definiert als:

$$R_c = \{r \in R \mid (c, r) \in C \times R\} \quad (3.4)$$

Wird sich nun die Laserlinie in der gegebenen Spalte $c \in C$ angenähert, wird der korrespondierende Reihenindex berechnet als:

$$LineRow(c) = \frac{\sum_{x \in R_c} Red(c, x) * x}{\sum_{x \in R_c} Red(c, x)} \quad (3.5)$$

Das Ergebnis ist eine subpixelgenaue Bestimmung der Höhe der Laserlinie in Spalte c . Die gesamte extrahierte Pixellinie für ein gegebenes segmentiertes Bild ist also definiert als:

$$L_{auto} = \{(c, r) \in C \times R \mid \forall c: r = LineRow(c) \wedge r > 0\} \quad (3.6)$$

Da sich aus verschiedenen Gründen nicht immer zur Gänze darauf verlassen werden kann, dass die Segmentierung die Laserlinie in ihrer Gesamtheit erfasst wird (vgl. Abschnitt 4.1), kann es sein, dass eine verzerrte Version der Laserlinie berechnet wird, wenn lediglich das segmentierte Bild als Basis für L_{auto} herangezogen wird. Daher wird der Prozess zweimal durchgeführt: Zuerst wird eine Annäherung L_{auto}' mit dem segmentierten Bild berechnet. Anschließend werden in jeder Pixelspalte der approximierten Linie die Rotwerte des unmaskierten Bildes in einem festgelegten Abstand oberhalb und unterhalb des aktuellen Reihenindex wieder „eingebendet“, wobei die Pixel außerhalb dieses Bereichs jedoch nach wie vor geschwärzt bleiben. Diese neue Segmentierung wird nun als Basis für die Berechnung von L_{auto} herangezogen, welche wie durch Gleichung 3.6 beschrieben bestimmt wird. Dies führt zu einer genaueren Annäherung an die Optimallinie und einem generell „weicheren“ Verlauf der extrahierten Pixellinie (siehe Abb. 3.5). L_{auto} stellt die Bildkoordinaten der projizierten Laserlinie dar aufgrund derer im folgenden Verlauf des Scavorgangs die Weltkoordinaten berechnet werden.

3.2.6 Berechnung der Weltkoordinaten

Am Ende des Scavorgangs steht die Berechnung der Weltkoordinaten. Hier werden für jedes aufgenommene Bild die Bildkoordinaten der in Schritt 3.2.5 bestimmten Pixellinie L_{auto} wie folgt umgerechnet. Sei

$$\vec{p}_{Bild} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

ein als Vektor interpretierter Bildkoordinatenpunkt (x, y) in L_{auto} . Der Punkt kann mit der internen Kameramatrix K in das Kamerakoordinatensystem umgewandelt werden. Der Tiefenanteil, also die Z-Koordinate, wird hierbei noch nicht berechnet, sondern erst einmal auf 1 gesetzt:

$$\vec{p}_{Kamera} = K * \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Sei nun T und R die Kameratranslation und -rotation aus Abschnitt 3.2.4. Dann kann eine Gerade g definiert werden, die durch den Ortsvektor \vec{o}_g als das Zentrum der Kamera in Weltkoordinaten und durch Richtungsvektor \vec{d}_g als der im Weltkoordinatensystem ausgedrückte Vektor p_{Kamera} gegeben ist:

$$\vec{o}_g = R^{-1} * T \quad (3.9)$$

$$\vec{d}_g = R^{-1} * p_{Kamera} \quad (3.10)$$

$$g = \vec{o}_g + \lambda * \vec{d}_g \quad (3.11)$$

Der gesuchte Punkt \vec{p}_{Welt} liegt auf dieser Geraden. Um nun zu berechnen, wo auf der Geraden der Punkt liegt, kann der Schnittpunkt von g mit der Ebene e , die durch den Laser aufgespannt wird, berechnet werden. Der Ortsvektor \vec{o}_e von e ist durch den Aufbau des Scanners gegeben: Er befindet sich 120 mm in positiver Z-Richtung unter dem Zentrum der Kamera. Der Normalenvektor \vec{n}_e lässt sich ebenfalls aus der Scanner-Konstruktion bestimmen; dieser ist identisch mit der Z-Achse.

