

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	4
1 Einleitung.....	5
1.1 Laserprojektionssysteme .....	5
1.2 Zielsetzung.....	6
1.3 Übersicht .....	7
2 Grundlagen Strahlentherapie .....	9
2.1 Begriffserklärung .....	9
2.2 Bestrahlungsplanung .....	9
2.3 Bestrahlungsverfahren.....	11
2.4 APOLLO-Lasersystem.....	13
2.5 Justieren der Markierungslaser.....	14
3 Ausrichtung der Laserquellen im Raum .....	18
3.1 Definition des Begriffs „Laserkreuz“ .....	18
3.2 Die Parameter eines Laserkreuzes .....	18
3.3 Ausmessen der Parameter eines Laserkreuzes.....	21
3.3.1 Waagerechter/senkrechter Abstand und der Rotationswinkel .....	21
3.3.2 Waagerechter/senkrechter Neigungswinkel .....	23
3.3.3 Schwierigkeiten der Realisierung.....	25
3.3.4 Messungsverfahren mit drei Kameras.....	26
3.3.5 Vorgehensweise beim Ausrichten eines Laserprojektors.....	29
4 Hardwarekonzept .....	30
4.1 Gleichzeitige Aufnahme zweier Laserkreuze.....	30
4.2 Auswahl der Kameras.....	33
4.3 Optischer Filter .....	35
4.4 Strahlenspiegelungssystem.....	36
4.5 Gesamtaufbau der Justieranlage.....	38

---

5	Bildverarbeitung und Figurenerkennung .....	40
5.1	Laser als Lichtquelle .....	40
5.2	Bildeinzug.....	41
5.3	Figurenerkennung .....	42
5.3.1	Ansatz.....	42
5.3.2	OpenCV: Algorithmen für maschinelles Sehen und Bildverarbeitung .....	43
5.3.3	Konvertieren des Bildes in OpenCV-Format.....	43
5.3.4	Definition einer Figurenkontur .....	44
5.3.5	Binarisierung des Bildes .....	44
5.3.6	Rauschunterdrückung.....	45
5.3.7	Suche nach Figurenkonturen mit <i>cvFindContours()</i> .....	46
5.3.8	Verfahren zur Figurenerkennung, Zusammenfassung.....	49
5.4	Detektieren der Kreuzachsen.....	49
5.4.1	Ansatz.....	49
5.4.2	Achsenstützpunkte .....	50
5.4.3	Regressionsanalyse der Linienstützpunkte.....	54
5.4.4	Detektieren der Laserlinien, Zusammenfassung .....	56
6	Inbetriebnahme der Justieranlage .....	57
6.1	Grafische Benutzeroberfläche (GUI) .....	57
6.2	Anschließen der Kameras .....	58
6.3	Programmstart .....	59
6.4	Messen der Lage zweier Laserkreuze.....	60
6.5	Befehle für die Ansteuerung des Lasersystems .....	64
6.6	Kalibrieren der Kameras im „Phantom“ .....	65
6.6.1	Ausgleich der Fehler in Kameraausrichtung .....	65
6.6.2	Ermitteln der Position des Bereichsschnittpunktes in einem Kamerasensor .....	66
7	Struktur und Ablauf der Anwendersoftware .....	70
7.1	Entwicklungsumgebung und Programmiersprache.....	70
7.2	Softwaremodule.....	71
7.3	Datenstrukturen .....	73
7.4	Die Datei „CamData.xml“ .....	74
7.5	Programmablauf .....	75

8	Zusammenfassung.....	78
8.1	Fazit.....	78
8.2	Ausblick.....	80
	Literaturverzeichnis.....	82
	Anhang .....	85
	Anhang A1: Optische Verzerrungen in aufgenommenen Bildern .....	85
	Anhang A2: Generieren der Befehle für die Ansteuerung des Lasersystems.....	88
	Anhang A3: Ermitteln des Bereichsschnittpunktes eines Kamerasensors .....	92
	Anhang A4: Indizes der Kameraausrichtungen.....	97

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Justieren eines Lasermarkierungssystems mit einem Kunststoff-Phantom.	6
Abbildung 2-1: Markieren der Referenzpunkte.....	10
Abbildung 2-2: Markieren des Tumors .....	11
Abbildung 2-3: Bestrahlung eines Tumors aus verschiedenen Raumrichtungen.....	12
Abbildung 2-4: Bestrahlung mit einem Linearbeschleuniger .....	12
Abbildung 2-5: APOLLO-Lasersystem im Einsatz an einem Beschleuniger .....	13
Abbildung 2-6: Wilke-Phantom .....	15
Abbildung 2-7: Justieren eines APOLLO-Lasersystems mit Wilke-Phantom .....	16
Abbildung 3-1: Ein Referenzkreuz und eine "Messebene".....	19
Abbildung 3-2: Ein "Laserkreuz" im Raum, bezogen auf das "Referenzkreuz" .....	20
Abbildung 3-3: Bildaufnahme eines Laserkreuzes.....	22
Abbildung 3-4: Projektionen des Laserkreuzes an zwei "Messebenen" .....	24
Abbildung 3-5: Bildaufnahmen eines Laserkreuzes in verschiedenen Messebenen.....	25
Abbildung 3-6: Bildaufnahme eines Laserkreuzes (blau) mit drei Kameras .....	26
Abbildung 3-7: Ein Laserkreuz (blau) mit korrekt eingestelltem Rotationswinkel.....	28
Abbildung 4-1: Justiersystem mit separaten Bildsensoren.....	30
Abbildung 4-2: Justiersystem mit zusammengeführten Bildsensoren .....	32
Abbildung 4-3: Lichtübertragungsanteile der ND-Filter verschiedener Dichten.....	36
Abbildung 4-4: Spiegelung zweier entgegengesetzten Laserstrahlen um 90 Grad .....	37
Abbildung 4-5: Fertigungszeichnungen der Justieranlage und des Kameragehäuses.....	38
Abbildung 5-1: Strahlintensitätsverteilung, ideale Laserquelle (l.) und APOLLO-Laser (r.)	40
Abbildung 5-2: Beispielaufnahme zweier Laserkreuze, schematisch (l.), reell (r.).....	42
Abbildung 5-3: Binarisierte Aufnahme bei Schwellenwerten 25 (l.), 55 (m.) und 100 (r.)...	45
Abbildung 5-4: Vergrößerter Ausschnitt der binarisierten Bildaufnahme .....	45
Abbildung 5-5: Binarisieren des Bildes ohne (l.) und mit angewendetem Gauß-Filter (r.)	46
Abbildung 5-6: Quellbild mit eingezeichneten Konturlinien .....	47
Abbildung 5-7: Quellbild mit verschmolzenen Konturlinien .....	48
Abbildung 5-8: Quellbild mit eingefügtem "Sperrbereich" in der Bildmitte .....	49
Abbildung 5-9: Bildaufnahme eines Laserkreuzes im unteren Bildbereich.....	51
Abbildung 5-10: Die Stützpunkte senkrechter (gr.) und waagerechter (bl.) Kreuzachsen..	52
Abbildung 5-11: Stützpunktlinien mit entferntem Mittenbereich.....	53
Abbildung 5-12: Stützpunktlinien mit entfernten Mitten- und Spitzenbereichen .....	54
Abbildung 5-13: Bildaufnahme von zwei Kreuzen mit ermittelten Achsengeraden (grün)..	55
Abbildung 5-14: Beispiele der Liniendetektion zweier Laserkreuze .....	56
Abbildung 6-1: Programmtool zur Ansteuerung des "Phantoms", Hauptformular.....	57
Abbildung 6-2: Bildaufnahme zweier komplanarer Laserkreuze, Mittenbereich .....	60
Abbildung 6-3: Bildaufnahme zweier komplanarer Laserkreuze, waagerechte Achsen.....	62
Abbildung 6-4: Bildaufnahme zweier komplanarer Laserkreuze, senkrechte Achsen .....	63
Abbildung 6-5: Fehler der Positionierung der Pyramidenspiegel im "Phantom".....	63
Abbildung 6-6: Formular zur Ausgabe der Ansteuerungsbefehle.....	65
Abbildung 6-7: Ermitteln des Bereichsschnittpunktes mit zwei Laserstrahlen.....	67
Abbildung 6-8: Ausrichtung der Strahlungsquellen im Kalibrierungsmodus .....	68
Abbildung 7-1: Ablaufschema der Software für das "Optische Phantom".....	76

# 1 Einleitung

## 1.1 Laserprojektionssysteme

Die Firma LAP entwickelt und stellt laserbasierte Systeme her, die für die hochpräzise Projektion sowie zur berührungsfreien Messung verschiedener geometrischer Größen benutzt werden.

Die Laserprojektionssysteme von LAP sind in der Lage, die einfachen Formen wie Punkte, Linien, Kreuze sowie die beliebig geformte Umrisse (z. B. maßstabsgerechte Formen aus CAD-Daten) zu erzeugen. Die gut sichtbaren farbigen Laserlinien werden unter anderem in der Industrie genutzt, um Produkte oder Bauteile zu platzieren oder auszurichten.

Auch im Bereich Medizin finden die Laserprojektoren eine breite Verwendung. Sie werden in Computertomographie und Strahlentherapie eingesetzt, um im Rahmen der virtuellen Simulation bestimmte Bereiche und Positionen auf dem Körper des Patienten zu markieren<sup>12</sup>. Damit sollte vor allem die Behandlungsqualität verbessert werden, indem der Patient mit Hilfe dieser Markierungen auf dem Bestrahlungstisch für die Behandlung viel genauer ausgerichtet werden kann. Nähere Informationen zum Ablauf der Strahlentherapie sind im Kapitel 2 vorgestellt.

Bevor die Laserprojektionssysteme, die in der Regel aus mehreren Einzelprojektoren bestehen, überhaupt genutzt werden dürfen, müssen sie justiert werden. Das heißt die Strahlungen von allen Projektoren müssen aufeinander abgestimmt werden. Für diesen Zweck werden bislang die sogenannte „Phantome“ benutzt- die Justierkörper aus durchsichtigem Kunststoff, die nur eine durchschnittliche Genauigkeit von ungefähr  $\pm 500\mu\text{m}$  anbieten können (nähere Informationen zu „Phantomen“: siehe Kapitel 2).

---

<sup>1</sup> Vergl. Bogner, Seite 16

<sup>2</sup> Vergl. Klautke, Seite 36

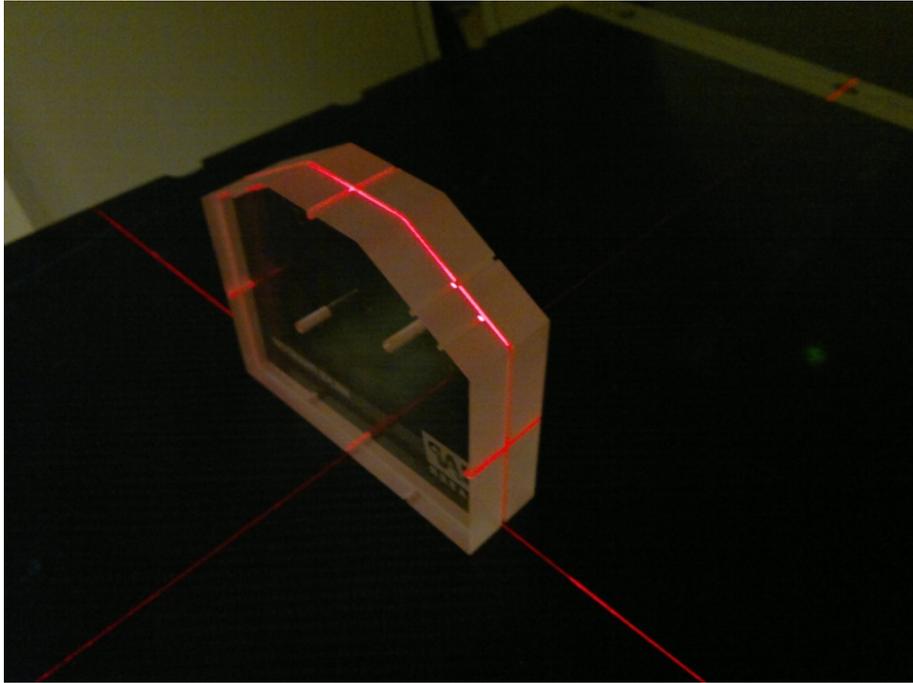


Abbildung 1-1: Justieren eines Lasermarkierungssystems mit einem Kunststoff-Phantom<sup>3</sup>

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer optisch-elektronischen Justieranlage, genannt „Optisches Phantom“, die die Unterstützung bei dem komplizierten Justieren von Laserprojektionssystemen mit höherer Präzision anbietet. Dieses Projekt soll eine erste Untersuchung zur Projektierung einer komplexeren Justieranlage sein, die die „Kunststoff-Phantome“ komplett ersetzt.

Das „Optische Phantom“, bestehend aus mehreren hochauflösenden digitalen Kameras, soll die Strahlung von jedem Laserprojektor erfassen und die Daten an einen Rechner übertragen, von dem dann die genauen Positionen und Ausrichtung der Laserlinien im Raum zueinander berechnet werden sollen.

Die Ansteuerung des „Phantoms“ sowie die Bildverarbeitung und das Bereitstellen von Messwerten soll in Echtzeit<sup>4</sup> realisiert werden. Dabei soll durch geeignete grafische Ausgaben dem Nutzer beim Justierverfahren ein Überblick über alle Laserlinien auch während der Ansteuerung der Laserprojektoren zur Verfügung gestellt werden.

Die Software, Bildverarbeitungsmethoden sowie die Kameras und weitere für das Projekt benötigte Hardware soll so konzipiert werden, dass die folgenden Anforderungen erfüllt sind:

---

<sup>3</sup> LAP Demoaufnahmen

<sup>4</sup> Bestimmte Ergebnisse müssen zuverlässig innerhalb einer vorbestimmten Zeitspanne geliefert werden

- Gleichzeitige Aufnahme der Strahlungen von allen Laserquellen
- Positionsbestimmung der Laserlinien mit der Genauigkeit von mindestens  $\pm 100\mu\text{m}$
- Grafische Programmoberfläche
- Steuerung des Programmablaufs durch die Software
- Ausgabe aller Informationen über die Positionen der Laserlinien (absolut und/oder zueinander) im Echtzeitmodus

### 1.3 Übersicht

Die Arbeit wird in acht Kapitel gegliedert.

In Kapitel 2 wird ein Überblick über die grundlegenden Prinzipien der Strahlentherapie vorgestellt. Insbesondere wird die Bedeutung von Lasersystemen beim CT<sup>5</sup>- und Strahlentherapieverfahren erläutert.

In Kapitel 3 werden die wichtigsten Laserlinienparameter untersucht, die die Ausrichtung eines Laserprojektionssystems im Raum beschreiben. Die ersten grundsätzlichen Überlegungen und mathematischen Ansätze zum Bestimmen der räumlichen Ausrichtung von Laserstrahlern werden vorgestellt.

Im vierten Kapitel werden die ersten Ansätze zur Realisierung des zu entwickelnden Justiersystems erarbeitet. Besondere Schwerpunkte liegen dabei bei der Auswahl der passenden Kameras und weiterer Optik sowie dem mechanischen Aufbau der Konstruktion.

Das Kapitel 5 umfasst einige Methoden der maschinellen Bildverarbeitung, anhand deren sich die Konturlinien einer Figur in einer Bildaufnahme erkennen lassen. Die erkannten Figuren dienen anschließend als Basis fürs Detektieren der Geraden, die ein aufgenommenes Laserkreuz eindeutig definieren. Unter anderem wird OpenCV vorgestellt- die freie Programmbibliothek der Algorithmen für Bildverarbeitung.

In Kapitel 6 wird auf die konkrete Realisierung des Justiersystems und Testen seiner Funktionalität eingegangen. Nach einer kurzen Übersicht über den Aufbau der Programmoberfläche werden die einzelnen Programmmodi zur Kalibrierung der „optischen Phantom“ und Durchführung des Justierverfahrens detailliert beschrieben. Ein Probeverfahren zum Justieren zweier Laserprojektoren wird durchgeführt. Anschließend wird die Vorgehensweise bei der Kalibrierung der Kameras im „Phantom“ erläutert.

Im siebten Kapitel wird ein kurzer Überblick über die Entwicklungsumgebung und Programmiersprache gegeben, die bei der Softwareentwicklung verwendet wurden. Der

---

<sup>5</sup> Abk. Computertomografie

Programmaufbau wird anhand der Beschreibung einzelner Softwaremodule detailliert vorgestellt. Anschließend wird auf die Programmablauf und Zusammenarbeit einzelner Programmblöcke eingegangen, wo die Kontrolle über parallelen Ablauf mehrerer Prozesse eine große Rolle spielt.

In Kapitel 8 werden die Aufgabestellungen noch einmal kurz skizziert und die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst. Ein Fazit über die realisierten und nicht realisierten Funktionalitäten sowie ein Ausblick auf die Problemlösungen und mögliche Erweiterungen werden gegeben.

## 2 Grundlagen Strahlentherapie

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die grundlegenden Prinzipien der Strahlentherapie vorgestellt. Insbesondere wird die Bedeutung von Lasersystemen beim CT- und Strahlentherapieverfahren erläutert.

### 2.1 Begriffserklärung

„**Strahlentherapie** (auch **Strahlenheilkunde**, **Radiotherapie**, **Radioonkologie**) ist das medizinische Fachgebiet, das sich mit der medizinischen Anwendung von ionisierender Strahlung auf den Menschen und auf Tiere beschäftigt, um Krankheiten zu heilen oder deren Fortschreiten zu verzögern.“<sup>6</sup>

Mit der Strahlentherapie werden die gut- und bösartigen Erkrankungen (Tumore u.a.) behandelt. Dazu werden Elektromagnetische- und Teilchenstrahlen verwendet. Durch deren Einfluss wird die Zellteilung gestört und somit das schnelle Wachstum von Krebsgewebe gebremst. Die Strahlung kann in der Zelle gespeicherte Erbfaktoren (Gene) so verändern, dass die Zelle ihre Teilungsfähigkeit verliert und stirbt.

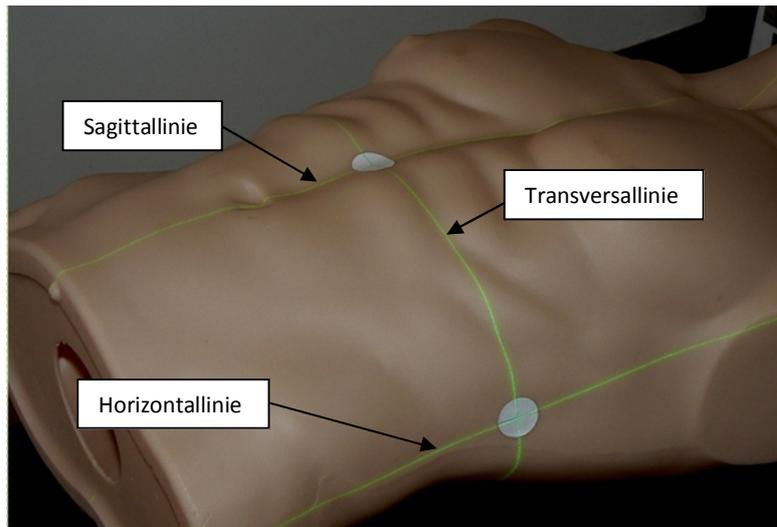
Die Behandlung wird von Fachärzten für Radiologie und Strahlentherapie unter Mitwirkung von medizinisch-technischen Assistenten (MTA) und spezialisierten Medizinphysikern durchgeführt. Doch es muss vorher dafür gesorgt werden, dass Bestrahlungsfehler weitgehend ausgeschlossen sind. Vor der Behandlung wird der Patient genauestens untersucht. Erst nachdem der optimale Strahlungswinkel und die Feldstärken für den Linearbeschleuniger bestimmt sind, kann das Bestrahlungsverfahren durchgeführt werden.

### 2.2 Bestrahlungsplanung

Bevor das eigentliche Bestrahlungsverfahren durchgeführt werden darf, muss der Patient, bei dem z.B. ein Tumor vorhanden ist, genauestens untersucht werden. Dazu wird die Computertomografie benutzt. Der Patient wird auf einem CT-Tisch gelagert und von mehreren Markierungslaser aus verschiedenen Richtungen am Körper bestrahlt (siehe Abb. 2-1).

---

<sup>6</sup> Zitat aus [www.wikipedia.de/Strahlentherapie](http://www.wikipedia.de/Strahlentherapie), Aufruf von 11.06.2013



**Abbildung 2-1: Markieren der Referenzpunkte<sup>7</sup>**

Auf der Abbildung 2-1 sind auf dem Patientenkörper-Modell drei Laserlinien deutlich zu sehen:

1. Sagittallinie, fällt frontal auf den Körper und durchläuft ihn von oben nach unten.
2. Horizontallinie, fällt seitlich auf den Körper und durchläuft ihn ebenfalls von oben nach unten.
3. Transversallinie, fällt frontal auf den Körper und durchläuft ihn von links nach rechts.

Die Stellen, wo sich die Laserlinien überschneiden, werden von dem Arzt mit speziellem röntgendichtem Marker gekennzeichnet. Dies sind die Referenzmarkierungen, die als Koordinatenursprung bei allen weiteren Untersuchungen dienen.

Anschließend erfolgt die CT-Untersuchung, bei der die genaue Lage und die Größe des Tumors ermittelt werden. Auch die Referenzmarkierungen werden von dem CT-Gerät erkannt, und die Position des Tumors bezüglich dieser Punkte wird berechnet. Wenn der Patient aus dem CT-Gerät wieder herausgefahren wird, muss er so positioniert werden, dass die Markierungen auf seinem Körper mit den Laserlinien des Markierungslasers übereinstimmen<sup>8</sup>.

Im nächsten Schritt wird eine virtuelle Simulation durchgeführt, bei der anhand einer 3D-Modellierung die Lage des Tumor-Mittelpunktes in Bezug auf die Körperoberfläche bestimmt wird. Zusätzlich werden die für die Bestrahlung benötigten Feldstärken und Bestrahlungswinkel berechnet.

<sup>7</sup> Entnommen aus LAP Manual CARINAsim

<sup>8</sup> Vergl. Bogner, Seite 16

Nachdem die Simulation abgeschlossen ist, zeigen die Markierungslaser den Tumormittelpunkt als Projektionen auf der Haut des Patienten. Diese Stellen werden dann von dem Arzt ebenfalls markiert, wie in der Abb. 2-2 schematisch dargestellt ist.



Abbildung 2-2: Markieren des Tumors<sup>9</sup>

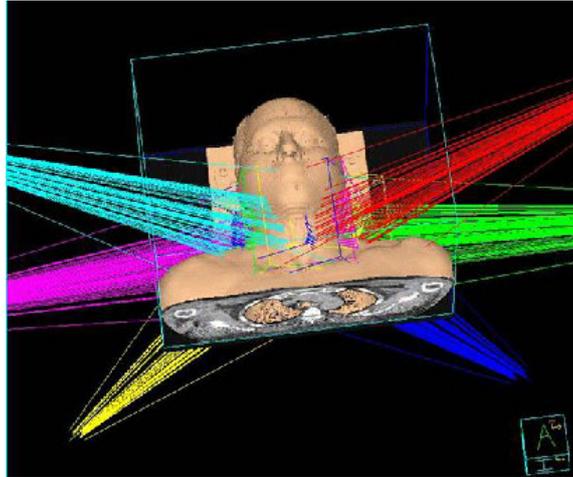
Nun wird der Patient an der Bestrahlungsmaschine positioniert und für die Behandlung vorbereitet. Beim Platzieren des Patienten ist zu beachten, dass die sich an der Bestrahlungsmaschine befindlichen Markierungslaser genau die Stellen der Haut des Patienten kennzeichnen, die vom CT-Markierungssystem im vorherigen Schritt bestimmt wurden. Diese Markierungen dienen dem Arzt bei der Bestrahlung als Orientierungspunkte.

### 2.3 Bestrahlungsverfahren

Nachdem der Patient auf dem Bestrahlungstisch gelagert und korrekt ausgerichtet ist, kann die eigentliche Behandlung beginnen.

Die Hauptaufgabe der Bestrahlungsmaschine besteht darin, eine möglichst hohe Strahlungsdosis auf die Tumorzellen zu übertragen, gleichzeitig soll das umliegende gesunde Gewebe so gering wie möglich bestrahlt werden. Dies wird dadurch erreicht, dass der von Erkrankung betroffene Bereich mehrmals aus verschiedenen Richtungen bestrahlt wird (schematische Darstellung siehe Abb. 2-3).

<sup>9</sup> Entnommen aus LAP Manual CARINAsim



**Abbildung 2-3: Bestrahlung eines Tumors aus verschiedenen Raumrichtungen<sup>10</sup>**

Die Bestrahlungsmaschine wird so konstruiert, dass die bewegliche Strahlungsquelle frei um den Patienten rotieren kann (siehe Abb.2-4). Die benötigten Drehwinkel und Feldstärken werden von dem Simulationsrechner bestimmt und vom Medizinphysiker kontrolliert.

Bei diesem Verfahren wird der Tumor insgesamt mehrmals pro Behandlung bestrahlt und das gesunde Gewebe, das die Strahlung ebenfalls absorbiert, bekommt nur einmalig eine vergleichsweise geringe Strahlungs-dosis und wird somit geschont.



**Abbildung 2-4: Bestrahlung mit einem Linearbeschleuniger<sup>11</sup>**

Um das Risiko der falschen Behandlung möglichst gering zu halten, muss die Intensität der Strahlendosis innerhalb eines Bestrahlungsfeldes exakt an das zu behandelnde

<sup>10</sup> Entnommen aus <http://www.strahlentherapie.uk-wuerzburg.de/fachinformation/behandlungstechniken-und-technische-hilfsmittel/intensitaetsmodulierte-strahlentherapie-imrt.html> (Stand 12.06.2013)

<sup>11</sup> Entnommen aus [http://www.ruhrnachrichten.de/leben/gesundheit\\_und\\_wellness/gesundheits/Aufklaerung-mindert-Angst-vor-Strahlentherapie](http://www.ruhrnachrichten.de/leben/gesundheit_und_wellness/gesundheits/Aufklaerung-mindert-Angst-vor-Strahlentherapie) (Stand 12.06.2013)

Zielvolumen angepasst werden. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass einige besonders empfindliche innere Organe überhaupt nicht bestrahlt werden dürfen. So wird die Strahlentherapie für jeden Patienten individuell angepasst.

### 2.4 APOLLO-Lasersystem

Wie bereits erwähnt, werden für die Markierungen insgesamt drei Laserlinien benutzt (Sagittal-, Transversal- und Horizontallinie). Eine Markierung wird dabei durch das Kreuzen zweier Linien realisiert. Um alle drei Linien ununterbrochen auf dem Patientenkörper anzeigen zu können, werden mehrere Laserprojektoren benötigt, die den Patienten aus verschiedenen Richtungen bestrahlen.

Firma LAP bietet mehrere Laserprojektionssysteme an. Für diese Arbeit wurde das APOLLO-Markierungssystem ausgewählt. Zu dessen Vorteilen gehören vor allem die Einfachheit und Bequemlichkeit der Bedienung, breiter Einstellungsbereich und Möglichkeit der schnellen und flexiblen Systemanpassung.

Das APOLLO-System wird in der Abbildung 2-5 schematisch dargestellt. Es besteht aus insgesamt vier Laserprojektoren, die an den Wänden und auf der Decke des CT- oder Bestrahlungsraumes einmontiert sind (siehe Abb. 2-5).

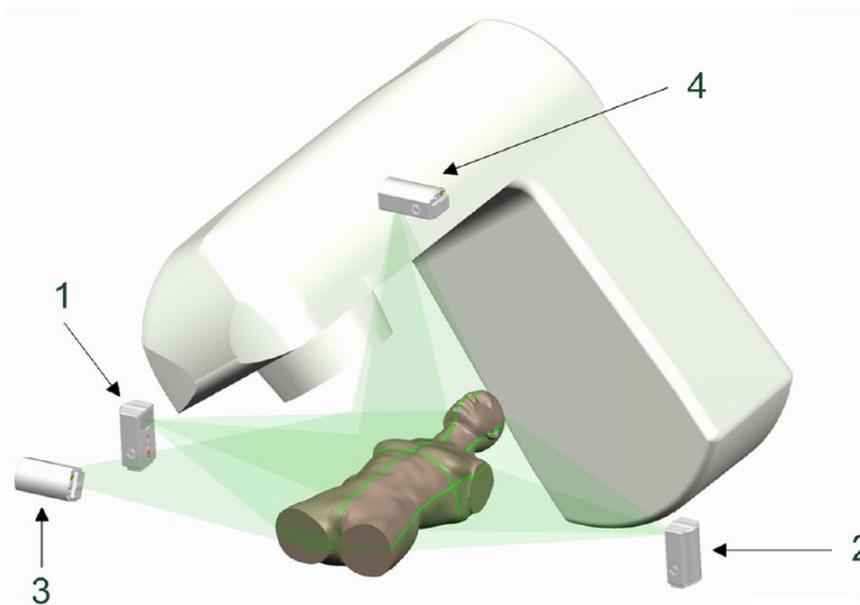


Abbildung 2-5: APOLLO-Lasersystem im Einsatz an einem Beschleuniger<sup>12</sup>

Jedes Gerät projiziert nicht eine einfache Linie, sondern ein Kreuz - zwei Linien im Winkel von 90 Grad. In der Abbildung 2-5 ist zu sehen, dass die „Laserkreuze“ der Projektoren 1 und 2 zusammen die rechten und linken Hälften der Transversal- und Horizontallinie

<sup>12</sup> Entnommen aus LAP Manual CARINAsim

bilden, während die Projektoren 3 und 4 den oberen Transversalliniensegment und die Sagittallinie formen.

**In dieser Arbeit soll der komplette Verlauf des Justierverfahrens am Beispiel der Projektoren 1 und 2 des APOLLO-Lasersystems untersucht werden (siehe Abb. 2.5). Das Justieren von den restlichen Lasern sollte prinzipiell auf gleiche Weise funktionieren.**

Heutzutage werden die APOLLO-Projektoren in drei Ausführungen gefertigt, die sich in der Wellenlänge der Laserausstrahlung unterscheiden und somit die Linien in verschiedenen Farben produzieren. Es gibt „rote“ (Wellenlänge: 635 nm), „grüne“ (Wellenlänge: 532 nm) und „blaue“ (Wellenlänge: 450 nm) Lasermodule<sup>13</sup>. Wie es sich im weiteren Arbeitsverlauf beim Betrachten der Bildaufnahmen herausgestellt hatte, sind bei den APOLLO BLUE Modulen die besten Ergebnisse erreichbar, da sie zusammen mit den für die Arbeit ausgewählten Kameras die Aufnahmen mit höchstem Kontrast liefern. Aus diesem Grund werden alle weiteren Untersuchungen mit diesen Modulen durchgeführt.

Die Laserprojektoren des APOLLO-Systems werden manuell über eine Infrarot-Fernbedienung auf ihr Ziel eingestellt. Insgesamt fünf Parameter der projizierten „Laserkreuze“ lassen sich verstellen: die senkrechte und waagerechte Bewegung, senkrechte und waagerechte Neigung und Rotation<sup>14</sup>. Alle Verstellparameter werden im Kapitel 3 näher betrachtet und erläutert. Die weiteren mathematischen Ansätze und Berechnungen zur Positionsbestimmung sowie der Softwareentwurf werden ebenfalls für die Anwendung an diese Parameter angepasst.

### **2.5 Justieren der Markierungslaser**

Die ungenaue Positionierung des Markierungslasers am CT-Tisch führt dazu, dass die von der Computertomografie bereitgestellten Informationen falsch interpretiert werden. Als Folge werden bei nächsten Schritten die falschen Körperbereiche bestrahlt. Dabei wird der Tumor verfehlt und dem Patienten wird erheblicher Schaden zugefügt.

Um diese Situation ausschließen zu können, muss das Markierungssystem regelmäßig geprüft und neu justiert werden.

Wie bereits erklärt wurde, sind die Markierungslinien auf dem Patientenkörper aus mehreren Teillinien, projiziert von verschiedenen Laserquellen, zusammengesetzt. Damit diese Linien an jedem Patient trotz seines individuellen Körperbaus ununterbrochen verlaufen, muss jeder Projektor exakt auf die restlichen Projektoren des Systems

---

<sup>13</sup> Vergl. LAP APOLLO\_inst-oper-manual\_MAN-1019-rev-6-de, ab Seite 34

<sup>14</sup> Vergl. LAP APOLLO\_2011-07-26\_en\_single

ausgerichtet werden, so dass alle gestrahlten Laserlinien an jedem Ort miteinander übereinstimmen. Wird die komplette Strahlung eines Linienlasers<sup>15</sup> im Raum als eine „Laserebene“ betrachtet, heißt es, dass die „Laserebenen“ von allen Projektoren in derselben Ebene liegen oder komplanar sind. Für den „Kreuzlaser“ des APOLLO-Systems gilt das gleiche Prinzip: die beiden orthogonalen<sup>16</sup> Laserebenen müssen mit den entsprechenden gekreuzten Laserebenen von den restlichen Projektoren übereinstimmen.

Die Justierung in den CT-Räumen wird aktuell mit sogenannten „Phantomen“ durchgeführt. Es sind mehrere Ausführungen der „Phantome“ bekannt. Hier soll als Beispiel das Funktionsprinzip des „Wilke-Phantom“ vorgestellt werden, die anderen „Phantom“-Modelle funktionieren ungefähr nach demselben Prinzip.

Das Wilke-Phantom besteht aus einem durchsichtigen Kunststoff mit zwei Bohrungen, einer seitlich umlaufenden Nut und weiteren diversen Nuten auf den Seiten (siehe Abb. 2-6).

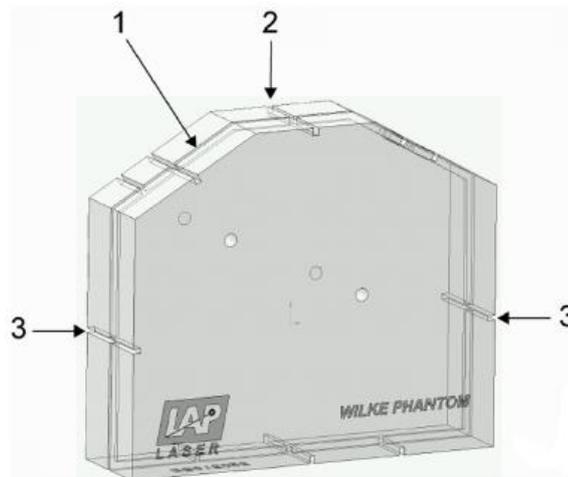


Abbildung 2-6: Wilke-Phantom<sup>17</sup>

- |  |
|--|
| <p>1 – Umlaufende Nut für die Transversallinie<br/>2 – Nut für die Sagittallinie<br/>3 – Nut für die Horizontallinie</p> |
|--|

Bei dem Justierverfahren muss das Wilke-Phantom mittels einer Wasserwaage exakt senkrecht auf dem CT-Tisch ausgerichtet werden. Danach wird es von den

<sup>15</sup> Eine Laserquelle, deren Strahlung in der Projektion eine gerade Linie ist

<sup>16</sup> Die Ebenen, die senkrecht zueinander stehen

<sup>17</sup> Entnommen aus LAP APOLLO\_inst-oper-manual\_MAN-1019-rev-6-de

Markierungslasern bestrahlt. Dabei muss jede Laserlinie genau durch die entsprechende Nut verlaufen (vgl. Abb. 2-1).

Als nächstes wird das Wilke-Phantom in die Computertomografie-Anlage geschoben und eingescannt. Auf der Bildaufnahme werden dann alle Abweichungen in Ausrichtung des Wilke-Phantoms verglichen zur Sollausrichtung sichtbar, und notwendige Korrekturen werden durchgeführt.

Allerdings hat dieses Verfahren eine Schwachstelle: die Entscheidung, ob die Laserlinien in die Nuten passen, wird von einem Assistenten getroffen, der den Justierkörper mit bloßem Auge betrachtet (siehe Abb. 2-7). Aus diesem Grund kann die Genauigkeit der Justierung mit Wilke-Phantom die theoretische Grenze von  $\pm 500\mu\text{m}$  nicht übersteigen.



**Abbildung 2-7: Justieren eines APOLLO-Lasersystems mit Wilke-Phantom<sup>18</sup>**

Außerdem kann es zu Beobachtungsfehlern durch den Menschen kommen, die folgende Situationen bewirken:

- Ein oder mehrere Laserprojektoren werden falsch justiert. Damit wird die Genauigkeit des gesamten Projektionssystems herabgesetzt.
- Die Bauelemente und die Gehäuse der Laserprojektoren erhitzen sich während des Betriebes. Infolge der Temperaturänderungen sowie der anderen Faktoren, wie z.B. die mechanischen Vibrationen der Gehäuse, entstanden durch Lüfter, verstellen sich die Projektoren mit der Zeit und das System muss neu eingestellt werden. Wenn der Operator diese Verstellung nicht bzw. zu spät wahrgenommen hat, bleibt das System fehlerhaft justiert und liefert falsche Ergebnisse bei der Patientenpositionierung.

<sup>18</sup> Entnommen aus LAP APOLLO\_2011-07-26\_en\_single

Ein automatisiertes Justierverfahren könnte diese beiden Situationen komplett ausschließen, indem die Laserstrahlungen von Projektoren ununterbrochen elektronisch beobachtet werden und im Falle einer falschen Justierung zumindest ein entsprechendes Signal an den Operator gesendet wird. Im nächsten Schritt wäre auch möglich, vollautomatische Justiersysteme zu bauen, die die Lasersysteme ohne die Beteiligung von Menschen justieren und überwachen können.

### 3 Ausrichtung der Laserquellen im Raum

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Laserlinienparameter untersucht, die die Ausrichtung eines Laserprojektionssystems im Raum beschreiben. Die ersten grundsätzlichen Überlegungen und mathematischen Ansätze zum Bestimmen der räumlichen Ausrichtung von Laserstrahlern werden vorgestellt.

#### 3.1 Definition des Begriffs „Laserkreuz“

Für diese Arbeit werden die Lasermodule des APOLLO-Systems eingesetzt, deren Strahlung in der Projektion auf eine Ebene mit sich „ein Kreuz“ darstellt, bestehend aus zwei Geraden, die sich unter dem rechten Winkel kreuzen. Unter dem Begriff „Laserkreuz“ wird im weiteren Text nicht nur diese Projektion, sondern die komplette Strahlung eines solchen Laserprojektors im Raum gemeint.

Eine direkte Bildaufnahme dieser Strahlung lässt sich entweder als „ein Kreuz“ darstellen oder aber als ein Teil dieses Kreuzes - die Gerade, die senkrechte/waagerechte Kreuzachse.

#### 3.2 Die Parameter eines Laserkreuzes

Ein „Laserkreuz“ wird von zwei „Laserebenen“ gebildet, die senkrecht zueinander stehen. Die Lagen von diesen geometrischen Ebenen im Raum können eindeutig definiert und beschrieben werden, indem deren Bezug auf die sogenannten Referenzebenen betrachtet wird.

In der Theorie wäre eine Referenzebene für die Positionsbestimmung völlig ausreichend, um nur eine der beiden Laserebenen bemessen zu können - der Winkel zwischen ihr und einer anderen Laserebene ist bekannt. Doch in der Praxis kann es vorkommen, dass eine oder sogar beide Laserebenen durch die optischen Verzerrungen verfälscht aufgenommen sind und der Kreuzwinkel nicht mehr 90 Grad ist. Die Lage ist noch dadurch erschwert, dass es nicht bekannt ist, welche der Ebenen verzerrt ist. Dieser Fehler ist erst dann überhaupt bemerkbar, wenn die Informationen über die beiden Laserebenen verfügbar sind. Deswegen werden für die Messung mindestens zwei Referenzebenen benötigt, jeweils eine für die senkrechte und waagerechte Laserkreuzachse. Die Referenzebenen sind virtuell und können frei ausgewählt werden, zum Beispiel wie folgt:

- Die waagerechte Referenzebene, verläuft parallel zur Horizontlinie, lässt sich mit herkömmlichen technischen Geräten (z.B. Wasserwaage-Systemen) leicht ausmessen.

- Die senkrechte Referenzebene, schneidet die waagerechte Referenzebene unter dem Winkel von 90 Grad.

Die beiden Referenzebenen bilden somit ebenfalls ein „Referenzkreuz“, dessen Achsen dann mit allgemein benutzten Koordinatenebenen übereinstimmen und als Referenzen für die Achsen des zu messenden „Laserkreuzes“ in jedem beliebigen Ort des Raumes benutzt werden können.

Ergänzend wird zum Gesamtbild noch eine weitere virtuelle Ebene hinzugefügt, die senkrecht zu beiden Referenzebenen steht, genannt „Messebene“. In dieser Ebene wird die Bildaufnahme des zu untersuchenden Laserkreuzes erfolgen, gleichzeitig stellen die Projektionen der Referenzachsen die Koordinatensystemachsen dar (vgl. Abbildung 3.1, Koordinatenachsen Y und Z). Innerhalb dieses Koordinatensystems können einige Parameter des Laserkreuzes gemessen werden.