$$\vec{o}_e = \vec{o}_g + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 120 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

$$\vec{n}_e = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

$$\vec{n}_e \cdot (\vec{x} - \vec{o}_e) = 0 \quad (3.14)$$

Der Schnittpunkt \vec{p}_{Welt} ergibt sich dann aus:

$$\lambda = \frac{\vec{n}_e \cdot (\vec{o}_e - \vec{o}_g)}{\vec{n}_e \cdot \vec{d}_g} \quad (3.15)$$

Durch das Einsetzen des errechneten λ in g kann nun p_{Welt} berechnet werden (siehe zu dieser Berechnung auch [Kow])

Durch die oben beschriebene Berechnung kann nun für jeden Punkt in L_{auto} eine Weltkoordinate berechnet werden. Am Ende dieses Prozesses muss nun noch der Z-Achsen-Offset, der sich aus der Verschiebung des Scanner-Apparats zwischen Bildaufnahmen ergibt, auf die Koordinaten addiert werden. So wird für jede Aufnahme der Messreihe ein Satz von Weltkoordinaten errechnet, welcher zu einer Punktemenge hinzugefügt wird. Sind alle Aufnahmen verarbeitet, ist der Scavorgang abgeschlossen und das zu vermessene Objekt wurde erfolgreich abgebildet. Die resultierende Punktwolke steht dann zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung.

4

Ergebnisse

Jedes Messverfahren muss sich vor allem durch seine Genauigkeit behaupten. Im folgenden Kapitel werden in dieser Hinsicht die Ergebnisse vorgestellt, die das in Kapitel 3 implementierte Verfahren erbracht hat. Dabei wird auch darauf eingegangen, warum die erläuterten Ansätze verfolgt wurden, welche Schwierigkeiten sich ergeben und inwiefern diese sich auf die Messergebnisse ausgewirkt haben. Für die folgenden Erklärungen wurde die ebenfalls vorliegende exemplarische Messreihe einer im Raum liegenden schiefen Ebene verwendet, welche sich aufgrund ihrer geometrisch einfachen Form leicht beschreiben und als Validierungsobjekt verwenden lässt.

4.1 Laserlinienbestimmung

Die Lokalisierung der Laserlinie bestimmt in Bildkoordinaten, welche Teile des Bildes für die Messung interessant sind. Jegliche Ungenauigkeiten, die in diesem Schritt auftreten, propagieren sich also unweigerlich in den Folgeschritten zu immer größeren Messfehlern. Eine sorgfältige Bildverarbeitung ist hier also von hoher Bedeutung.

Wie in Abschnitt 3.2.3 und 3.2.5 beschrieben, wird für die Segmentierung der Laserlinie auf einen globalen Farbgrenzwert gesetzt. Dieser Ansatz erweist zwar eine geringe Komplexität, ist aber nicht ohne Nachteile. In Abb. 4.1 sind exemplarisch die Farbkanalwerte für die Pixel einer einzelnen Bildspalte aus einem ausgewählten Bild (welches in Abb. 3.5 ganz oben zu sehen ist) sowohl im RGB- als auch im YCbCr-Farbraum dargestellt. Dabei befinden sich auf der X-Achse die Reihenindizes und auf der Y-Achse die Kanalwerte im Bereich von 0 bis 255. Wie man der Abbildung erkennen kann, befindet sich die Laserlinie im X-Achsenabschnitt zwischen ca. 370 bis 380, erkennbar durch den hohen Ausschlag im Rot-Kanal. Möchte man nun einen globalen Farbgrenzwert ansetzen um die Laserlinie in ihrer gesamten Breite von ca. 10 Pixel zu erfassen und dabei alle anderen Bildanteile auszublenden, müssten alle Pixel mit einem Rotkanalwert von ca. unter 50 ausgeblendet (also geschwärzt) werden. Dabei bleiben aber noch die Pixel übrig, die sowohl einen hohen Rot- als auch einen hohen Blau und Grün-Anteil aufweisen und somit ebenfalls nicht zur Laserlinie gehören.

Es würde sich nun also anbieten, für den Grün- und Blau-Kanal einen Obergrenzwert festzulegen, der zusätzlich alle Pixel schwärzt, deren Grün- und Blau-Anteile über diesen Grenzwerten liegen. Wie aus Abb. 4.1 allerdings hervorgeht, ist es nicht möglich, solche Grenzwerte zu finden und gleichzeitig alle Pixel der Laserlinie zu erhalten. Vor allem im X-Achsenabschnitt von 0 bis 150 sind die Grünkanalwerte nicht hoch genug um durch die Obergrenze geschwärzt zu werden und gleichzeitig die Pixel im X-Achsenabschnitt von 370 bis 380 intakt zu lassen (ähnliches gilt für die Blau-Werte in anderen Teilen des Bildes). Eine Alternative bestünde darin, den Rotkanal-Untergrenzwert zu erhöhen, um die hohen Rotkanalwerte im X-Achsenabschnitt von 0 bis 150 auszublenden, was allerdings in einer generellen Schmälerung der Laserliniensegmentierung resultiert. In der vorliegenden Implementierung wurde nun anstatt eines RGB- ein YCbCr-Grenzwert verwendet. Dieser ist ebenfalls in Abb. 4.1 abgebildet. Das geschilderte Problem lässt sich zwar auch in diesem Farbraum nicht gänzlich vermeiden, jedoch besser kontrollieren. Wie in der Abbildung zu sehen ist, kann mit einem Untergrenzwert von ca. 150 die Laserlinie in einem Großteil ihrer Breite erfasst werden ohne dabei andere Farbkanäle in Betracht ziehen zu müssen. Indem nur ein Grenzwert angepasst werden muss, eignet sich dieser Farbraum somit auch zur besseren automatischen Grenzwertfindung, welche sicherstellen soll, dass die Schmälerung der Laserliniensegmentierung minimal ausfällt.

Ohne eine lokale Betrachtung der Bilddaten lässt sich mit einem globalen Ansatz die Segmentierung der Laserlinie also nicht zur Gänze beseitigen. Daher wird in der vorliegenden Implementierung wie in 3.2.5 beschrieben darauf gesetzt, nach einer groben Lokalisierung auf Basis dieser ersten Segmentierung eine feinere Bestimmung auf Basis der umliegenden unsegmentierten Pixeldaten vorzunehmen. So wird der Nachteil eines globalen Farbgrenzwertes abgeschwächt ohne zu viel Komplexität hinzuzufügen. Die Ergebnisse der Laserlinienbestimmung bewegen sich dank dieses Ansatzes in einem akzeptablen Fehlerraum. In 3.5 ist eine mit dem Verfahren erkannte Laserlinie zu sehen, welche neben einem vom Benutzer vorgenommenen Goldstandard und vor dem Hintergrund des betreffenden Bildes dargestellt ist. Der Cr-Grenzwert der in diesem Beispiel gewählt wurde ist durch dass Verfahren ermittelt worden, welches in 3.2.3 beschrieben wurde. Die Distanz zwischen der optimalen und der ermittelten Linie beträgt 5.0443 Pixel.

4.2 Messgenauigkeit

Die Genauigkeit der Berechnung der Weltkoordinaten bestimmt wie erfolgreich das Messverfahren in seiner Gesamtheit funktioniert, da diese das angestrebte Endprodukt der Messung darstellen. Um diese Genauigkeit zu bestimmen, wurde für die vorliegende Implementierung die zu Eingang des Kapitels erwähnte schiefe Fläche zweimal vermessen: Einmal händisch um nötige Daten für die mathematische Beschreibung der Schrägen zu sammeln, und einmal mit dem Lichtschnittverfahren um diese Messung mit der händischen Messung zu vergleichen.