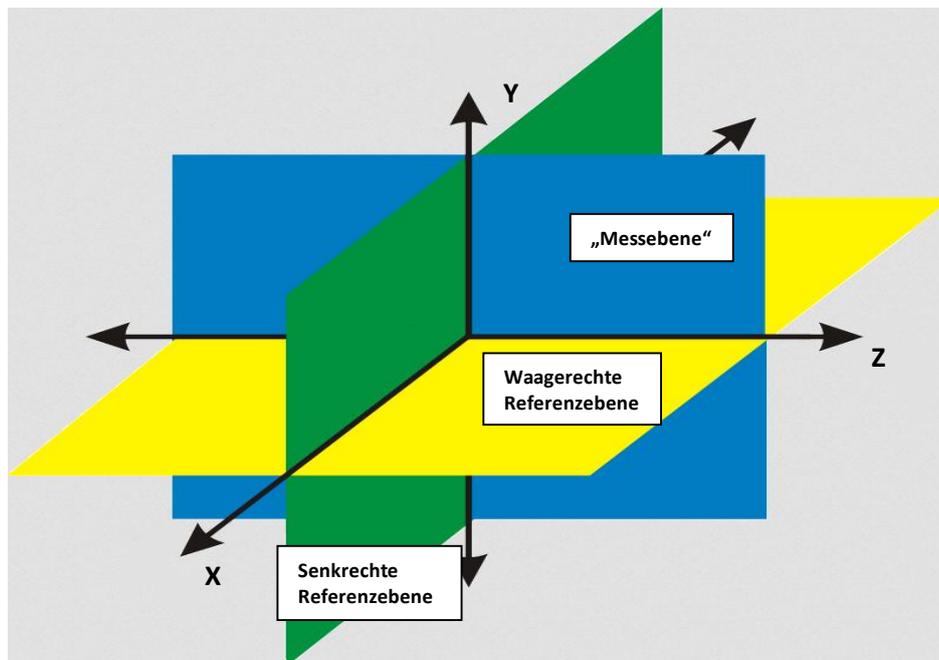
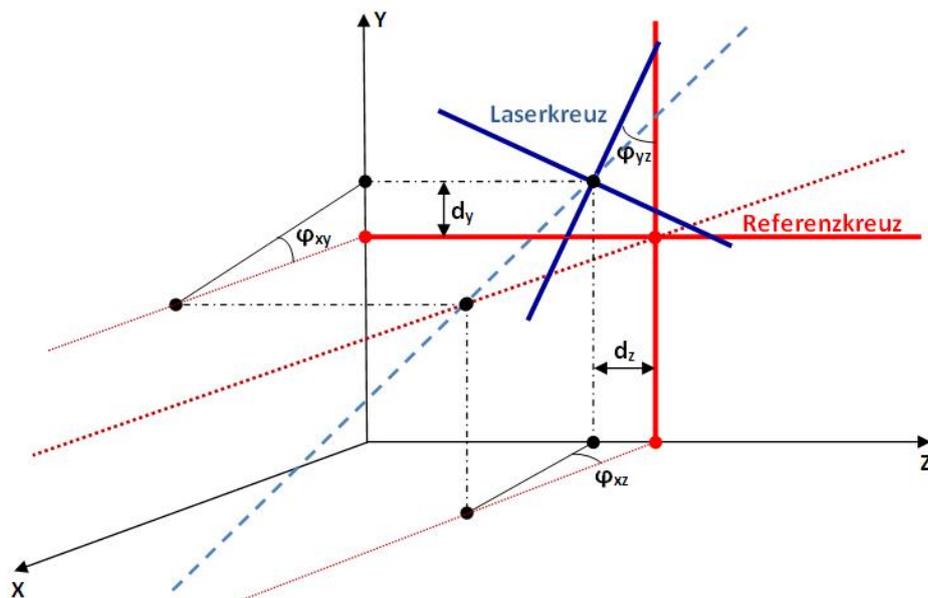


Abbildung 3-1: Ein Referenzkreuz und eine "Messebene"

In der Abbildung 3-2 ist ein Referenzkreuz zusammen mit einem beliebig ausgerichteten Beispiel-Laserkreuz schematisch dargestellt. Folgende wichtige Parameter des Laserkreuzes, bezogen auf das Referenzkreuz, lassen sich anhand der Abbildung veranschaulichen:

1. Der senkrechte Abstand zwischen den Kreuzmitten von Laserkreuz und Referenzkreuz  $d_y$  (im weiteren Text als „**Senkrechter Abstand**“ bezeichnet) wird in der „Messebene“ YZ direkt gemessen und lässt sich bei den APOLLO-Projektoren durch den Befehl „MOVE UP/DOWN“ einstellen.

2. Der senkrechte Abstand zwischen den Kreuzmitten von Laserkreuz und Referenzkreuz  $d_z$  (im weiteren Text als „**Waagerechter Abstand**“ bezeichnet) wird in der „Messebene“ YZ direkt gemessen und lässt sich bei den APOLLO-Projektoren durch den Befehl „MOVE UP/DOWN“ einstellen.
3. Der Kippwinkel des Laserkreuzes bezogen auf das Referenzkreuz  $\varphi_{yz}$ , (im weiteren Text als „**Rotationswinkel**“ bezeichnet) wird ebenfalls in einer „Messebene“ YZ direkt gemessen und lässt sich bei den APOLLO-Projektoren durch den Befehl „ROTATE LEFT/RIGHT“ einstellen.
4. Der Kippwinkel  $\varphi_{xy}$  (im weiteren Text als „**Senkrechter Neigungswinkel**“ bezeichnet) ist als Projektion auf YZ-Koordinatenebene erkennbar und lässt sich bei den APOLLO-Projektoren durch den Befehl „TILT UP/DOWN“ einstellen.
5. Der Kippwinkel  $\varphi_{xz}$  (im weiteren Text als „**Waagerechter Neigungswinkel**“ bezeichnet) ist als Projektion auf YZ-Koordinatenebene erkennbar und lässt sich bei den APOLLO-Projektoren durch den Befehl „TILT UP/DOWN“ einstellen.



**Abbildung 3-2: Ein "Laserkreuz" im Raum, bezogen auf das "Referenzkreuz"**

Mit diesen fünf Parametern lässt sich jedes Laserkreuz im Raum beschreiben und wird eindeutig definiert. Daraus ergeben sich folgende weitere Möglichkeiten zur Strahlungsausmessung, die als Methoden zum Justieren von Lasermodulen eingesetzt werden:

- Wenn die absolute Lage der Referenzebenen im Raum bekannt ist, kann auch die absolute Lage des Laserkreuzes gemessen werden.

- Die Ausrichtungen von mehreren Laserkreuzen zueinander lassen sich bestimmen, indem deren Parameter bezüglich derselben Referenzebenen gemessen und dann miteinander entsprechend verglichen werden.

Die beiden Methoden werden für das Justieren des zu untersuchenden APOLLO-Projektor-Paares (Projektoren 1 und 2, vgl. Abb. 2-5) eingesetzt, denn es werden folgende Vorschriften an korrekt justierte Projektoren von LAP vorgeschrieben<sup>19</sup>:

- Die Laserkreuz-Achsen von beiden Projektoren müssen exakt parallel/senkrecht zur Horizontlinie verlaufen (wird aktuell mit Wilke-Phantom und Wasserwaage eingestellt) (1)
- Die projizierten Kreuze der Laser müssen ineinander fallen (Komplanarität) (2)

Folgende Vorgehensweise bei dem Justieren mit elektronischer Anlage wäre bei dieser Messung denkbar:

1. Auswahl der passenden Referenzebenen. Um die erste Vorschrift zu befolgen, ist es sinnvoll, eine Referenzebene zu nehmen, die parallel zum Horizont liegt, und eine Ebene, die zu ihr senkrecht steht.
2. Ausmessen der beiden Laserkreuze
3. Direkter Vergleich der jeweiligen Laserkreuzparameter. Sind diese Parameter identisch oder liegen die Abweichungen innerhalb des erlaubten Wertes, können die Laserkreuze als komplanar ausgerichtet betrachtet werden.

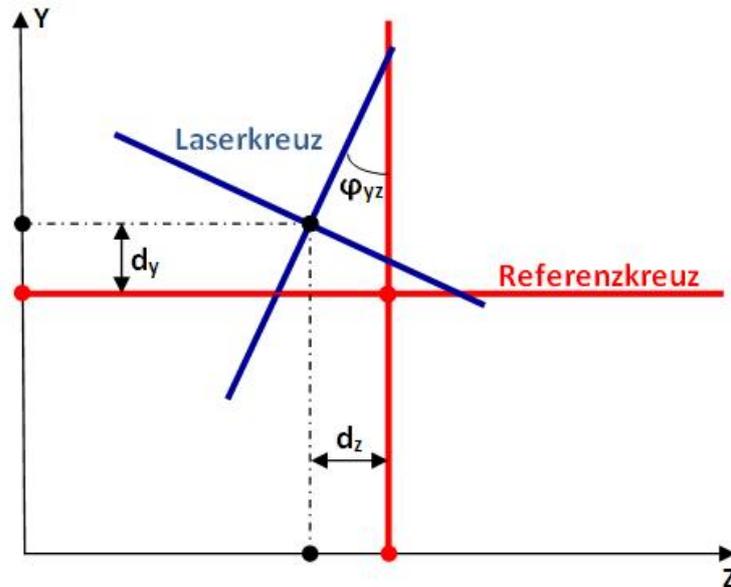
### 3.3 Ausmessen der Parameter eines Laserkreuzes

#### 3.3.1 Waagerechter/senkrechter Abstand und der Rotationswinkel

Um ein Laserkreuz ausmessen zu können, muss die Laserstrahlung zuerst an einer bestimmten Position von einer Kamera optisch aufgenommen werden. Für die Aufnahme und folgenden Berechnungen ist die Kameraposition am besten geeignet, wo der Mittelpunkt des Kreuzes zu sehen ist. In diesem Fall ist der Winkel zwischen den Kreuzachsen direkt zu messen. Wird die Kamera so platziert, dass ihr Sensor mit der „Messebene“ übereinstimmt und somit senkrecht zu den Referenzebenen steht (vgl. Abb. 3-1), kann man das in Abbildung 3-3 dargestellte schematische Bild erhalten. Auf dieser Aufnahme sind drei Größen des Laserkreuzes definierbar: waagerechter und senkrechter Abstand und der Rotationswinkel.

---

<sup>19</sup> Vergl. LAP APOLLO\_inst-oper-manual\_MAN-1019-rev-6-de, ab Seite 78



**Abbildung 3-3: Bildaufnahme eines Laserkreuzes**

Der waagerechte Abstand  $d_z$  und senkrechte Abstand  $d_y$  sind direkt messbar. Dafür müssen die Mittelpunkte des Referenz- und Laserkreuzes senkrecht auf die Koordinatenachsen Z und Y projiziert werden, und die Abstände zwischen jeweiligen Projektionen in der Koordinatenachse ausgemessen werden.

Der Rotationswinkel  $\varphi_{yz}$  kann auf zwei verschiedene Weisen gemessen werden: als Schneidwinkel zwischen den senkrechten Referenz- und Laserebenen oder zwischen den waagerechten Referenz- und Laserebenen. Idealerweise müssen die beiden Werte übereinstimmen, da die Kreuzachsen von beiden Kreuzen sich unter dem rechten Winkel schneiden. Doch es kann wegen den optischen Verzerrungen in der Bildaufnahme zu Abweichungen kommen. Aus diesem Grund werden beide Winkel berechnet und später verglichen.

Die jeweiligen Kreuzachsen können annähernd als Geraden betrachtet werden<sup>20</sup>, sie können also mit der allgemeinen Geradengleichung

$$y = mx + b \quad (3-1)$$

eindeutig beschrieben werden. Der Parameter m hat eine geometrische Bedeutung als Steigung der Geraden. Der entsprechende Steigungswinkel wird wie folgt berechnet:

$$\alpha = \arctan m \quad (3-2)$$

<sup>20</sup> Vergl. LAP APOLLO\_inst-oper-manual\_MAN-1019-rev-6-de, ab Seite 34

Der Steigungswinkel einer Geraden ist der Winkel zwischen ihr und der waagerechten Koordinatenachse (Achse Z in der Abb. 3-3). Der Schneidewinkel zweier Geraden kann durch die Berechnung der Differenz der Steigungswinkel von Kreuzachse und Referenzkreuzachse bestimmt werden:

$$\varphi_{yz} = \alpha_r - \alpha_k \quad (3-3)$$

wobei  $\alpha_r$  der Steigungswinkel der Referenzkreuzachse und  $\alpha_k$  der Steigungswinkel der Kreuzachse ist.

Für die waagerechten Kreuzachsen wird die Gleichung 3-3 in vereinfachter Form benutzt, da der Winkel  $\alpha_r = 0$  Grad:

$$\varphi_{yz} = \alpha_k \quad (3-4)$$

**Ausnahme.** Die Formel 3.1 kann an jeder beliebigen Gerade angewendet werden, solange sie nicht den Steigungswinkel von 90 Grad hat, denn dann wird der Parameter m unendlich groß, was für die Implementierung der Berechnungsalgorithmen an einem Rechner nicht zulässig ist. Dieser Fall trifft bei der senkrechten Achse des Referenzkreuzes auf. Um die Geradengleichung 3.1 auch hier anwenden zu können, wird folgende Transformation durchgeführt:

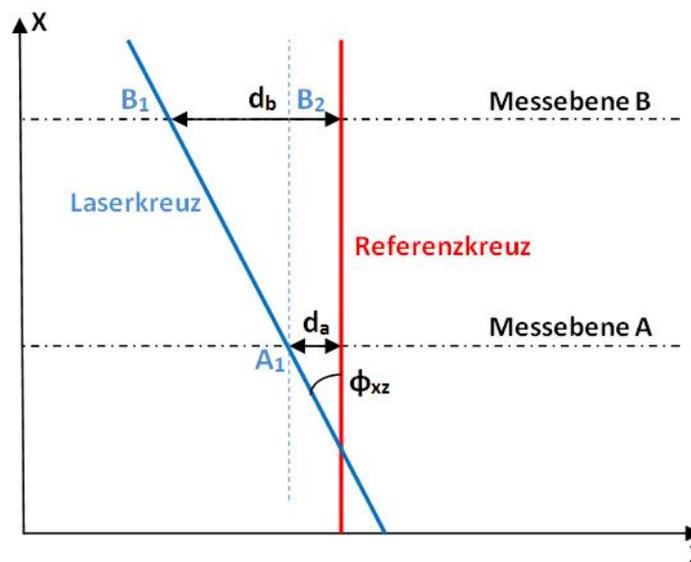
1. Die senkrechten Kreuzachsen von beiden Kreuzen werden in ihrem eigenen Koordinatensystem betrachtet, separat von den waagerechten Kreuzachsen.
2. In diesem neu definierten Koordinatensystem werden die waagerechte und senkrechte Koordinatenachse vertauscht.
3. Nun hat die senkrechte Referenzkreuzachse den Steigungswinkel von 0 Grad und kann innerhalb des entsprechenden Koordinatensystems mit der Gleichung 3-1 beschrieben werden.

Als Folge dieser Transformation hat die senkrechte Referenzkreuzachse die Steigung von 0 und die Gleichungen 3-1 bis 3-4 können auch hier verwendet werden.

### 3.3.2 Waagerechter/senkrechter Neigungswinkel

Das in der „Messebene“ aufgenommene Bild stellt mit sich eine flache Kopie des Laserkreuzes dar und enthält keine Informationen über die räumlichen Neigungswinkel  $\vartheta_{xy}$  und  $\vartheta_{xz}$  (vgl. Abb. 3-2 und Abb. 3-3).

Um ein Kreuz räumlich betrachten zu können, wird mindestens eine weitere Bildaufnahme von einem anderen Ort benötigt. Für diese Aufnahme wird das auf der Abbildung 3-1 dargestellte System um eine weitere „Messebene“ ergänzt, die parallel zur primären „Messebene“ steht. Das ergänzte System wird nun von oben (entlang der Y-Achse) betrachtet (siehe Abb.3-4). Zur besseren Anschaulichkeit werden nur die Projektionen der Kreuzmittelpunkte angezeigt.



**Abbildung 3-4: Projektionen des Laserkreuzes an zwei "Messebenen"**

Aus diesem Blickwinkel ist die waagerechte Neigung des Laserkreuzes deutlich zu erkennen. Die Projektionen auf die Messebenen A und B unterscheiden sich deutlich. Der waagerechte Neigungswinkel  $\varphi$  lässt sich aus dem rechtwinkligen Dreieck  $A_1B_1B_2$  durch trigonometrische Formel berechnen:

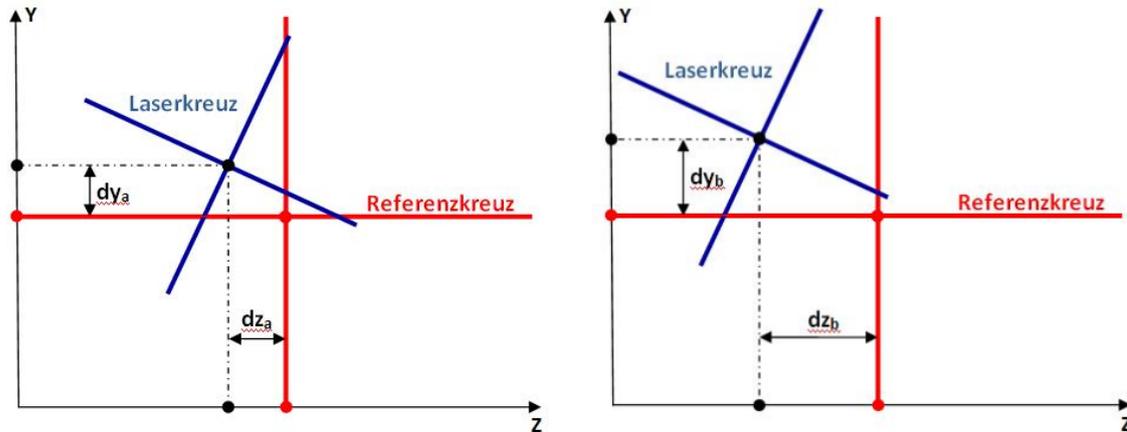
$$\varphi_{xz} = \arctan \frac{B_1B_2}{A_1B_2} \quad (3-5)$$

Die Seite  $A_1B_2$  des Dreiecks ist der senkrechte Abstand zwischen den Messebenen A und B. Der Abstand  $A_1B_1$  lässt sich als Differenz der Abstände  $d_a$  und  $d_b$  berechnen.

Auf gleiche Weise wird der senkrechte Neigungswinkel bestimmt, dafür müssen die Projektionen des Laserkreuzes entlang der Koordinatenachse Z betrachtet werden.

Die möglichen Bildaufnahmen des Kreuzes in beiden Messebenen sind in der Abbildung 3-5 schematisch dargestellt. Der Aufnahmeort ist so ausgewählt, dass sich die beiden Referenzebenen genau im Mittelpunkt des Bildes schneiden. Für die Berechnung des waagerechten Neigungswinkels werden die Abstände  $dz_a$  und  $dz_b$ , des senkrechten

Neigungswinkels- die Abstände  $dy_a$  und  $dy_b$  benötigt, die den entsprechenden Bildaufnahmen direkt entnehmbar sind.



**Abbildung 3-5: Bildaufnahmen eines Laserkreuzes in verschiedenen Messebenen**

### 3.3.3 Schwierigkeiten der Realisierung

Beim näheren Betrachten wird klar, dass die fotografische Aufnahme des Mittelbereichs eines Laserkreuzes mit zwei Kameras zum gleichen Zeitpunkt so wie es in Kapitel 3.3 vorgeschlagen wurde, technisch nicht realisierbar ist. Der Grund dafür liegt an der Tatsache, dass die dem Laserstrahler am nächsten liegende Kamera die ganze Strahlung absorbiert und die Sicht der anderen Kamera komplett verdeckt. Um das Laserkreuz trotzdem aus den zwei verschiedenen Messebenen aufzunehmen, kann eine der folgenden Methoden bei der Entwicklung der Justieranlage benutzt werden:

1. Es wird nur eine Kamera verwendet, die die Aufnahmen in beiden Messebenen macht. Nach der ersten Bildaufnahme wird die Kamera in die andere Messebene mit dem motorischen Antrieb gefahren, wo anschließend das zweite Bild aufgenommen wird. Diese Methode hat folgende Vorteile:
  - Es wird nur eine Kamera gebraucht.
  - Die vereinfachten Berechnungsalgorithmen.

Es ist aber auch mit folgenden Nachteilen zu rechnen:

- Die Realisierung ist mit hohen Kosten der mechanischen Antriebe verbunden.
- Die Genauigkeit der Justieranlage wird durch mechanisch bewegte Teile deutlich herabgesetzt.
- Die Anlage selbst sollte regelmäßig überprüft und nachjustiert werden.

- Abnutzung der mechanischen Bauteile.
2. Die Kamera der Messebene B wird innerhalb der Messebene entlang einer der Referenzkreuzachsen soweit verschoben, bis ihre Sicht durch die erste Kamera nicht mehr beeinträchtigt ist. Da die verschobene Kamera jetzt in der Lage ist, nur eine von beiden Kreuzachsen aufzunehmen, wird eine weitere Kamera benötigt, die die andere Kreuzachse aufnimmt und sich ebenfalls in der Messebene B befindet (siehe Abb. 3-6).