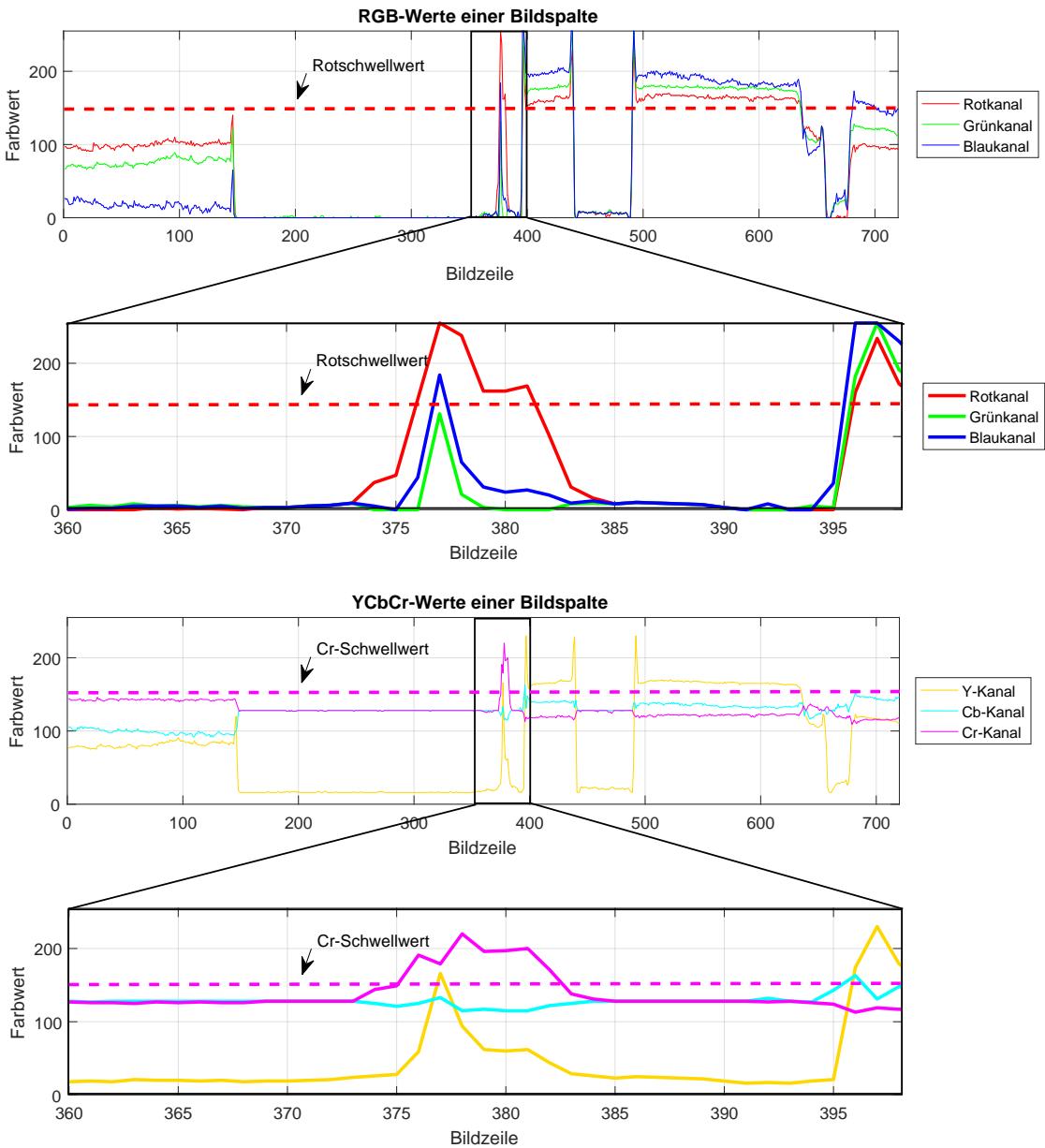


Abb. 4.1: Farbkanäle der 701. Bildspalte des oberen Bildes aus Abb. 3.5. Die vergrößerten Ausschnitte zeigen den Abschnitt genauer, auf dem sich die Laserlinie (die Bildzeilen von ca. 373 bis 383) befindet. Es ist zu erkennen, dass sich mit einem Minimalschwellwert im Rotkanal nicht alle Pixel außerhalb der Laserlinie aussortieren lassen: In den Bildzeilen von 500 bis ca. 650 sind zum Beispiel ebenfalls hohe Rotanteile. Die auf diese Weise nicht erfassten Pixel mit einem Maximalschwellwert im Blaukanal auszusortieren würde wiederum auch die Pixel im Laserlinien-Bereich aussortieren. Ähnliche Probleme ergeben sich im Grünkanal. Im Vergleich dazu lässt sich im Cr-Kanal ein treffender Minimalschwellwert im Cr-Kanal ansetzen, mit dem die Laserlinie in annähernd voller Breite segmentiert wird und dabei alle anderen Pixel in der Bildspalte ausschwärzt.

Durch die händische Messung lässt sich die Schräge mathematisch vergleichsweise einfach als eine durch vier Seiten begrenzte Ebene beschreiben und eignet sich daher zur Berechnung einer Metrik, mit der die Exaktheit des Verfahrens bewertet werden kann. Dafür wird für jede Weltkoordinate der kürzeste Abstand zur Ebene berechnet. Es wird immer der kürzeste Abstand zum jeweils nächsten Merkmal der Schräge ermittelt, also entweder zur Ebene an sich, zu einer der vier Seiten oder einer der vier Eckpunkte der Fläche. Anschließend wird das arithmetische Mittel dieser Abstände gebildet, um zu ermitteln, wie weit eine Koordinate im Durchschnitt von der eigentlichen Fläche entfernt ist. In 4.2 ist die gemessene Punktewolke der Schräge entgegengestellt. Gemessen wurden hier 2168 Punkte, welche im Durchschnitt 0.9083 Millimeter mit einer Standardabweichung $\sigma = 0.5360$ von der optimalen Schräge entfernt liegen.

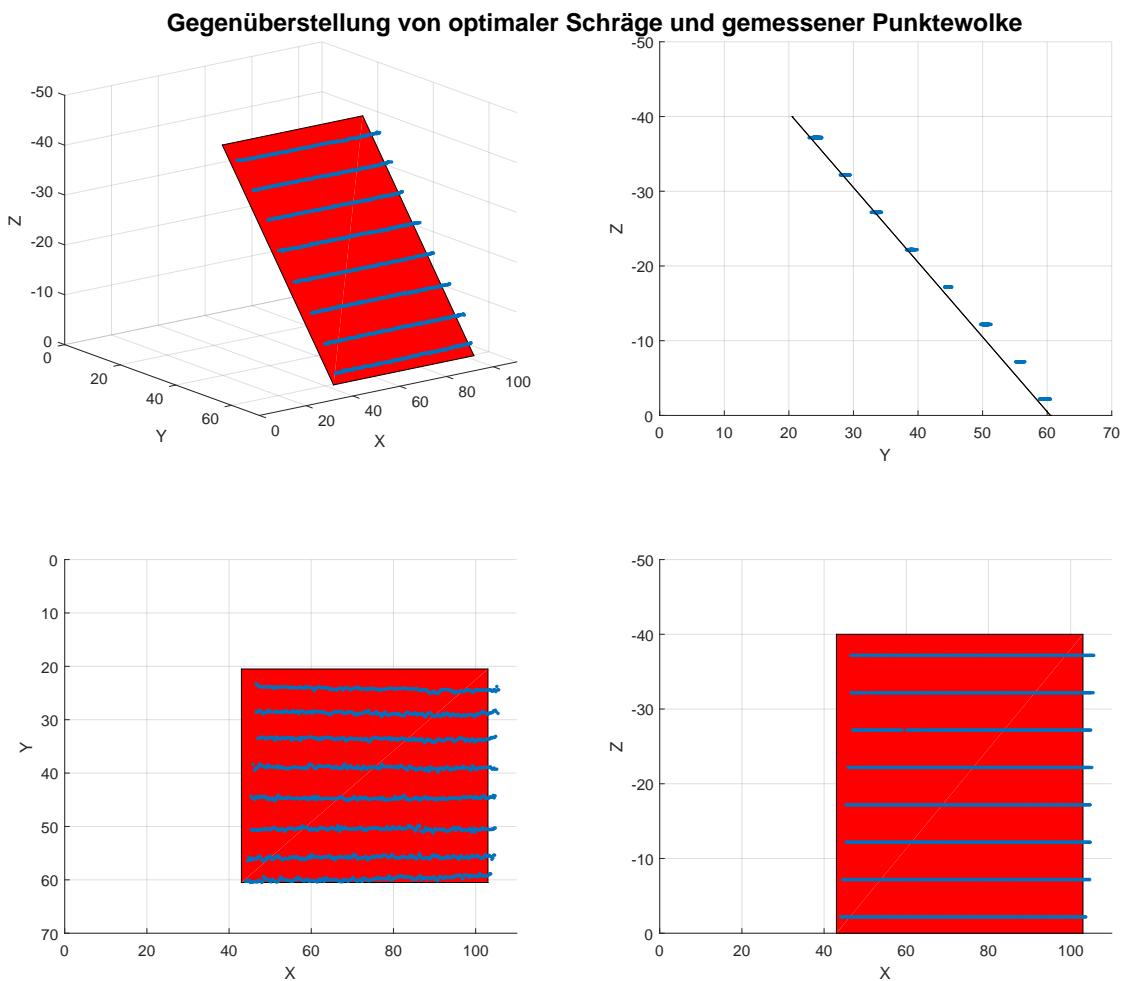


Abb. 4.2: Gegenüberstellung von optimaler Schräge und gemessener Punktewolke

Es ist auf der X-Y-Ebene zu sehen, dass die einzelnen vermessenen Punkte-Linien eine Schiefe aufweisen und nicht im perfekten rechten Winkel zur X-Achse stehen. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass der Laser in der Bildaufnahmen

nicht perfekt parallel zur Bodenebene steht. Als Resultat neigt sich auch auf den Bildern die Laserlinie mit einer minimalen Steigung, was den oben zu sehenden Effekt hervorbringt. Dies lässt sich vor allem mit erhöhter Sorgfalt während des Vermessens mildern, zeigt jedoch, dass Außeninflüsse im direkten Vergleich zu mathematisch optimalen Konstrukten selten zur Gänze zu vermeiden sind. Ein Problem des Verfahrens liegt ebenfalls in der Gefahr, dass die mathematische Beschreibung des Validierungsobjektes das Objekt idealer beschreibt als in der Realität abgebildet. Somit kann die Messung zu einem gewissen Grad niemals an die mathematische Beschreibung heran reichen und der Messung wird auf diese Weise „Unrecht getan“; sie wird also schlechter eingeschätzt als sie eigentlich ist. Dennoch