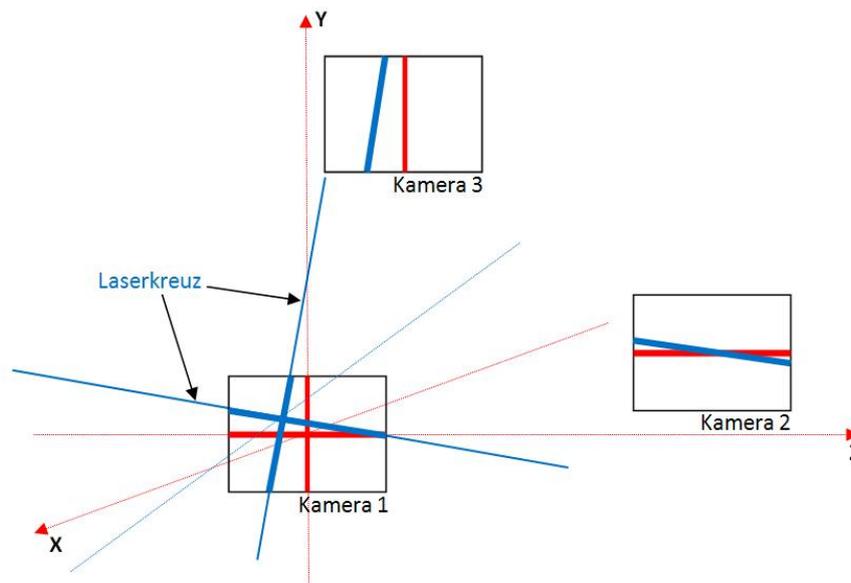


Abbildung 3-6: Bildaufnahme eines Laserkreuzes (blau) mit drei Kameras

Bei dieser Methode sind folgende Vorteile ergreifbar:

- Keine mechanischen Bauteile werden verwendet.
- Die Gesamtkosten der Anlage werden reduziert.
- Die Justieranlage muss nicht regelmäßig nachjustiert werden.
- Keine Software-Implementierung der Antriebsansteuerung wird benötigt.

Ein klarer Nachteil ist die deutlich angestiegene Komplexität der Algorithmen für die Bildverarbeitung von drei Aufnahmen und Kreuzparameterbestimmung. Die Firma LAP hat sich aber für den Einsatz dieser Methode entschieden und die weitere Vorgehensweise wird darauf basieren.

### 3.3.4 Messungsverfahren mit drei Kameras

In der Abbildung 3.6 ist eine Bildaufnahme eines Laserkreuzes mit drei Kameras vorgestellt. Gemäß der im Unterkapitel 3.3.4 beschriebenen Methode befindet sich die Kamera 1 in der Messebene A und nimmt den Mittelbereich des Laserkreuzes auf, wo der

Schneidepunkt der Kreuzachsen sichtbar ist. Wie früher erwähnt wurde, ist diese Kamera zur besseren Anschaulichkeit so ausgerichtet, dass der Schneidepunkt der Referenzachsen sich genau in der Bildmitte befindet. Später in der Praxis wird getestet, ob solche präzise Ausrichtung überhaupt realisierbar ist.

Kamera 2 nimmt die waagerechte Kreuzachse in der Messebene B auf und ist seitlich der Kamera 1 positioniert. Die beiden Kameras befinden sich auf der gleichen Höhe, es ist in der Abbildung 3.6 daran zu erkennen, dass die waagerechte Referenzachse die beiden Kamerasensoren genau in der Mitte durchläuft, so dass sich die Mittelpunkte von beiden Sensoren in gleicher waagerechter Ebene befinden.

Kamera 3 wird für die Aufnahme der senkrechten Kreuzachse benötigt. Sie befindet sich ebenfalls in der Messebene B und ist in die senkrechte Richtung bezüglich der Kamera 1 verschoben. Analog zur Kamera 1 befindet sich ihr Sensormittelpunkt auf der senkrechten Referenzachse.

Bei solcher Ausrichtung der Kameras sind die folgenden Parameter des Kreuzes direkt der Aufnahme von Kamera 1 entnehmbar: waagerechter/senkrechter Abstand und Rotationswinkel (siehe Kapitel 3.3.1). Außerdem sind die gleichen Rotationswinkel für einzelne Achsen in den Bildaufnahmen von Kamera 2 und 3 zu finden<sup>21</sup>. Diese Eigenschaft kann bei der Softwareentwicklung benutzt werden, um alle Kameras bezogen aufeinander zu kalibrieren.

Komplizierter ist das Bestimmen der zwei verbleibenden Neigungswinkel. Für die Berechnung wird der senkrechte und waagerechte Abstand zwischen den beiden Kreuzmittelpunkten in beiden Messebenen benötigt (siehe Kapitel 3.3.2), doch nur in der Messebene A sind diese direkt messbar (siehe Abb. 3-6). Prinzipiell lassen sich die jeweiligen Abstände auch in der Messebene B unter dem Einsatz der trigonometrischen Formeln rechnerisch bestimmen. Dafür werden unter anderem auch einige weitere Parameter der künftigen Justieranlage benötigt, wie die Abstände zwischen den Kamerasensoren und die Größe ihrer Nutzfläche, was diese Berechnungen noch komplizierter und unübersichtlicher macht.

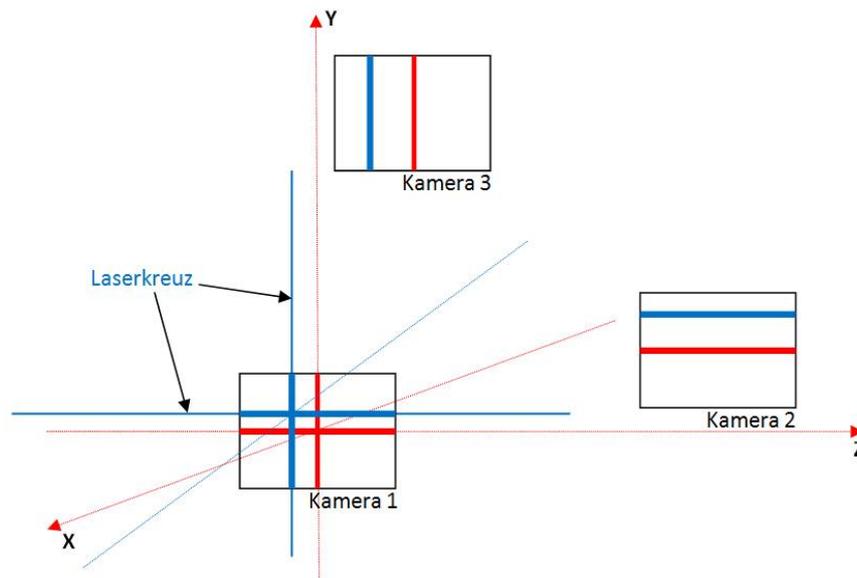
An dieser Stelle kann ein Ausweg genommen werden, der die Berechnungen von Neigungswinkel ohne Einfügen von weiteren Parameter und Größen ermöglicht. Dafür muss das Funktionsprinzip der zu entwickelnden Justieranlage und das Vorgehen bei dem Justierverfahren eines Laserkreuzes genauer untersucht werden.

---

<sup>21</sup> Wegen der Parallelität der Messebenen A und B

Gemäß den Vorschriften von LAP<sup>22</sup> muss die waagerechte Ebene des Laserkreuzes eines APOLLO-Projektors bei der korrekten Ausrichtung parallel zur Horizontlinie (und damit auch parallel zur waagerechten Referenzebene) stehen. Das bedeutet, dass alle drei Neigungswinkel schließlich gleich 0 Grad sein müssen. Stehen die beiden Ebenen parallel zueinander, bleibt es nur noch den Abstand zwischen ihnen anzupassen, damit die Justierung komplett ist. Jeder Neigungswinkel lässt sich separat über eine Fernbedienung ansteuern, dabei ist es nicht prinzipiell wichtig, welcher Winkel als erstes eingestellt ist.

Da der Rotationswinkel ohne weiteren Aufwand direkt messbar ist, wird dieser als erster eingestellt. Bei korrekter Einstellung werden die Bildaufnahmen rauskommen, bei denen die waagerechte und senkrechte Laserkreuzachsen parallel zu jeweiligen Referenzachsen sind (siehe Abb. 3.7).



**Abbildung 3-7: Ein Laserkreuz (blau) mit korrekt eingestelltem Rotationswinkel**

Beim Betrachten der Aufnahmen von Kamera 2 und 3 stellt man fest, dass die Abstände zwischen beiden Linien im jeweiligen Bild an allen Stellen gleich sind und können somit direkt abgelesen werden. Diese stimmen dann mit den jeweiligen Abständen zwischen beiden Kreuzmittelpunkten überein (wegen der Parallelität der Kreuzachsen). Damit wird schließlich die Berechnung von waagerechten/senkrechten Neigungswinkeln ermöglicht (siehe Kapitel 3.3.2).

<sup>22</sup> Vergl. LAP APOLLO\_inst-oper-manual\_MAN-1019-rev-6-de, ab Seite 78

### 3.3.5 Vorgehensweise beim Ausrichten eines Laserprojektors

Anhand der vorher beschriebenen Methode zur Erkennung der Lage eines Laserkreuzes, lässt sich die folgende Vorgehensweise für das Justieren eines Laserstrahlers bezogen auf zwei Referenzebenen zusammenfassen:

1. Die Justieranlage wird so ausgerichtet, dass die Sensormittelpunkte der Kamera 1 und 2 sich in der waagerechten Referenzebene befinden, während die Sensormittelpunkte der Kameras 1 und 3 in der senkrechten Referenzachse liegen (vgl. Abb. 3-6).
2. Der Laserprojektor wird so ausgerichtet, dass das Laserkreuz von allen drei Kameras sichtbar ist. Dabei wird der Kreuzmittelpunkt von Kamera 1 aufgenommen.
3. Zuerst wird der Rotationswinkel auf 0 Grad korrekt eingestellt.
4. Als nächstes werden der waagerechte und senkrechte Neigungswinkel nacheinander auf 0 Grad eingestellt.
5. Anschließend werden der senkrechte und waagerechte Abstand angepasst.

Auf Grundlage dieses Prinzips kann jeder Projektor eines Lasersystems justiert werden, indem ihm ein entsprechendes Referenzkreuz zur Verfügung steht, das durch die Lage der Kameras in einer Justieranlage definiert ist. Wie bereits in Kapitel 2.4 erwähnt, wird diese Abschlussarbeit mit zwei Projektoren durchgeführt, die bezogen auf den CT-Tisch (wo sich vermutlich die Justieranlage befinden wird) sich genau in entgegengesetzten Richtungen befinden (vgl. [Abb. 2-5](#)). Ein Grund für solche Auswahl ist die Tatsache, dass bei den beiden Projektoren für die Justierung dieselben Referenzachsen benötigt werden. Das bedeutet, sie können gleichzeitig mit derselben Justieranlage ausgerichtet werden, ohne diese zu verstellen.

Für die gleichzeitige Bildaufnahme zweier Laserkreuze muss die Konstruktion des Justiersystems passend entworfen werden. Die entsprechenden Anpassungen müssen auch an Kameras und ggf. an anderer Hardware vorgenommen werden. Die Möglichkeiten der Realisierung des Systems werden im nächsten Kapitel genauer angesehen und untersucht.

## 4 Hardwarekonzept

Im vierten Kapitel werden die ersten Ansätze zur Realisierung des zu entwickelnden Justiersystems erarbeitet. Besondere Schwerpunkte liegen dabei bei der Auswahl der passenden Kameras und weiterer Optik sowie dem mechanischen Aufbau der Konstruktion.

### 4.1 Gleichzeitige Aufnahme zweier Laserkreuze

Wie im letzten Kapitel ausführlich diskutiert wurde, werden für die Bestimmung der Lage jedes Laserkreuzes dessen Bildaufnahmen an drei verschiedenen Stellen im Raum benötigt. Da die beiden zu messenden Kreuze schließlich komplanar ausgerichtet werden müssen, so dass ihre Achsen in denselben Ebenen liegen, wird für das Justieren nur ein einzelnes Referenzkreuz benötigt. Die drei Kameras, die für das jeweilige Laserkreuz zuständig sind, müssen sich in den entsprechenden Referenzebenen befinden. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass die Laserprojektoren aus entgegengesetzten Richtungen strahlen und die Kameras, die sich in gleicher Referenzebene befinden, können sich nicht gegenseitig die Sicht versperren. Es gibt mehrere Möglichkeiten, das System zu realisieren.

1. Die Kameras fürs Ausmessen eines Projektors werden nahe dem anderen Projektor platziert (siehe schematische Darstellung in der Abb. 4-1).

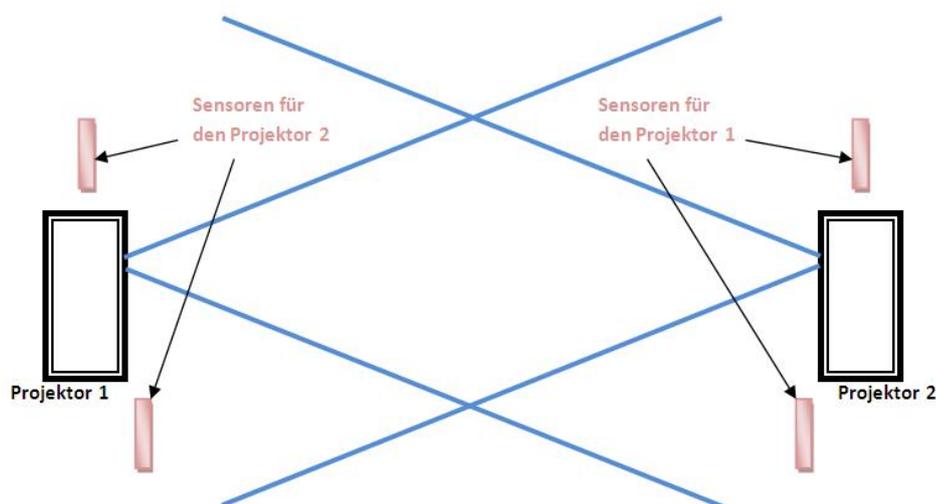


Abbildung 4-1: Justiersystem mit separaten Bildsensoren

Bei diesem Aufbau fallen die mittleren Bildsensoren komplett aus, denn sie würden sich gegenseitig stören. Die anderen Sensoren befinden sich an nahe dem jeweiligen Projektor, so dass sie nicht in seiner Strahlung stehen. Im Kapitel 3 wurde erläutert, dass für die Ausmessung eines Laserkreuzes die Aufnahmen in

verschiedenen senkrechten Messebenen benötigt werden, aus diesem Grund sind die Sensoren eines Paares zueinander verschoben. In der Abbildung 4-1 sind nur die Sensoren für die senkrechte Kreuzachse dargestellt. Die waagerechten Sensoren werden nach dem gleichen Prinzip positioniert. Neben dem Vorteil, dass für diese Konstruktion keine weitere Optik benötigt wird, gibt es aber folgende Nachteile:

- Es werden mindestens acht Sensoren benötigt (vier für jedes Kreuz), die schließlich alle an ein Rechner angeschlossen werden. Dafür wird weitere Hardware (Kabel, Switches usw.), und eine höhere Rechenleistung benötigt, was die Gesamtkosten der Anlage anhebt.
- Damit für beide Laserkreuze dieselbe Referenzebene festgelegt wird, müssen alle Sensoren exakt aneinander ausgerichtet werden. Für das Einmontieren der Sensoren und ihrer Justierung werden weitere komplexe technische Maßnahmen benötigt, die bei dem Einsatz der Justieranlage an einem anderen Ort komplett wiederholt werden müssen. Die Mobilität der Justieranlage ist damit deutlich beeinträchtigt.

Das Ziel dieser Abschlussarbeit ist die Entwicklung einer Justieranlage, die nach weiterer Ausarbeitung in der Lage ist, die herkömmlichen „Kunststoff-Phantome“ komplett zu ersetzen. Das heißt, die Anlage muss erstens möglichst klein sein (idealerweise auf dem CT-Tisch platzierbar sein, genau wie das Wilke-Phantom) und zweitens über eine gewisse Mobilität verfügen, damit sie bei verschiedenen Laserprojektionssystemen eingesetzt werden könnte. Das eben beschriebene System entspricht nicht diesen Anforderungen und wird somit nicht weiter behandelt.

2. Die Kameras fürs Ausmessen eines Projektors werden mit den jeweiligen Kameras für den anderen Projektor in ein System zusammengefügt (siehe Abb. 4-2).

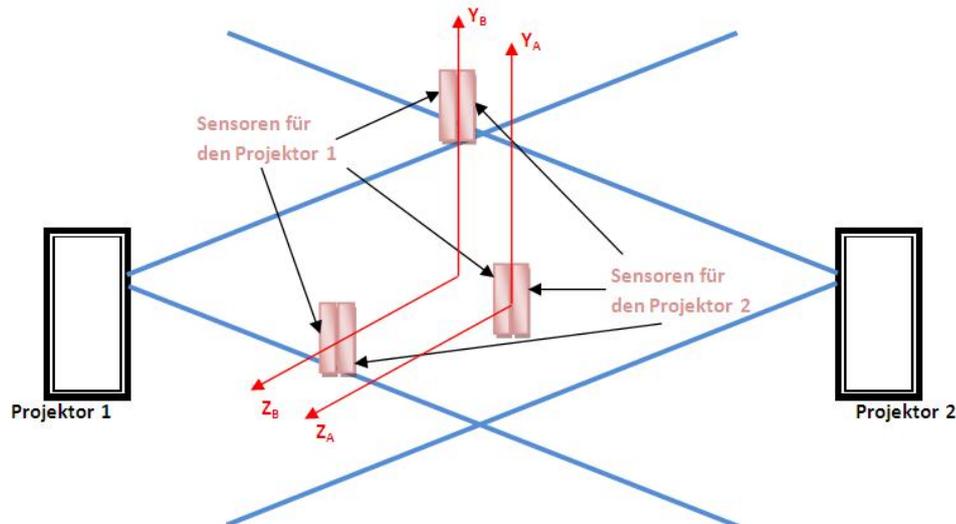


Abbildung 4-2: Justiersystem mit zusammengeführten Bildsensoren

In diesem System sind die Bildsensoren mit den Rückseiten aneinander angebracht, so dass sie sich nicht gegenseitig die Sicht sperren. Für diesen Aufbau werden insgesamt sechs Sensoren benötigt. Im Unterschied zur vorher angesehenen Konstruktion kann diese Anlage prinzipiell beliebig klein ausgelegt werden, wenn die zwei Messebenen möglichst dicht aneinander gewählt sind. Andererseits, je weiter die Messebenen voneinander liegen, desto größer sind die Differenzen zwischen dem Referenzkreuz und gekipptem Laserkreuz, der Neigungswinkel kann also genauer berechnet werden.

Auch hier müssen die Sensoren in jedem Paar exakt aufeinander abgestimmt werden, so dass ihre Chipflächen direkt übereinander liegen. Dieses Justierverfahren ist ebenfalls mit einigen technischen Schwierigkeiten verbunden, doch es muss nur einmal bei dem Zusammenbau durchgeführt werden, danach können die Sensoren z.B. zusammenverklebt werden und bleiben auf weiteres stabil. Anschließend können alle drei Sensor-Paare auf einem massiven Gerüst an vorher definierten Stellen so befestigt werden, dass sie zusammen zwei Referenzebenen bilden. Danach können sie nicht verstellt werden und brauchen somit nicht neu ausgerichtet zu werden. Beim Einsatz an einem neuen Laserprojektionssystem wird das gesamte Gerüst nur einmal justiert, was viel weniger Aufwand ist, als jedes Sensoren-Paar einzeln zu justieren.

Der Nachteil dieser Konstruktion ist ebenfalls eine hohe Anzahl von benötigten Sensoren, was mit höherem Rechenaufwand verbunden ist.

3. Für die Aufnahme zweier Laserstrahlen aus entgegengesetzten Richtungen werden anstatt drei Sensor-Paaren drei einzelne Kameras mit dem geeigneten

Optik/dem geeigneten Spiegelsystem an den jeweiligen Stellen eingesetzt. Die Aufgabe der Optik besteht darin, die Laserstrahlen so zu brechen/zu spiegeln, dass jede Kamera gleichzeitig die Aufnahmen von beiden Laserkreuzen erhält. Prinzipiell ist dieser Aufbau mit dem vorher vorgestellten System ähnlich, mit dem Unterschied, dass für den Aufbau nur drei anstatt sechs Kameras benötigt werden. Als Folge fallen die Anforderungen an Rechenleistung und Gesamtkosten der Anlage. Allerdings ist die Robustheit des Systems wegen des Einsatzes von Optik herabgesetzt. Ein weiterer Nachteil ist die Notwendigkeit, die Sensoroberfläche zu teilen, damit zwei Laserstrahlen auf einmal aufgenommen werden, ansonsten können sie später bei der Linienerkennung nicht getrennt und zugeordnet werden. Als Folge wird folglich der Verstellbereich für jedes Laserkreuz deutlich verkleinert.

Dem letzten Systemkonzept wurde von Firma LAP zugestimmt und die zu entwickelnde Justieranlage wird ausschließlich auf ihm basieren. Im Weiteren wird dieses Konzept detailliert vorgestellt und untersucht.

### 4.2 Auswahl der Kameras

Bereits am Anfang dieser Arbeit stand fest, dass bei dem zu entwickelndem „optischen Phantom“ drei digitale Kameras mit einem CMOS<sup>23</sup>-Sensor und USB<sup>24</sup>-Schnittstelle eingesetzt werden.

Im Vergleich zu anderen Sensortypen können bei CMOS-Sensoren höhere Datenraten erreicht werden<sup>25</sup>, was bei der Echtzeitbildverarbeitung vorteilhaft ist. Andererseits ist der „Blooming-Effekt“<sup>26</sup>, der bei besonders hellen, überbelichteten Stellen des aufgenommenen Bildes auftreten kann, von CMOS-Sensoren stark begrenzt. Das bietet ebenfalls einen klaren Vorteil bei der Aufnahme von so starken Lichtquellen wie die Laserlinien.

Eine USB-Schnittstelle liefert die Daten und Strom für die Kamera über dasselbe Kabel, was die Gesamtanzahl der benötigten Kabel reduziert und für die Übersichtlichkeit bei dem Anschließen der Anlage sorgt. Allerdings dürfen laut der USB-Spezifikation die Kabellängen ohne Anschluss von USB-Switches oder Verstärker 5 Meter nicht übersteigen. Für die zu konstruierende Anlage ist diese Begrenzung völlig ausreichend.

Die USB 2.0 Industriekameras vom Hersteller IDS Imaging sind bei der Firma LAP schon in mehreren Anlagen für die Aufnahme von Laserstrahlen eingesetzt und haben gute

---

<sup>23</sup> Complementary Metal Oxide Semiconductor

<sup>24</sup> Universal Serial Bus

<sup>25</sup> Vergl. <http://www.wikipedia.de/CMOS-Sensor> (Stand 17.06.2013)

<sup>26</sup> Ein heller Streifen in einer Bildaufnahme, der von besonders hellen, überbelichteten Bildstellen ausgeht

Ergebnisse bei der Bildaufnahme gezeigt. Sie wurden auch für das „optische Phantom“ ausgewählt. Bei der Auswahl eines konkreten Kameramodells sind folgende Kriterien berücksichtigt:

- Größe des Kamerasensors. Da die Sensoroberfläche später in mehrere Bereiche eingeteilt wird, um alle einkommenden Laserstrahlen getrennt aufnehmen zu können, wäre es vorteilhaft, den größtmöglichen Sensor einzusetzen. Bei IDS gibt es Kameras mit folgenden Sensorgrößen (Diagonallänge, in Zoll): 1, 1/1,8, 1/2, 1/3, 1/4.
- Auflösung des Bildsensors. Sie zeigt die Anzahl der Bildpunkte (Pixel<sup>27</sup>) je Zeile (Breite) und Anzahl der Bildpunkte je Spalte (Höhe) und bestimmt die Größe jedes einzelnen Bildpunktes und somit die Fähigkeit eines Sensors, die kleinsten Objektstrukturen aufzunehmen. Für die Übertragung und Verarbeitung der Bilder mit höherer Auflösung werden jedoch höhere Datentransferraten und Rechenleistung gebraucht.
- Maximale Bildwiederholrate (fps<sup>28</sup>). Sie bezeichnet die maximale Anzahl der Einzelbilder, die im Zeitabschnitt von 1 Sekunde aufgenommen werden. Diese Eigenschaft des Sensors ist vor allem bei der Bildverarbeitung im Echtzeitmodus wichtig, denn jedes einzelne Bild wird gleich nach der Aufnahme verarbeitet. Die höheren Bildwiederholraten sind ebenfalls mit höheren Datenströmen und Rechenleistung verbunden.
- Relative Sensorsensibilität. Sie zeigt die Empfindlichkeit des Kamerasensors für die Lichtstrahlen verschiedener Wellenlängen. Es ist zu beachten, dass das „optische Phantom“ in der Lage sein muss, die Strahlen von allen Modellen der APOLLO-Projektoren mit möglichst gleicher Intensivität aufzunehmen (falls beim Justierverfahren die Module verschiedener Typen eingesetzt werden), dafür muss die relative Sensorempfindlichkeit für die Strahlen mit Wellenlängen von 450 – 635 nm ungefähr gleich sein.

Nach einer Recherche auf der IDS-Herstellerseite<sup>29</sup> wurde schließlich das Kameramodell uEyeUI-1242LE-M ausgewählt, das optimal allen gesetzten Anforderungen entspricht. Die wichtigsten Parameter sind in der Tabelle 4-1 vorgestellt<sup>30</sup>. In der Justieranlage werden drei dieser Kameras in der Ausführungsvariante „Ohne Gehäuse“ benutzt.

---

<sup>27</sup> Abk. engl. „Picture element“

<sup>28</sup> Abk. engl. „Frames per second“

<sup>29</sup> <http://www.ids-imaging.de>

<sup>30</sup> Entnommen aus IDS-Imaging Datenblatt USB 2.0 Industriekamera uEyeUI-1242LE-M

<b>Sensortechnologie</b>	CMOS, monochrom	
<b>Sensorgröße</b>	1/2"	
<b>Auflösung (h x v)</b>	1280 x 1024	
<b>ADC Auflösung</b>	8 Bit	
<b>Pixelgröße</b>	5,3 µm x 5,3 µm	
<b>Max. Bildfrequenz</b>	25,8 fps	

Tabelle 4-1: Technische Daten IDS USB 2.0 Industriekamera uEye UI-1242LE-M

### 4.3 Optischer Filter

Das Design des „optischen Phantoms“ sieht vor, dass die Strahlung von Laserprojektoren mit entsprechender Optik direkt auf die Kamerasensoren gerichtet wird. Da der Laser eine starke Lichtquelle ist, gibt es die Gefahr, dass die Kameras überbelichtet sind und die korrekte Bildaufnahme nicht möglich ist.

Um die Lichtintensität des Laserstrahls zu reduzieren, ohne das spektrale Profil des Lichtes zu ändern, werden die sogenannten Neutraldichtefilter (ND-Filter, Graufilter) eingesetzt. Die Firma Edmund Optics bietet auf ihrer Homepage<sup>31</sup> mehrere ND-Filter verschiedener Dichte an (siehe Abb. 4-3, die Wellenlängen der verwendeten APOLLO-Projektoren sind in der Abbildung eingetragen).

Nach den vorherigen Erfahrungen der LAP-Entwickler liegt der optimale Dichtewert des ND-Filters, der zusammen mit einer IDS-Kamera und einer Laserquelle der Klasse 2 (wie es bei allen APOLLO-Modulen der Fall ist<sup>32</sup>) benutzt wird, zwischen 0.9 und 1.3. Für die Justieranlage wurden also die Filter der Dichte 1.0 ausgewählt.

<sup>31</sup> <http://edmundoptics.com>

<sup>32</sup> Vergl. LAP APOLLO\_inst-oper-manual\_MAN-1019-rev-6-de, ab Seite 34

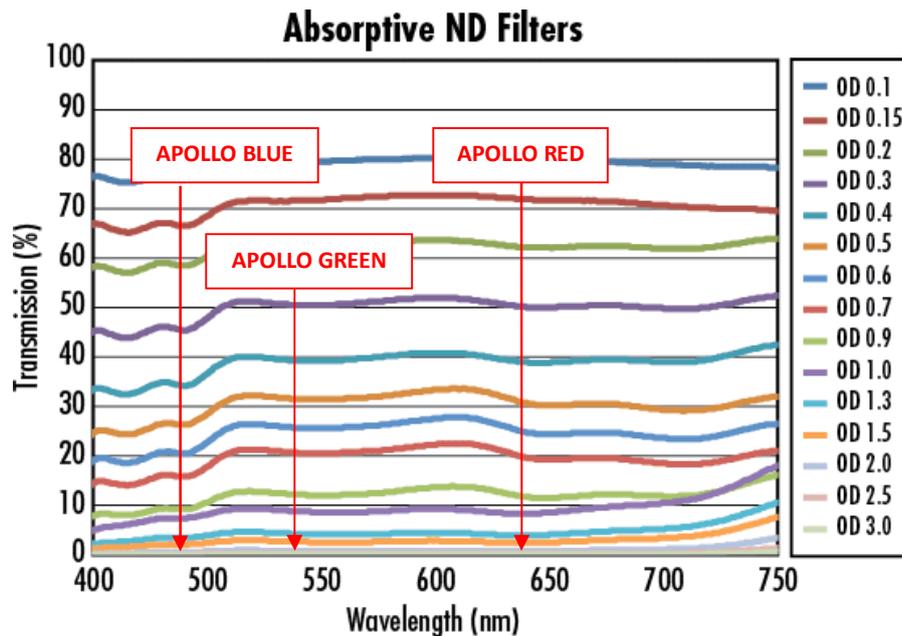


Abbildung 4-3: Lichtübertragungsanteile der ND-Filter verschiedener Dichten<sup>33</sup>

Aus der Abbildung 4-3 ist zu entnehmen, dass der Filter der Dichte 1.0 ca. zehn Prozent des Lichtes mit Wellenlänge 500 – 700 nm durchlässt. Für Wellenlängen unter 500 nm (450 nm bei APOLLO BLUE) ist der Durchlassanteil um noch einige Prozent geringer.

Edmund Optics bietet die Filter in verschiedenen Ausführungen an. Die Kamerasensoren in der Justieranlage werden ohne Gehäuse und Objektive betrieben, aus diesem Grund werden die Filter aus einer speziell beschichteten Folie verwendet, die direkt auf Sensoroberflächen aufgeklebt sind.

#### 4.4 Strahlenspiegelungssystem

Die Strahlen der zu justierenden Projektoren betreten die Justieranlage von entgegengesetzten Richtungen. Die Aufgabe des Reflexionssystems besteht darin, die beiden Strahlen zu empfangen und auf einen Kamerasensor so zu richten, dass jeder Strahl auf einen für ihn vorgesehenen Sensorbereich fällt.

Für die Reflexion können im einfachsten Fall zwei ebene Spiegel eingesetzt werden. Jeder Spiegel soll den eingehenden Strahl um 90 Grad brechen, so dass er die Sensoroberfläche trifft. Da die Justieranlage aber später so ausgebaut wird, dass auch die Strahlen von weiteren Projektoren aufgenommen werden können, ist für die Reflektion eine viereckige „Glaspypamide“ eingesetzt, die insgesamt vier spiegelnde Ebenen hat. In diesem Projekt werden nur zwei gegenüberliegende Pyramidenoberflächen genutzt,

<sup>33</sup> Entnommen aus <http://www.edmundoptics.com/optics/optical-filters/neutral-density-filters/mounted-absorptive-neutral-density-nd-filters/54729> (Stand 18.06.2013), Wellenlängen verschiedener Modellen der APOLLO-Projektoren wurden zusätzlich markiert

allerdings hat die Form des Spiegelkörpers bestimmte Auswirkungen auf Bildaufnahmen. Diese werden im weiteren Arbeitsverlauf untersucht. In der Abbildung 4-4 ist ein schematischer Aufbau des Reflexionssystems vorgestellt.

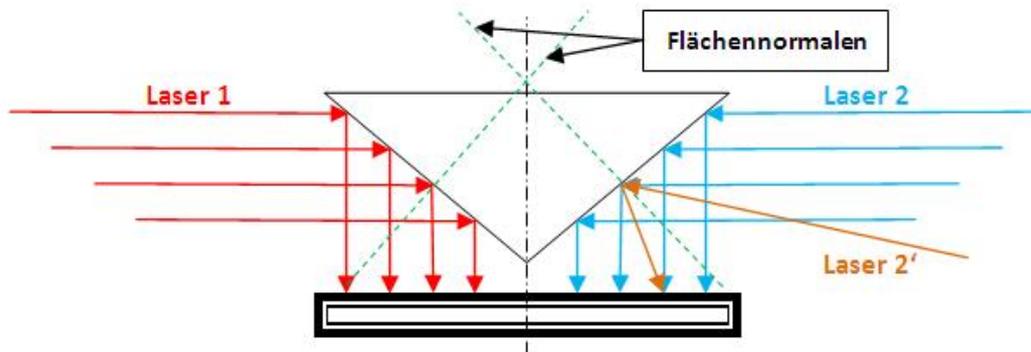


Abbildung 4-4: Spiegelung zweier entgegengesetzten Laserstrahlen um 90 Grad

Laut dem Gesetz der Spiegelung ist der Einfallswinkel eines Strahls an einem ebenen Spiegel identisch mit dem Ausfallwinkel des reflektierten Strahls<sup>34</sup> (bezogen auf die Flächennormale des Spiegels). Für die Spiegelung um 90 Grad muss der Laserstrahl also unter dem Winkel von genau 45 Grad zur Flächennormale des Spiegels fallen. Es ist aber nicht möglich, den Einfallswinkel ständig auf demselben Wert zu halten, denn die senkrechte Neigung des Laserstrahlers kann beim Justierverfahren umgestellt werden. Folglich wird sich auch der Ausfallwinkel ändern, sodass der gespiegelte Laserstrahl dann auf die andere Stelle des Kamerasensors fällt (siehe Abb. 4-4, Laser 2'). Diese Differenz ist stark von dem Abstand zwischen den Spiegel und Kamerasensor abhängig und kann Fehler bei anschließenden Berechnungen bewirken.

Es ist zu beachten, dass der beschriebene Effekt bei allen drei verwendeten Kamerasensoren auftritt. Da die Spiegelsysteme bei allen Kamera identisch aufgebaut sind, sind auch die Einfallswinkel des Laserstrahls identisch. Wenn dabei auch die Abstände zwischen den jeweiligen Spiegeln und Sensoren gleich sind, dann sind auch die Projektionsdifferenzen in jedem Sensor identisch. Als Folge können diese Differenzen bei den Berechnungen vernachlässigt werden<sup>35</sup>.

Ähnliche Effekte können auch beim waagerechten Kippen oder bei Rotation des Laserstrahls auftreten und müssen experimentell untersucht werden. Alle möglichen optischen Verzerrungen bei der Bildaufnahme sind im Anhang 1: „Optische Verzerrungen in aufgenommenen Bildern“ zu finden.

<sup>34</sup> Vergl. Meschede, Seite 3

<sup>35</sup> Vergl. Formel 3.5, Kapitel 3.3.2

## 4.5 Gesamtaufbau der Justieranlage

Die Definition der mechanischen Spezifikationen und der Entwurf des Gesamtaufbaus wurden bei LAP durchgeführt (siehe Abb. 4-5), für die Fertigung wurde eine externe Firma beauftragt.

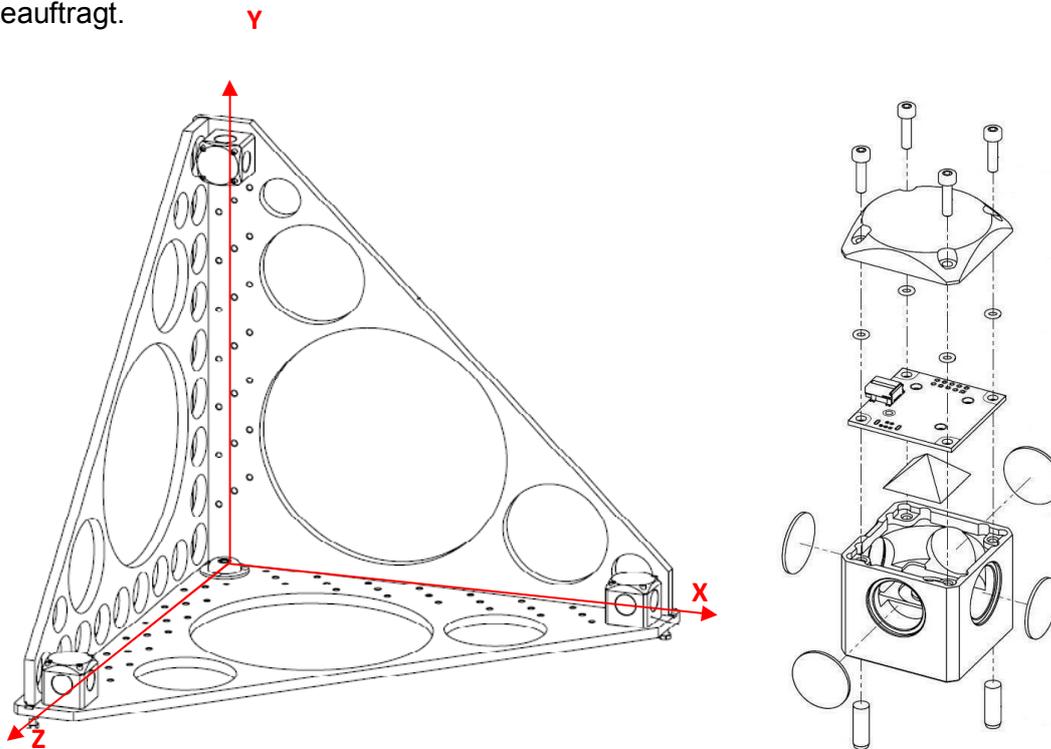


Abbildung 4-5: Fertigungszeichnungen der Justieranlage und des Kameragehäuses<sup>36</sup>

Das Grundgerüst des „Optischen Phantoms“ besteht aus einer Grundplatte und zwei darauf befestigten seitlichen Metallplatten, in denen die Reihen der Bohrungen vorgesehen sind. An diesen Bohrungen werden mit Hilfe der Passstifte die Kameragehäuse befestigt. Da die genauen Positionen der Bohrungen in einer Fertigungszeichnung angegeben sind, lassen sich die Abstände der Kameras bezüglich des Koordinatenursprungs (in der Abb. 4-5 schematisch eingetragen) mit hoher Genauigkeit bestimmen. Auf der Grundplatte befindet sich außerdem die eingebaute Wasserwaage, mit dem sich die waagerechte Einstellung der Justieranlage nachprüfen lässt.

Unter der Annahme, dass die Laserstrahlen beider Projektoren sich entlang der X-Achse verbreiten (vgl. [Abb. 3-6](#)), befindet sich die Kamera, die an dieser Achse liegt, in einer senkrechten „Messebene“, während die restlichen Kameras sich in einer anderen parallelen „Messebene“ befinden, die den Koordinatenursprung beinhaltet. Der Abstand zwischen den beiden „Messebenen“ ist somit allein durch die Position der Kamera auf X-Achse definiert.

<sup>36</sup> Entnommen aus LAP Optisches Phantom Montage und LAP Prisma Kamera Zusammenbau

Das Kameragehäuse hat an jeder Seite eine runde, mit einem Glas geschützte Öffnung, durch die die Lichtstrahlen die auf dem Boden angeklebte Spiegelpyramide erreichen können. Direkt über der Pyramide ist der Kamerasensor angebracht, sodass die Pyramidenspitze sich ungefähr unter dem Bildmittelpunkt befindet. Diese Konstruktion garantiert, dass die Abstände zwischen den Spiegeln und Sensoren bei allen Gehäusen identisch sind. Die USB-Buchse der Kamera liegt außerhalb des Gehäuses und lässt sich anschließen ohne das Gehäuse auseinanderbauen zu müssen.

Aus der Justieranlage werden insgesamt drei USB-Kabel herausgeführt, die über einen externen USB-Switch an einen Anwender-PC angeschlossen werden.

## 5 Bildverarbeitung und Figurenerkennung

Dieses Kapitel umfasst einige Methoden der maschinellen Bildverarbeitung, anhand deren sich die Konturlinien einer Figur in einer Bildaufnahme erkennen lassen. Die erkannten Figuren dienen anschließend als Basis fürs Detektieren der Geraden, die ein aufgenommenes Laserkreuz eindeutig definieren. Unter anderem wird OpenCV vorgestellt- die freie Programmbibliothek der Algorithmen für Bildverarbeitung.

### 5.1 Laser als Lichtquelle

Das Wort „Laser“ ist die Abkürzung von englischen „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“<sup>37</sup>, zu Deutsch übersetzt: „Lichtverstärkung durch simulierte Emission von Strahlung“. Doch ein Laserstrahl ist nicht nur verstärktes Licht. Im Gegensatz zur gewöhnlichen Lichtstrahlung haben bei Laserstrahlung alle Lichtwellen sehr enges Wellenlängenspektrum und gleiche Phasenlage. Dadurch haben die Laserstrahlen eine sehr kleine Aufweitung und hohe Strahlungsflussdichte und können somit auf größere Entfernungen übertragen werden.

Ist die Laserquelle von guter Strahlqualität, hat die Leistungsdichteverteilung der erzeugten Strahlung idealerweise ein Gauß-Profil<sup>38</sup>. Die Gauß-Verteilung ist schematisch in der Abbildung 5-1 links dargestellt.