kann bei genügender Sorgfalt der händischen Vermessung des Objektes damit gerechnet werden, dass die Metrik aussagekräftig ist. Auch wenn die verwendete Metrik nur für das simple Validierungsobjekte sprechen kann, wird davon ausgegangen dass sich das implementierte Verfahren für komplexere Objekte ähnlich genau verhält.

5

Fazit

Der Laserscanner, der für die vorliegend implementiert wurde, erfüllt seine Funktion zuverlässig: Innerhalb von wenigen Schritten kann ein Objekt abgetastet und mit einem vertretbaren Messfehler als dreidimensionale Punktewolke dargestellt werden. Auch bei weniger simplen Objekten kann so ein Modell erstellt werden, welches die Charakteristika des Gegenstandes in wiedererkennbarer Weise zuverlässig darstellt. In !BILD! sieht man beispielsweise eine Messung einer kleinen Statuette, welche einem Foto des originalen Objektes gegenübergestellt ist. Das Objekt lässt eindeutig wiedererkennen. Der nächste natürliche Schritt in der Verarbeitungspipeline wäre nun die Triangulation der Punktewolke um ein zusammenhängendes Mesh zu erhalten. Dies ist jedoch außerhalb des Zuständigkeitsbereichs der vorliegenden Ausarbeitung.

Einige Verbesserung wären für eine Verfeinerung des Verfahrens jedoch durchaus denkbar. Zum Einen bietet die Scannerkonstruktion an sich Raum für Verbesserung: Anstatt die gleichmäßige Abtastung der manuellen Einstellung zu überlassen, könnte ein Mechanismus ersonnt werden, der es einfacher macht, den Abstand zwischen Aufnahmen genau einzuhalten. Ebenfalls wäre hier die Möglichkeit wünschenswert kleinere Abstände während der Messung einzuhalten um so eine größere Dichte der Punktewolke zu erhalten. Während eine vollständige Automatisierung hier die beste Lösung darstellt (jedoch den Preis des Laserscanners zugleich erhöhen würde), ist ein Mechanismus wie zum Beispiel eine mechanische Schraube zum Einstellen des Abstandes möglich. Eine andere Erweiterungsmöglichkeit der Scannerkonstruktion stellt die Unterstützung von Messungen von mehr als einer Seite des Objekts dar. Dies würde es möglich machen, das gesamte Objekt als Punktewolke abzubilden. Am Berechnungsanteil des Verfahrens sind alternative Vorgehensweisen an einigen Stellen denkbar. So könnte zum Beispiel bei der Laserlinienerkennung statt mit einem globalen mit einem adaptiven Schwellwert gearbeitet werden, was zwar zu Lasten der Komplexität des Algorithmus' gehen würde, aber gegebenenfalls gute Ergebnisse liefern könnte.

Auch bei verbleibendem Potential für Verbesserung bietet der implementierte Scanner eine solide Basis zur weiteren Verfeinerung und erfüllt seine Designziele angemessen. Er erlaubt zuverlässige Messungen und demonstriert das Lichtschnittverfahren auf eine praktikable Art und Weise.

Literaturverzeichnis

- Ebr11. EBRAHIM, MOSTAFA A-B: *3D Laser Scanners: History, Applications and Future*, 2011.
Faculty of Engineering, Assiut University
https://www.researchgate.net/publication/267037683_3D_LASER_SCANNERS_HISTORY_APPLICATIONS_AND_FUTURE.
- Kow. KOWDLE, ADARSH: *Back projection - 2D points to 3D*.
<http://chenlab.ece.cornell.edu/people/adarsh/publications/BackProjection.pdf>.
- Kri07. KRIEGMAN, DAVID: *Homography Estimation*, 2007.
https://cseweb.ucsd.edu/classes/wi07/cse252a/homography_estimation/homography_estimation.pdf.
- Mata. *Single Camera Calibration App*.
Matlab Dokumentation <https://de.mathworks.com/help/vision/ug/single-camera-calibrator-app.html>.
- Matb. *What Is Camera Calibration?*
Matlab Dokumentation <https://de.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>.
- Rah. RAHMANN, BURKHARDT: *Kamerakalibrierung*.
Praktikum der Universität Freiburg https://lmb.informatik.uni-freiburg.de/lectures/praktika_brox/bvpraktikum/BVAnl_kam_kalib.pdf.
- rie16. *Riegl PH-4000/6000-SRH*, 2016.
Produktseite der Firma Riegl für einen Industrie-Scanner <http://www.riegl.com/nc/products/industrial-scanning/produktdetail/product/scanner/51/>.
- Sim. SIMEK, KYLE: *Dissecting the Camera Matrix*.
Artikelserie zur Kameramatrix <http://ksimek.github.io/2013/08/13/intrinsic/>.
- Sta. *Stack Overflow - How is the reprojection error calculated in Matlab's triangulate function?*
<http://stackoverflow.com/questions/29095349/how-is-the-reprojection-error-calculated-in-matlabs-triangulate-function-sadly>.

- Zha98. ZHANG, ZHENGYOU: *A Flexible New Technique for Camera Calibration.* Band 22, December 1998.
- Zol16. *Zoller + Fröhlich GmbH - Forensik*, 2016.
Webseite der Firma Zoller + Fröhlich, benutzen Laserscanner um Unfallorte zu vermessen http://www.zf-laser.com/Forensik.3d_laserscanning1.0.html.