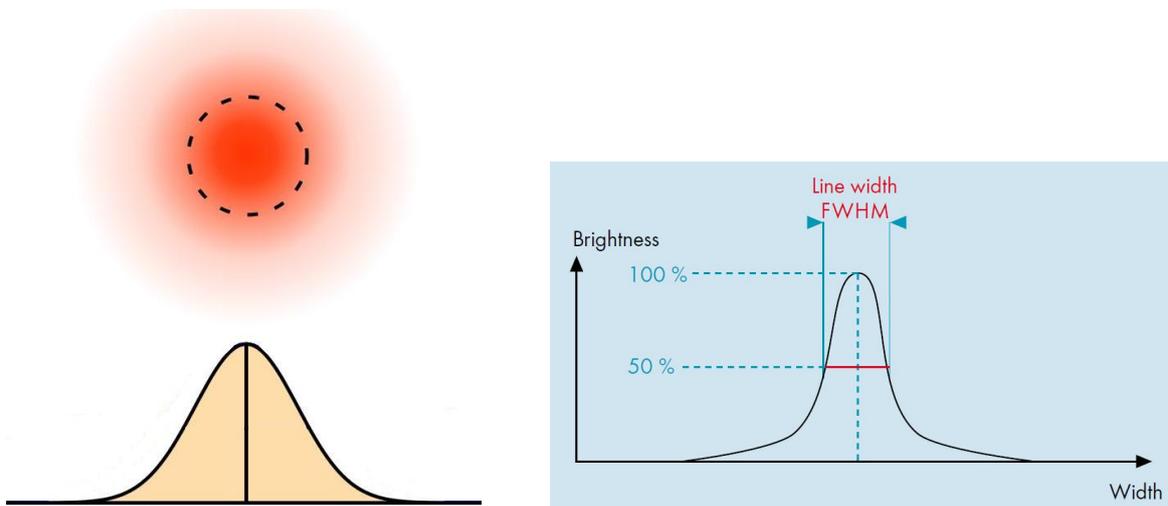


Abbildung 5-1: Strahlintensitätsverteilung, ideale Laserquelle (l.) und APOLLO-Laser (r.)

Im Zentrum des Laserstrahls ist die Lichtintensität am höchsten, von der Mitte weiter nach außen nimmt sie schnell ab. Dabei läuft die Intensitätskurve immer flacher, das bedeutet, dass die Geschwindigkeit der Intensitätsabnahme immer kleiner wird.

<sup>37</sup> Vergl. Meschede, Seite 255

<sup>38</sup> Vergl. <http://www.wikipedia.de/Laser> (Stand 10.07.2013)

Die in APOLLO-Projektoren eingesetzten Laserquellen haben ebenfalls das Gauß-Profil<sup>39</sup> (vgl. Abb. 5-1, rechts) bei der Linienbreite von max. 1 mm. Dabei wird die Linienbreite nach der sogenannten FWHM-Methode (engl. Full-Width Half-Maximum) definiert. Das bedeutet, dass die Laserlinie in der Mitte die höchste Helligkeit hat und sie wird durch die Bereiche von beiden Seiten begrenzt, in denen die Helligkeit genau die Hälfte des Maximalwertes beträgt.

In der Realität gibt es jedoch keine Laserquelle, die die ideale Gauß-Verteilung aufweisen kann. Mit der FWHM-Methode lässt sich die Qualität der Laserquellen einschätzen und miteinander vergleichen.

### 5.2 Bildeinzug

Wie im Kapitel 4 erläutert ist, erreichen die Laserstrahlen, nachdem sie von einer viereckigen Spiegelpyramide reflektiert wurden, schließlich die Kamerasensoroberfläche. Die Pyramide empfängt die Strahlen von vier verschiedenen Richtungen und leitet sie nach verschiedenen Bereichen des Sensors. Da jede spiegelnde Oberfläche der Pyramide ein Dreieck ist, ist das Bild in vier dreieckige Bereiche aufgeteilt. Die Bereichsgrenzlinien schneiden sich dabei in einem Punkt, der idealerweise mit dem Mittelpunkt des Sensors übereinstimmt (siehe Abbildung 5-2, links).

Die Position des Schnittpunktes im Bild wird durch die Lage der Pyramidenspitze bezüglich des Sensors definiert. Idealerweise befindet sich die Spitze genau über dem Mittelpunkt des Sensors, so dass der linke und rechte bzw. obere und untere Bereiche des Bildes identisch sind. Doch technisch ist solche genaue Pyramidenausrichtung nicht möglich und die genannten Bereiche unterscheiden sich deutlich voneinander (vgl. Abb. 5-2, rechts). Diese Tatsache muss bei weiteren Berechnungen berücksichtigt werden, dafür wird jeder Sensor kalibriert. Das Kalibrierungsverfahren wird detailliert im Kapitel 6 beschrieben.

Für die Untersuchung zweier Laserkreuze sind nur zwei entgegen liegende Bereiche benutzt, die jeweils ein Laserkreuz aufnehmen. So wird erreicht, dass jedes Kreuz unabhängig von anderen verarbeitet wird.

Das aufgenommene Bild wird von der Kamera an einen PC als eine Menge von Datenelemente übertragen, angeordnet in ein zweidimensionales Feld. Jedes Datenelement repräsentiert den jeweiligen Bildpixel. Bei einem monochromen<sup>40</sup> Sensor (wie der Sensor der uEye UI-1242LE-M) ist nur seine Helligkeitsstufe oder sein

---

<sup>39</sup> Vergl. LAP APOLLO\_2011-07-26\_en\_single

<sup>40</sup> Von griech. „einfarbig“

Graustufenwert relevant. Bei der ADC Auflösung von 8 Bit (vgl. Tabelle 4-1) wird für jeden Pixel nur ein Byte benötigt, der die Werte zwischen 0 (schwarz, min. Helligkeit) bis 255 (weiß, max. Helligkeit) annehmen kann. Anhand dieser Werte kann das Bild im PC Pixel für Pixel aufgebaut werden.

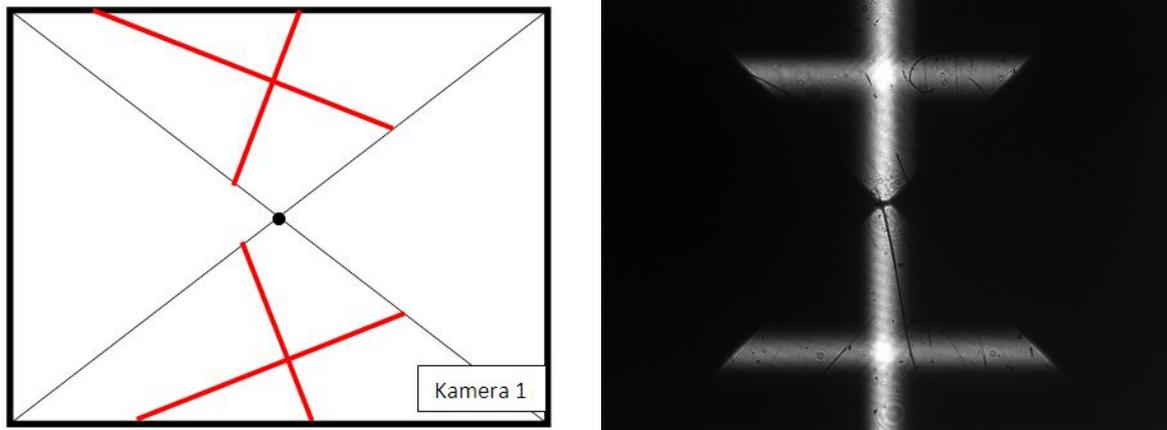


Abbildung 5-2: Beispielaufnahme zweier Laserkreuze, schematisch (l.), reell (r.)

Das komplette Bild wird in einem Speicherfeld abgelegt. Um zwischen beiden Laserkreuzen unterscheiden zu können, muss das Bild passend aufgeteilt werden. Die rechten und linken Bildbereiche werden in diesem Projekt nicht genutzt, das Bild kann also vereinfacht mit einer waagerechten Gerade, die durch den Schnittpunkt aller Bereiche läuft, geteilt werden. Die beiden Bildhälften enthalten dann jeweils einen Laserkreuz und werden völlig unabhängig voneinander betrachtet. Dabei ist der Schnittpunkt in jedem Bereich sichtbar und kann als Bezugspunkt für beide Kreuze dienen.

### 5.3 Figurenerkennung

#### 5.3.1 Ansatz

Nachdem die aufgenommenen Bilder aufgeteilt sind, wird jede Bildhälfte auf Vorhandensein der Figuren (Kreuze oder einzelnen Kreuzachsen) untersucht. In einer Bildaufnahme hebt sich die Laserlinie in ihrer Helligkeit vom restlichen Hintergrund ab (vgl. Abb. 5-2, rechts). In einem Bildverarbeitungsvorgang muss jeder Pixel einzeln untersucht werden, dabei werden die Figurenpixel und Hintergrundpixel voneinander getrennt. Sind die Zugehörigkeiten der Pixel bekannt, können die Figurengrenzen oder Figurenkonturen bestimmt werden.

Das Ziel des Vorgangs: Konturlinien aller Kreuze / Kreuzachsen bestimmen und diese als Basis fürs Detektieren der Laserlinienstützpunkte benutzen. Für diese Aufgabe wird die OpenCV-Bibliothek eingesetzt.

### 5.3.2 OpenCV: Algorithmen für maschinelles Sehen und Bildverarbeitung

OpenCV (Abkürzung für „Open Computer Vision“) ist eine freie Programm-bibliothek, die speziell für die Programmiersprachen C/C++ entwickelt wurde. Sie bietet eine sehr umfangreiche Sammlung von Bildverarbeitungs-algorithmen. Unter anderem sind die Algorithmen für automatisches Sehen, Bewegungsverfolgung, Identifikation, Erkennung und Zerlegung von Objekten enthalten.

Die besondere Stärke der Programm-bibliothek OpenCV liegt daran, dass ihre Funktionen für die Geschwindigkeit der Ausführung optimiert sind, was einen großen Vorteil bei der Erstellung der Echtzeitanwendungen bietet.

OpenCV ist frei zugänglich und läuft unter BSD-Lizenz. Die Bibliothek ist kostenlos und sowohl für die akademische Nutzung als auch für kommerzielle Verwendungen zugänglich. In diesem Projekt wurde die OpenCV Version 2.0.8 eingesetzt.

### 5.3.3 Konvertieren des Bildes in OpenCV-Format

Bei der Aufnahme des Bildes mit einer Kamera von IDS werden die Bilddaten direkt an den Arbeitsspeicher des PC gesendet. Damit die Algorithmen der OpenCV-Bibliothek am Bild angewendet werden können, muss dieses entsprechend konvertiert werden. Für das Konvertieren in *IplImage*-Format<sup>41</sup> wird die Funktion *cvCreateImage()* eingesetzt, die ermöglicht, monochrome und farbige Bilder zu erstellen. Als Eingabeparameter der Funktion sind die Bildgröße, Bildtiefe<sup>42</sup> und Anzahl der Farbkanäle (ein Kanal fürs monochrome Bild und drei Kanäle fürs farbige) anzugeben.

Obwohl das aufgenommene Bild monochrom ist, wird es in eine farbige OpenCV-Bild konvertiert, indem die Graustufenwerte des Originalbildes in alle drei Farbkanäle des Zielbildes kopiert werden. Dies wird gemacht, um das Quellbild später für bessere Anschaulichkeit mit farbigen Visualisierungen und Texten zu ergänzen. Für die Konvertierung wird die Funktion *cvSplit()* eingesetzt, die als Parameter die Zeiger auf Quell- und Zielbild benötigt.

Da für die meisten OpenCV-Algorithmen ausschließlich die Graustufenbilder benötigt werden, wird zusätzlich eine monochrome Kopie des Ursprungsbildes erstellt. Die komplette Bildverarbeitung findet an monochromer Bild statt und alle Ergebnisse werden im farbigen Bild dargestellt.

---

<sup>41</sup> Gängiges Bildformat in OpenCV, kann bei allen Bildtypen eingesetzt werden (vergl. Bradski, Seite 17)

<sup>42</sup> Anzahl von Bits, die einen Pixel beschreiben

### 5.3.4 Definition einer Figurenkontur

Ein Bild in elektronischer Form ist im Speicher des Rechners durch eine Menge der einzelnen Pixel, angeordnet in einem zweidimensionalen Feld, dargestellt. Jedes Pixel im Feld kann über seine eindeutigen X- und Y-Koordinaten angesprochen werden. Die Aufzählungen von Reihen und Spalten fangen bei 0 an. Als Standard befindet sich der Koordinatenursprung im oberen linken Winkel des Bildes. Bei einem Bild der Größe 1280x1024 Pixel wird das linke oberste Pixel über Koordinaten (0,0) und das rechte unterste über Koordinaten (1279,1023) angesprochen werden.

In OpenCV wird „die Kontur“ als eine Liste der Pixel definiert, die zusammen eine bestimmte Kurve darstellen. Je nach den Umständen kann diese Darstellung unterschiedlich sein<sup>43</sup>. Da jedes Pixel im Bild durch zwei Koordinaten definiert ist, ist „eine Kontur“ schließlich die Liste mehrerer Koordinatenpaare (X, Y).

Eine Figur im Bild kann mehrere Konturlinien enthalten. Es gibt äußere Konturen, die die gesamte Figur umkreisen, und innere Konturen, die „die Löcher“ in der Figur begrenzen. Beide Konturentypen können sogar in mehreren Stufen ineinander verschachtelt werden. Für dieses Projekt sind ausschließlich die äußersten Konturlinien von Bedeutung, weil sie die komplette Figur begrenzen und somit den Bereich für weitere Verarbeitung festlegen.

Die Programmbibliothek OpenCV verfügt über eine Funktion, die selbständig nach den Konturen aller im Bild befindlichen Figuren sucht: *cvFindContours()*. Als Funktionsparameter muss lediglich nur der Speicherort der zu erstellenden Pixelliste und der Suchmodus („CV\_RETR\_EXTERNAL“ für äußere Konturlinien) eingegeben werden.

Nachteil: für die Verarbeitung mit *cvFindContours()* dürfen ausschließlich binarisierte<sup>44</sup> Bilder eingesetzt werden. Also bevor die Funktion benutzt werden kann, müssen einige Vorverarbeitungen unternommen werden.

### 5.3.5 Binarisierung des Bildes

Der monochrome Sensor einer UI-1242LE-M-Kamera liefert standardmäßig Bilder, deren Pixel 255 Grauwertabstufungen zwischen Farben schwarz und weiß haben. Bei einem binarisierten Bild gibt es dagegen nur zwei Abstufungen: schwarz und weiß. Für die Binarisierung wird ein Schwellenwert zwischen 0 und 255 (Helligkeitswerte von „schwarz“ und „weiß“) eingesetzt. Jedes Bildpixel wird mit diesem Wert verglichen. Ist die Helligkeitsstufe des Pixels größer als der Schwellenwert, bekommt das Pixel den neuen Helligkeitswert von 255 (weiß), ansonsten wird ihm die Helligkeitsstufe 0 (schwarz) zugewiesen. Für die Binarisierung wird die Funktion *cvThreshold()* eingesetzt.

---

<sup>43</sup> Vergl. Bradski, Seite 234

<sup>44</sup> Bilder, die ausschließlich aus schwarzen und weißen Pixel bestehen, ohne Grauwerte

Von der Auswahl des Schwellenwertes hängt es stark ab, wie das gesamte Bild binarisiert wird. Idealerweise sollen alle Figurenpixel weiß sein und alle Hintergrundpixel schwarz. Doch es gibt viele Faktoren, die die Konvertierung beeinflussen, dazu zählen die störenden Lichtquellen, kleinere Verschmutzungen der Sensor- und Spiegeloberflächen, Ungleichmäßigkeit des Bildhintergrundes u.a. In diesem Projekt wird der Schwellenwert durch den Operator manuell angepasst, indem er die im späteren Verlauf erhaltenen Konturlinien betrachtet. Die Möglichkeiten der automatischen Regelung werden hier nicht untersucht.

Es ist zu beachten, dass bei der Binarisierung des Bildes die Informationen über Intensitätsverteilung der aufgezeichneten Laserlinie verloren gehen. Diese Tatsache wird später beim Detektieren der Linienstützpunkte analysiert.

In der Abbildung 5-3 sind die binarisierten Kopien der Originalaufnahme (vgl. Abb. 5-2, rechts) bei verschiedenen Schwellenwerten dargestellt.

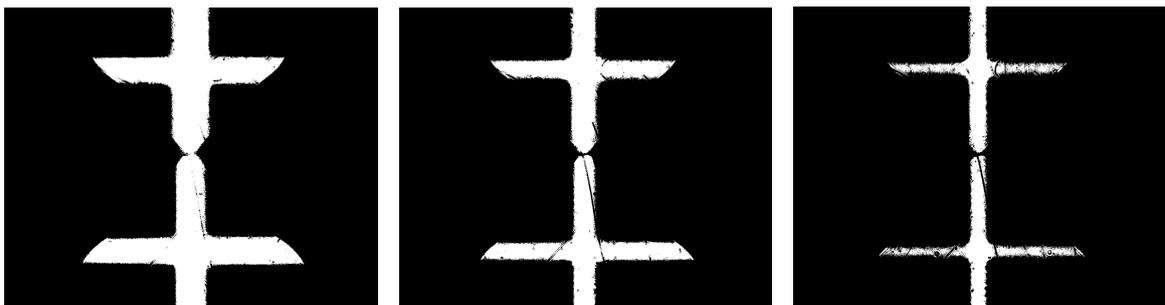


Abbildung 5-3: Binarisierte Aufnahme bei Schwellenwerten 25 (l.), 55 (m.) und 100 (r.)

Nach visueller Einschätzung wiederholt das Binarisierungsergebnis mit dem Schwellenwert von 55 die Umrisse des Originalbildes am genauesten. Dieser Schwellenwert wird also für weitere Verarbeitung benutzt.

### 5.3.6 Rauschunterdrückung

Im stark vergrößerten Ausschnitt des binarisierten Bildes (siehe Abb. 5-4) ist deutlich zu sehen, wie unregelmäßig der Figurenrand ist.



Abbildung 5-4: Vergrößerter Ausschnitt der binarisierten Bildaufnahme

Einige Punkte am Rand der Laserlinie überschreiten leicht die gesetzte Binarisierungsschwelle und werden verstärkt, die anderen liegen leicht darunter und sind ausgelöscht. Dadurch entstehen die Spitzen und kleine „Inseln“ am Linienrand. Außerdem sind durch größere Verschmutzungen in der Optik weitere dunkle Bereiche innerhalb der Linie entstanden. Als Folge werden die Figurenkanten falsch gesetzt und die „Inseln“ werden überhaupt als weitere Figuren erkannt, was für den nächsten Verarbeitungsschritt unzulässig ist.

Für das Glätten der Figurenränder wird auf das Originalbild vor der Binarisierung der Gauß-Filter eingesetzt. Damit wird das Bildrauschen vermindert, indem kleinere Bildstrukturen wie Spitzen und „Inseln“ unterdrückt werden, während die groben Strukturen (Figurenkanten) erhalten bleiben.

Der Gauß-Filter ist mit der Funktion `cvSmooth()` realisierbar. Als Funktionsparameter muss die Größe der Filtermatrix eingegeben werden. Je größer die Filtermatrix ist, desto verschwommener wird das Gesamtbild.

Die Filtergröße wird genau wie der Schwellenwert manuell angepasst. Die besten Ergebnisse wurden jedoch bei der Größe von 11x11 Pixel erzielt (siehe Abb. 5-5).

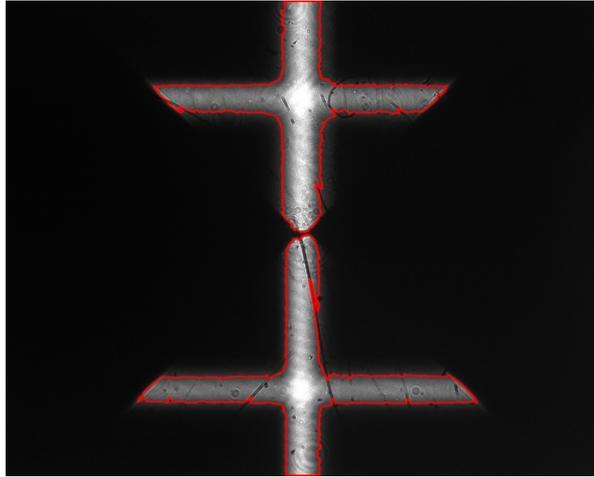


Abbildung 5-5: Binarisieren des Bildes ohne (l.) und mit angewendetem Gauß-Filter (r.)

### 5.3.7 Suche nach Figurenkonturen mit `cvFindContours()`

Nachdem die binarisierte Aufnahme einer Laserlinie zur Verfügung steht, kann die Suche nach Konturlinien starten. Die Funktion `cvFindContours()` sucht das ganze Bild durch und speichert alle gefundenen Konturen in separaten Listen.

Idealerweise sollte das Bild zwei Konturlinien erhalten, jeweils eine für jedes empfangene Laserkreuz (siehe Abb. 5-6). Doch es kann vorkommen, dass in der Aufnahme eine größere oder auch kleinere Anzahl von Konturen gefunden wird.



**Abbildung 5-6: Quellbild mit eingezeichneten Konturlinien**

Für das Erscheinen von drei und mehr Konturlinien in einem Bild können folgende Ursachen verantwortlich sein:

- Nicht alle „Inseln“ konnten mit dem Glättungsfilter unterdrückt werden. Jeder heller Fleck auf dem Bild wird als eine neue Figur erkannt und mit Konturlinie begrenzt.
- Störende starke Lichtquellen erzeugen helle Flecken im Bildhintergrund, die ebenfalls als neue Figuren erkannt werden.
- Durch zu starke Verschmutzungen der Sensoroberfläche oder Optik kann die aufgenommene Laserlinie in mehrere Segmente aufgeteilt werden, getrennt durch schwarze Bereiche. Jeder dieser Segmente wird als neue Figur erkannt.

Diese Störungsquellen können teilweise eliminiert werden, indem man deren Konturlinien genauer untersucht. Die „Inseln“ und einzelne getrennte Liniensegmente haben in der Regel einen viel kleineren Flächeninhalt verglichen mit dem Gesamtflächeninhalt der Laserlinie. Entsprechend ist die Länge der umkreisenden Konturlinie und somit auch die Anzahl der Konturpunkte sehr klein. Wird ein passender Schwellenwert für die minimale Konturlänge gesetzt, können die störenden kleinen Figuren detektiert und komplett ausgefiltert werden. Wenn es sich dabei um die Laserlinienspektoren handelt, entstehen kleinere Informationsverluste durch fehlende Linienfragmente. Die „Inseln“ haben keine Auswirkungen auf den Informationsgehalt einer Laserlinie.

Außerdem kann es vorkommen, dass in der Bildaufnahme nur eine einzige Kontur gefunden wird, da die Konturlinien beider Kreuze zusammenschmelzen (siehe Abb. 5-7). Dies ist unzulässig, weil die beiden Konturen sich gegenseitig beeinflussen, was Fehler bei den Berechnungen bewirken kann. Die Maßnahmen zum Umgehen solcher Situationen müssen noch vor der Anwendung der Funktion `cvFindContours()` vorgenommen werden.

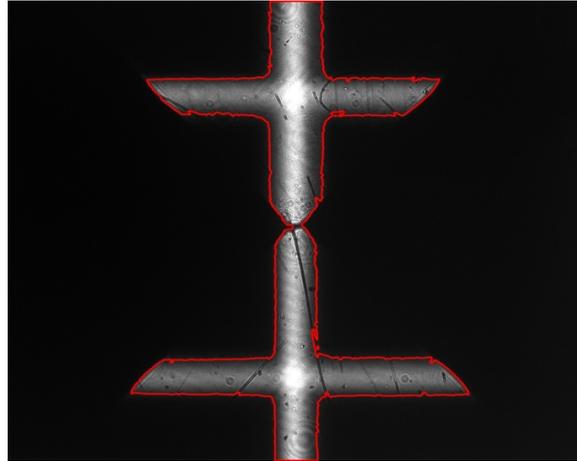


Abbildung 5-7: Quellbild mit verschmolzenen Konturlinien

Folgende Fälle sind zu unterscheiden:

- Die Laserkreuze in der Aufnahme liegen zu nah zueinander. In diesem Fall kann versucht werden, durch die Änderung des Schwellenwertes für die Binarisierung und/oder der Größe des Gauß-Filters den Figurenumfang zu reduzieren und somit die Konturlinien voneinander zu trennen. Sollte die optische Trennung trotzdem nicht gelingen, ist dies nicht gravierend, da sich jedes Laserkreuz in seinem vorher definierten Bildbereich befindet und die Gesamtkontur somit korrekt aufgeteilt werden kann.
- Die Laserkreuze überlappen sich im Grenzbereich. Die Überlappung kann dann entstehen, wenn die beiden Laserprojektoren den starken negativen senkrechten Neigungswinkel haben (vgl. Anhang 1: „Optische Verzerrungen in aufgenommenen Bildern“, Punkt 2). Im Überlappungsbereich sind die Laserlinien nicht mehr voneinander zu trennen und die darin enthaltenen Informationen gehen verloren. Damit dieser Bereich nicht zu einer Fehlerquelle wird, wird er komplett ausgeschnitten, indem er mit dem schwarzen Rechteck verdeckt wird (siehe Abb. 5-8). Das Rechteck wird in der Bildmitte platziert und auf die ganze Bildbreite erweitert. Das Zentrum des Rechtecks liegt im Schnittpunkt der Bildbereichsbegrenzungen (vgl. [Abb. 5-2](#)) und seine Breite muss manuell an den Überlappungsbereich angepasst werden.

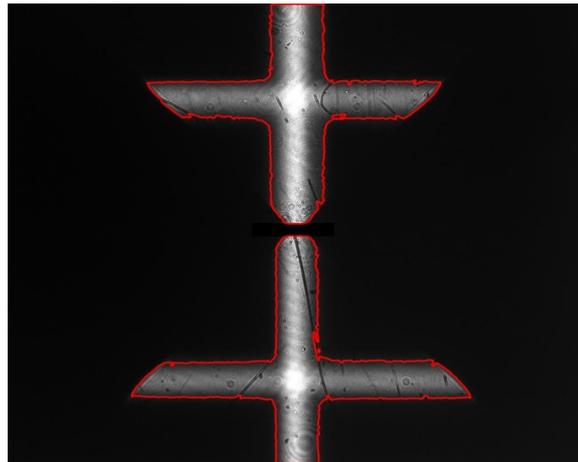


Abbildung 5-8: Quellbild mit eingefügtem "Sperrbereich" in der Bildmitte

Als Endergebnis der Konturensuche werden schließlich genau zwei Konturlinien vorliegen. Diese werden vom nächsten Schritt an getrennt und unabhängig voneinander untersucht.

### 5.3.8 Verfahren zur Figurenerkennung, Zusammenfassung

Die Vorgehensweise zur Figurenerkennung in einer Bildaufnahme unter der Benutzung der OpenCV-Bibliothek lässt sich aus folgenden Einzelschritten zusammensetzen:

1. Konvertieren des aufgenommenen Bildes in OpenCV-Format (*IPLImage*).
2. **Setzen des Sperrbereichs in der Bildmitte zur Trennung der Laserlinien.**
3. Rauschunterdrückung / Glättung der Linienränder mit dem Gauß-Filter.
4. Binarisieren des Bildes mit einem passenden Schwellenwert.
5. Suche nach den Konturlinien der sich in der Bildaufnahme befindlichen Figuren.
6. Nachverarbeitung, Entfernen von störenden Liniensegmenten und „Inseln“.
7. Übergabe von genau zwei Konturlinien an die weitere Verarbeitung.

Es ist zu beachten, dass bei einer Bildaufnahme die Figuren in Form eines Kreuzes detektiert werden (vgl. [Abb. 3-7](#), Kamera 1), während die anderen Aufnahmen nur Segmente der Kreuzachsen beinhalten. Insgesamt müssen also genau sechs Konturformen zur Weiterverarbeitung bereitgestellt werden.

## 5.4 Detektieren der Kreuzachsen

### 5.4.1 Ansatz

Das Hauptziel des Bildbearbeitungsverfahrens ist eine präzise Bestimmung der Lage der Laserlinien in den aufgenommenen Bildern, die die Kreuzachsen repräsentieren. Wie in Kapitel 3 erwähnt wurde, werden als Ausgabe der Bildverarbeitung die

Geradegleichungen in der Allgemeinform  $y = mx + b$  für jede Kreuzachse erwartet, die dann als Grundlage für die Bestimmung der Laserkreuzparameter benutzt werden.

Das Laserkreuz hebt sich in einer Bildaufnahme in seiner Helligkeit von dem Hintergrund ab und ist mit einer Menge der Pixel in Grauwerten von 0 bis 255 dargestellt, begrenzt durch die Konturlinie. Um den Verlauf der Kreuzachsen darstellen zu können, werden aus dem Figurenumriss die Stützpunkte für jede Achse bestimmt. Dabei reduziert sich der Informationsgehalt des Gesamtbildes auf eine bzw. zwei Linien aus den Stützpunkten. Anhand dieser Linien werden die Achsengeraden berechnet.

### 5.4.2 Achsenstützpunkte

Die waagerechten und senkrechten Kreuzachsen werden getrennt bearbeitet. Der Rotationsbereich eines Laserkreuzes eines APOLLO-Projektors beträgt  $\pm 2$  Grad<sup>45</sup>. Die Kreuzachse, deren Schnittwinkel mit waagerechter Koordinatenachse nicht  $\pm 5$  Grad übersteigt (ein Sicherheitsabstand von  $\pm 3$  Grad angenommen), wird als „waagerechte Achse“ definiert.

Für die Ermittlung der Stützpunkte der waagerechten Kreuzachse wird das Bild spaltenweise in X-Richtung (von links nach rechts) untersucht. Dabei wird der jeweilige Stützpunkt aus der gesamten Spalte berechnet. Aus allen Punkten wird die Linie gebildet. Auf die gleiche Weise werden die Stützpunkte der senkrechten Kreuzachse ermittelt, indem das Bild zeilenweise in Y-Richtung (von oben nach unten) untersucht wird.

Die Stützpunkte in einer Zeile/Spalte werden anhand der Konturlinie, die das Kreuz umkreist, bestimmt. Da es sich bei den Konturen immer um geschlossene Linien handelt (vgl. Abb. 5-6 bis 5-8), sind in jeder Zeile/Spalte mindestens zwei Konturpunkte vorhanden. Für die Bestimmung der Laserlinienmitte werden immer die zwei äußersten (am weitesten voneinander liegenden) Konturpunkte ermittelt und der Stützpunkt genau in der Mitte zwischen ihnen gesetzt. Die Annahme, dass sich der Linienschwerpunkt genau in der Mitte der Laserlinie befindet, beruht auf die Tatsache, dass die Laserstrahlung des APOLLO-Systems die Gauß-Verteilung hat (vgl. Kapitel 5.1) und die Linienbreite nach der FWHM-Methode definiert ist.

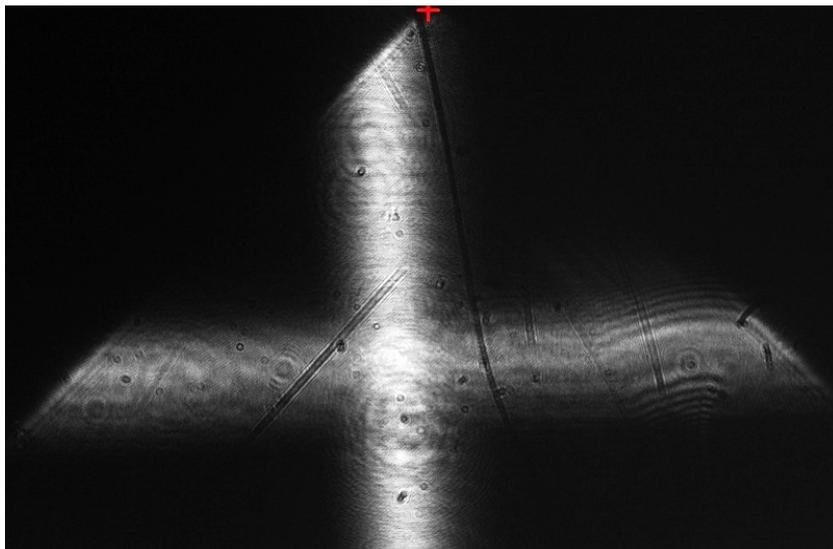
Bei dem realen Laser kann die Intensitätsverteilung jedoch von der Gauß-Kurve abweichen, so dass die Mittellinie der Strahlung (Linienbereich mit höchster Intensität) bezüglich der Mitte der Linie verschoben ist. Um diese Verschiebung detektieren zu können, sollte eine komplexere Methode eingesetzt werden, wie z.B. die Methode zur Suche nach dem Schwerpunkt einer Figur, in diesem Fall nach dem Schwerpunkt einer

---

<sup>45</sup> Vergl. LAP APOLLO\_inst-oper-manual\_MAN-1019-rev-6-de, Seite 34

Zeile/Spalte. Bei dieser Methode wird die Koordinate jedes Punktes in einer Zeile/Spalte mit dem zu ihm gehörendem Helligkeitswert multipliziert und aufsummiert. Anschließend wird das Ergebnis durch die Summe der Helligkeitswerte aller Pixel der Zeile/Spalte geteilt<sup>46</sup>. Die Methode zur Schwerpunktberechnung wird in diesem Projekt jedoch aus folgenden Gründen nicht benutzt:

- Bei den APOLLO-Projektoren sind die hochwertigen Laser eingesetzt, deren Strahlung eine sehr präzise Gauß-Verteilung aufweist. Die für das Projekt relevante Genauigkeit der Positionsbestimmung liegt bei  $\pm 100\mu\text{m}$  und ist somit viel größer, als die Abweichung der Lasermittellinie.
- Die aufgenommenen Laserlinien sind meistens durch die Verschmutzungen in der Optik und Interferenzen solchermaßen verzerrt, dass die Gauß-Verteilung nicht mehr sauber detektierbar ist (vgl. Abb. 5-9). Die einfache Ermittlung der Mittelpunkte in jeder Zeile/Spalte erzielt dagegen gute Ergebnisse, was im weiteren Verlauf gezeigt wird.



**Abbildung 5-9: Bildaufnahme eines Laserkreuzes im unteren Bildbereich**

In der Abbildung 5-10 ist das Ergebnis der Stützpunktberechnung dargestellt. Die meisten Stützpunkte sind in einer von beiden Linien angeordnet, die zur jeweiligen Kreuzachse gehören. Doch im Verlauf dieser Linien sind Lücken im Mittenbereich, entstanden durch die verschobenen Stützpunkte, zu sehen.

<sup>46</sup> Vergl. Bartsch, Schwerpunkt einer Figur, Seite 608

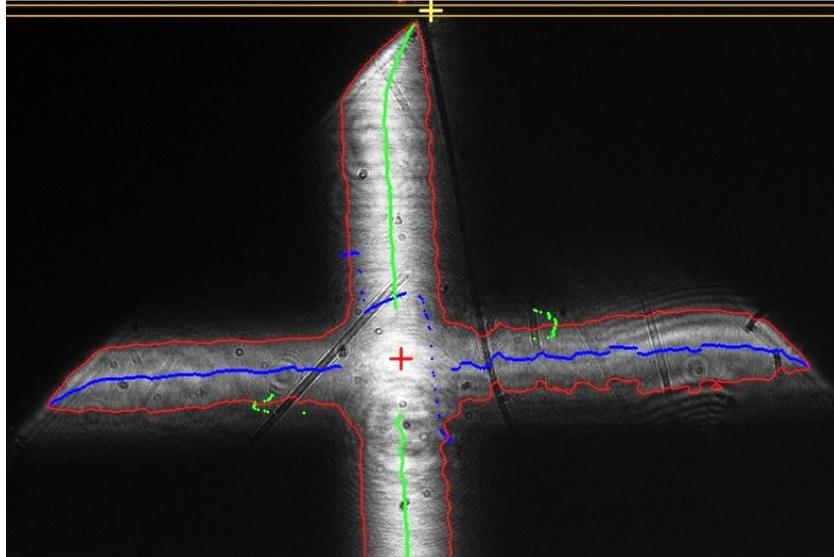


Abbildung 5-10: Die Stützpunkte senkrechter (gr.) und waagerechter (bl.) Kreuzachsen

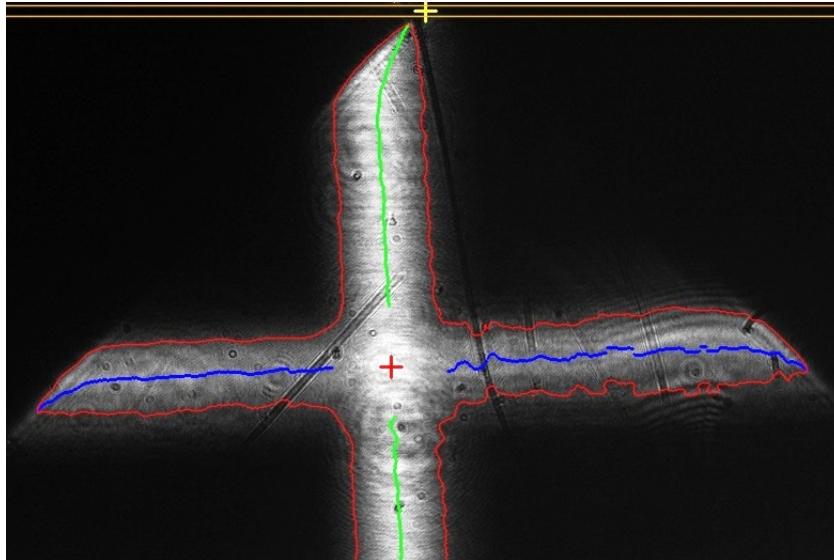
Die Ursache für das Entstehen solcher Fehlberechnungen liegt an der Form der Konturlinie. Wie bereits erläutert wurde, werden für die Bestimmung des Stützpunktes in jeder Zeile/Spalte zwei am weitesten voneinander liegende Konturpunkte berücksichtigt. Im Mittenbereich des Kreuzes befinden sich in jeder Zeile/Spalte des Bildes die Konturpunkte, die beide Kreuzachsen bilden. Da diese zwei Gruppen von Konturpunkten von dem Bildverarbeitungsprogramm nicht unterschieden werden können, entsteht als Folge solcher Überlappung ein Fehler bei der Ermittlung der Stützpunkte.

Das Kreuz in der Abbildung 5-10 ist leicht gedreht, dadurch ist der Überlappungsbereich der Kreuzachsen etwas größer, als die Breite der Kreuzachse. Bei weiterem Drehen wird dieser Bereich noch weiter vergrößert, so dass immer weniger korrekten Stützpunkte gefunden werden, was die Genauigkeit der weiteren Berechnungen negativ beeinflusst. Bei dem maximalen möglichen Drehwinkel des APOLLO-Projektors von  $\pm 2$  Grad wird der Überlappungsbereich einen relativ kleinen Anteil des Gesamtbildes belegen.

Die durch die Überlappung entstandenen fehlerhaften Stützpunkte lassen sich am einfachsten beseitigen, indem der betroffene Bereich aus den Berechnungen komplett ausgeschlossen wird. Der Überlappungsbereich wird anhand des Abstands zwischen zwei am weitesten voneinander liegenden Konturpunkten einer Zeile/Spalte ermittelt. Laut der Spezifikation der APOLLO-Projektoren beträgt die Breite der Laserlinienprojektion im fokussierten Bereich (1..6 m) maximal  $1\text{mm}^{47}$ . Die Größe eines Pixels beträgt  $5,3\ \mu\text{m}$  (siehe [Tabelle 4-1](#)). Für die Darstellung einer Laserlinie werden also maximal 189 Pixel bei nicht gedrehtem oder 190 Pixel bei um  $\pm 2$  Grad gedrehtem Kreuz benötigt. Der Abstand zwischen den äußersten Konturpunkten jeder Zeile/Spalte wird

<sup>47</sup> Vergl. LAP APOLLO\_inst-oper-manual\_MAN-1019-rev-6-de, Seite 34

ständig überwacht. Sollte er mehr als 190 Pixel betragen, wird die entsprechende Zeile/Spalte verworfen. Die mit diesem Verfahren korrigierten Linien der Stützpunkte sind in der Abbildung 5-11 dargestellt.



**Abbildung 5-11: Stützpunktlinien mit entferntem Mittenbereich**

Allerdings ist in der verwendeten Methode noch eine weitere Fehlerquelle vorhanden. Die Linien, die durch die ermittelten Stützpunkte gebildet sind, sind an drei der vier Kreuzachsen deutlich abgerundet. Die Achsen des in der Abbildung 5-11 dargestellten Kreuzes werden an drei Seiten durch die Grenzlinie des Aufnahmebereichs beschnitten. Dadurch entsteht bei jeder betroffenen Achse eine scharfe Spitze. Von dem Algorithmus wird der Spitzenbereich so interpretiert, als ob eine der Achsenkanten immer noch gerade läuft, während die andere sie schneidet. Dadurch wird der Abstand zwischen beiden Kanten immer kleiner, und der Mittelpunkt verschiebt sich immer weiter an die Seite der gerade laufenden Kante.

Dieser Fehler kann nicht korrigiert werden, da durch das Beschneiden der Kreuzachsen ein Teil des Informationsgehalts über die Laserlinien verloren geht. Aus diesem Grund muss der Bereich mit der entstandenen Spitze komplett entfernt werden. Dadurch wird die Anzahl der gefundenen Stützpunkte weiter reduziert (siehe Abb. 5-12). Die Länge des Spitzenbereichs (senkrechter Abstand zwischen der Spitze und dem Anfang des betroffenen Bereiches) ist stark von der Achsenbreite und dem Drehwinkel des Kreuzes abhängig, deswegen werden für die genaue Ermittlung komplexere Algorithmen benötigt. In diesem Projekt wird die Länge des Spitzenbereichs manuell eingestellt. Allerdings hat es sich aus dem Testverlauf ergeben, dass diese Größe nicht kritisch ist und somit nicht ständig angepasst werden muss. Bei den verwendeten APOLLO-Modulen wurde für sie ein optimaler Wert von 90 Pixeln (entspricht 4,77 mm) gesetzt.

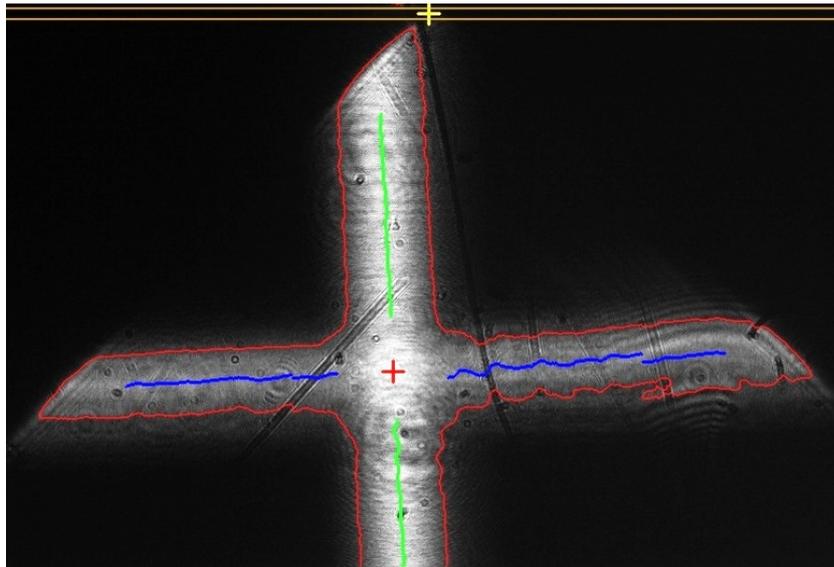


Abbildung 5-12: Stützpunktlinien mit entfernten Mitten- und Spitzenbereichen

An den verbleibenden Stützpunkten jeder Kreuzachse wird im nächsten Verarbeitungsschritt die Regressionsanalyse durchgeführt. Dabei werden die Geradengleichungen der Achsen ermittelt.

#### 5.4.3 Regressionsanalyse der Linienstützpunkte

Die Linien aus den im letzten Schritt ermittelten Achsenstützpunkten nähern sich schon den gesuchten Geraden, doch sie sind immer noch stark verstreut, um die Geradengleichungen daraus zu bilden. Eine Gerade wird mit folgender allgemeinen Gleichung beschrieben:

$$y = mx + b, \quad (5-1)$$

wobei  $m$  die Steigung der Geraden und  $b$  der Schnittpunkt der Geraden mit der Y-Achse ist. Die beiden Koeffizienten werden mit Hilfe der „Linearen Regression“ ermittelt.

Regressionsanalyse ist ein Verfahren zum Feststellen der Beziehungen zwischen mehreren Variablen. Damit lassen sich die Zusammenhänge quantitativ beschreiben oder Werte der abhängigen Variablen prognostizieren. Die **lineare Regression** ist ein Spezialfall des allgemeinen Konzepts der Regressionsanalyse, mit der versucht wird, eine abhängige Variable durch eine oder mehrere unabhängige Variablen zu erklären<sup>48</sup>.

Die Koeffizienten der Geraden  $m$  und  $b$  sind mit folgender Formel zu berechnen:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5-2)$$

<sup>48</sup> Vergl. <http://www.wikipedia.de/Regressionsanalyse> (Stand 14.07.2013)

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \quad (5-3)$$

$\bar{x}$  und  $\bar{y}$  sind die arithmetischen Mittelwerte der X- bzw. Y- Koordinaten aller Stützpunkte. Es ist dabei zu beachten, dass bei den Stützpunkten der senkrechten Linie die X- und Y- Werte gegenseitig vertauscht werden müssen, da das Koordinatensystem der senkrechten Kreuzachse sich von dem Koordinatensystem der waagerechten Kreuzachse unterscheidet (für Details siehe [Kapitel 3.3.1](#)).

Die ermittelten Geraden repräsentieren also die gesuchten Kreuzachsen (siehe Abb. 5-13) und deren Gleichungen werden bei dem Bestimmen der Lage des Laserkreuzes im Raum benötigt (ausführliche Beschreibung der Methode ist im [Kapitel 3](#) zu finden). Dafür werden lediglich noch zusätzliche Größen benötigt, wie die Koordinaten des Schnittpunkts beider Kreuzachsen und der Winkel zwischen den Achsen, die folgend berechnet werden:

$$X_s = \frac{b_2 - b_1}{m_1 - m_2} \quad (5-4)$$

$$Y_s = m_1 X_s + b_1 \quad (5-5)$$

$$\alpha = \arctan(m_1 - m_2) \quad (5-6)$$

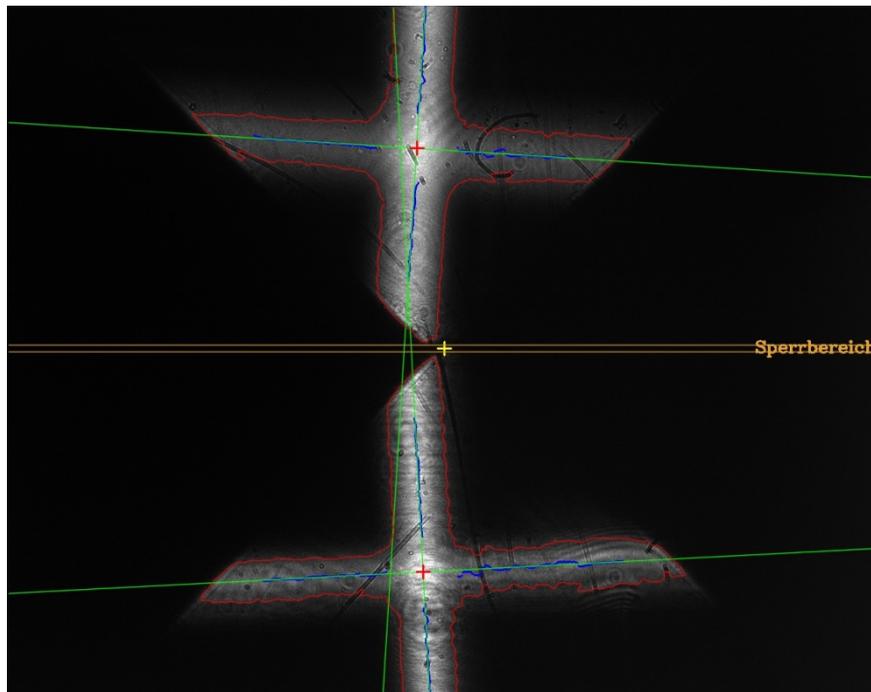


Abbildung 5-13: Bildaufnahme von zwei Kreuzen mit ermittelten Achsengeraden (grün)

#### 5.4.4 Detektieren der Laserlinien, Zusammenfassung

Für die Bestimmung der Lage mehrerer Laserkreuze im Raum sind die mit den Kameras aufgenommenen Figuren zu grob. Deswegen müssen die Schlüsselinformationen über die Positionen der Laserlinien aus den Bildaufnahmen herausgefiltert werden. Nachdem die Konturumrisse jeder Figur bestimmt sind, erfolgt die Detektion der Stützpunkte, die die Laserlinie beschreiben. Zur Ausschließung der fehlerhaften Stützpunkte werden die Suchbereiche begrenzt, so dass die Flächen, in denen Fehler vorkommen können, nicht berücksichtigt werden. Anschließend werden aus der ermittelten Stützpunkten die Geraden berechnet, die die Achsen von aufgenommenen Laserkreuzen eindeutig definieren.

Beim Detektieren der Laserlinien ist es zu beachten, dass nur eine der drei Kameras die Mittenbereiche von Kreuzen aufnehmen kann und in ihren Aufnahmen beide Kreuzachsen gleichzeitig zu sehen sind. Die restlichen Kameras nehmen jeweils eine Kreuzachse auf und haben als Ergebnis der Liniendetektion nur eine Gerade für jedes Laserkreuz (siehe Abb. 5-14).

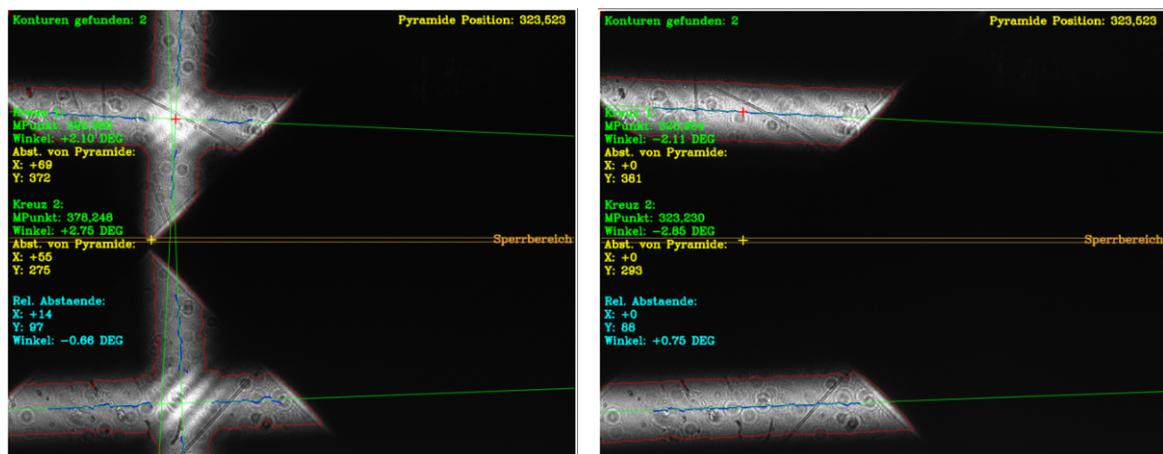


Abbildung 5-14: Beispiele der Liniendetektion zweier Laserkreuze

Die durch die Liniendetektion ermittelten Geradengleichungen werden anschließend analysiert und im komplexeren Algorithmus für die Bestimmung der Laserkreuzpositionen im Raum eingesetzt.

## 6 Inbetriebnahme der Justieranlage

In diesem Kapitel wird auf die konkrete Realisierung des Justiersystems und Testen seiner Funktionalität eingegangen. Nach einer kurzen Übersicht über den Aufbau der Programmoberfläche werden die einzelnen Programmmodi zur Kalibrierung des „optischen Phantoms“ und Durchführung des Justierverfahrens detailliert beschrieben. Ein Probeverfahren zum Justieren zweier Laserprojektoren wird durchgeführt. Anschließend wird die Vorgehensweise bei der Kalibrierung der Kameras im „Phantom“ erläutert.

### 6.1 Grafische Benutzeroberfläche (GUI)

Das GUI<sup>49</sup> des Ansteuerungsprogramms besteht aus einem Windows-Formular, in dem sich die Betriebsmodi des Programms sowie die Konfiguration für die Messung einstellen lassen. Per Menüleiste und sich im Formular befindliche Buttons können weitere Optionen zum Einstellen der Parameter des „Phantoms“ und Belichtungszeiten der Kameras aufgerufen werden. Die Informationen über angeschlossene Kameras sowie die aufgenommenen Laserlinien mit ergänzenden Hilfsinformationen können im Echtzeitmodus beobachtet werden (siehe Abb. 6-1).

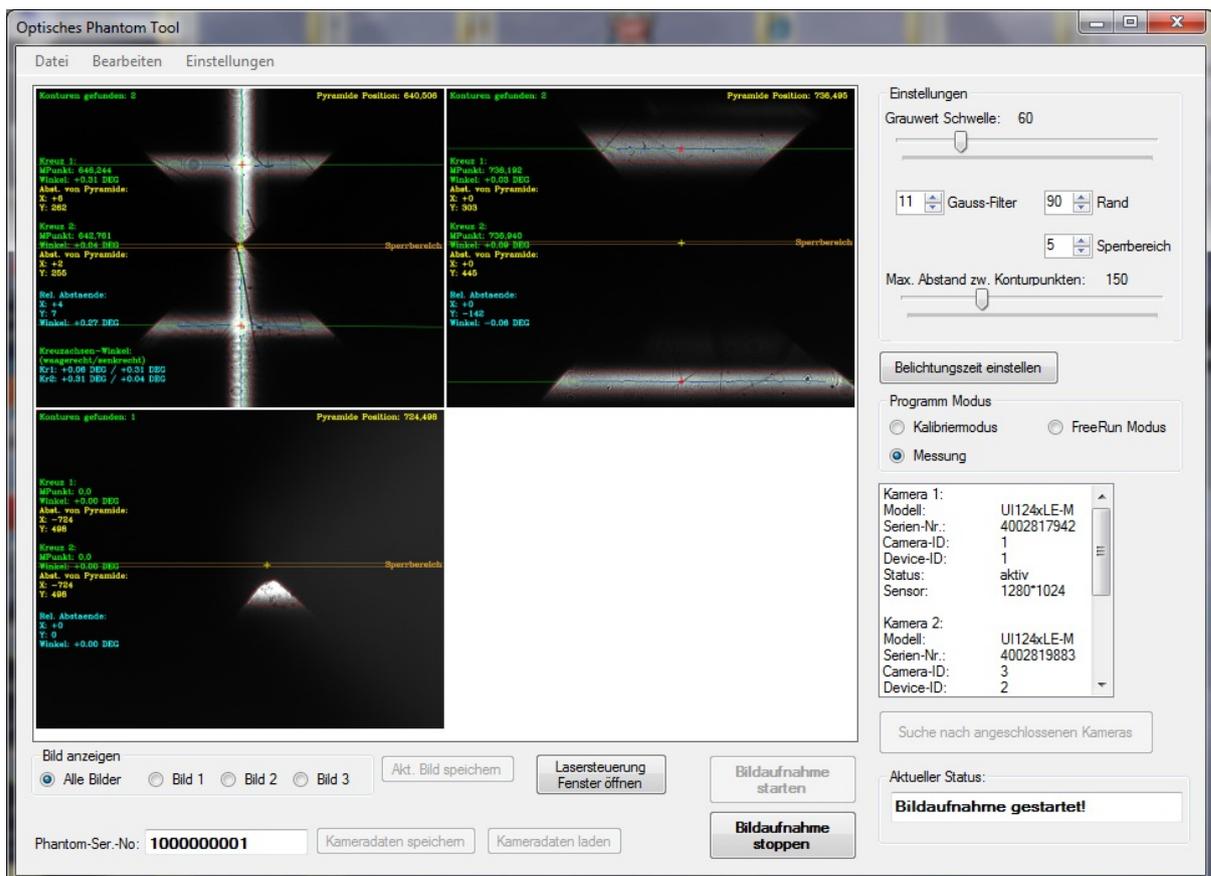


Abbildung 6-1: Programmtool zur Ansteuerung des "Phantoms", Hauptformular

<sup>49</sup> Abk. engl. „Graphical User Interface“

Die Bildaufnahme kann zum beliebigen Zeitpunkt mit einem Tastendruck gestartet und gestoppt werden. Der Betriebsmodus, die Einstellungen für die Bildverarbeitung und Belichtungszeiten können ebenfalls jederzeit beliebig verändert werden.

Das Programm kann in einem der drei verschiedenen Modi ausgeführt werden. In einem **FreeRun Modus** werden nur die aufgenommenen Bilder angezeigt und keine weiteren Informationen. Dieser Modus ist beim ersten Start der Software nutzbar, wenn das „Phantom“ und die Laserprojektoren aufeinander angepasst werden müssen, damit alle drei Kameras die Laserlinien überhaupt erfassen können. In diesem Modus finden keine Berechnungen statt, die hohe Rechenleistung benötigen, aus diesem Grund ist die Bildaufnahme mit einer höheren Framerate möglich, als bei anderen Modi. Es wirkt sich so aus, dass das „Phantom“ schneller auf die Bewegungen der Laserstrahlen reagiert.

Im **Messmodus** findet die eigentliche Ausmessung der Laserstrahlen und Berechnung der Lage von Laserkreuzen, wie in Kapitel 5 ausführlich beschrieben, statt. In diesem Modus werden alle ermittelten Linien und Informationen direkt in entsprechende Bilder eingezeichnet und können als Referenz fürs Einstellen der Bildverarbeitungsparameter dienen. Außerdem kann in diesem Modus ein weiteres Formular geöffnet werden, in dem die wichtigsten Informationen zu Laserstrahlen zusammengefasst und die Befehle zur Ansteuerung der Projektoren angezeigt sind.

Bei einer hochpräzisen Messung spielt die genaue Ausrichtung der Kameras in einem „Phantom“ die entscheidende Rolle. Es ist technisch aber nicht möglich, die Kameras so auszurichten, dass ihre Sensoroberflächen exakt parallel zueinander sind und die Spitzen der Pyramidenspiegel sich genau über dem Mittelpunkt des Sensors befinden. Doch diese Abweichungen können anhand von speziellen Bildaufnahmen registriert werden und zunächst als entsprechende Offset-Werte im Programm eingesetzt werden. Für diesen Zweck wird der **Kalibrierungsmodus** benutzt. Die detaillierte Beschreibung der Kalibrierungsverfahren erfolgt im weiteren Text.

## 6.2 Anschließen der Kameras

Bevor die Bildaufnahme gestartet werden kann, wird geprüft, ob alle drei Kameras an den Rechner angeschlossen sind, denn die vollständige Berechnung kann erst dann erfolgen, wenn genau drei Bildaufnahmen zur Verfügung stehen.

Jede Kamera verfügt über die einmalige Seriennummer, die nicht verändert werden kann. Nach dieser Nummer werden die Kameras von der Treibersoftware erkannt. Für die bessere Übersichtlichkeit wird jede Kamera eines „Phantoms“ zusätzlich mit sogenannter „Kamera ID“ bezeichnet – einer Nummer zwischen 1 und 255, die in EEPROM der

Kamera gespeichert wird. Das Ansteuerungsprogramm des „Phantoms“ unterscheidet die Kameras nur nach ihren ID-Nummern.

Die Einsatzorte der Kameras in Abhängigkeit von ihrer ID-Nummer sind von der „Phantom“-Software nach folgendem Muster festgesetzt:

- Die Kamera mit der **ID=1** (im weiteren Text „**Kamera 1**“ genannt) befindet sich auf der X-Achse des „Phantoms“ und erfasst den Mittenbereich der Laserkreuze (vgl. Abb. 4-5).
- Die Kamera mit der **ID=2** (im weiteren Text „**Kamera 2**“ genannt) befindet sich auf der Z-Achse einmontiert und nimmt die waagerechten Kreuzachsen auf.
- Die Kamera mit der **ID=3** (im weiteren Text „**Kamera 3**“ genannt) befindet sich auf der Y-Achse einmontiert und nimmt die senkrechten Kreuzachsen auf.

Die ID-Nummer kann von dem Benutzer mit Hilfe des Tools „uEye Camera Manager“ (herunterladbar auf der Internetseite des Kameraherstellers) für jede Kamera frei ausgewählt werden. Für die korrekte Programmfunktion ist es aber wichtig, dass die Kameras die ID von 1 bis 3 haben, und keine zwei Kameras die gleiche ID besitzen.

### 6.3 Programmstart

Beim Starten des Programms wird zunächst die Datei ausgelesen, die alle Informationen über das angeschlossene „Phantom“ enthält. Das „Phantom“ wird als ein System, bestehend aus drei Kameras, betrachtet. Zu den Informationen, die es beschreiben, gehören die Seriennummer, Positionen und Ausrichtungen aller Kameras innerhalb des „Phantoms“ sowie die Lagen der Pyramidenspiegelspitzen über die Kamerasensoren, die bei der Kalibrierung der Kameras festgesetzt sind. Alle Werte werden automatisch ins Programm geladen und müssen nicht erneut bei jedem Programmstart ermittelt oder eingegeben werden.

Jedes „Phantom“ besitzt eine zehnstellige Seriennummer, mit der es eindeutig identifiziert ist. Diese Seriennummer soll beim Programmstart von dem Benutzer eingegeben werden, damit das Programm auf den entsprechenden Datenblock der Informationsdatei zugreifen kann.

Nun kann die Messung gestartet werden. Nach der Auswahl des Modus und Startbefehls werden die angeschlossenen Kameras nochmal ermittelt und initialisiert, anschließend startet die eigentliche Bildaufnahme.

## 6.4 Messen der Lage zweier Laserkreuze

Alle Messungen und Kalibrierungen des „Optischen Phantoms“ sind bei der Firma LAP in einem Testraum durchgeführt, der mit APOLLO-Projektionssystem ausgestattet ist. Die Justieranlage wird auf einem Untersuchungstisch platziert, der den nachgebauten CT-Tisch darstellt. Das Testen des „Phantoms“ erfolgt mit zwei APOLLO BLUE-Projektoren, die den Tisch seitlich aus gegenüberliegenden Richtungen bestrahlen. Vor dem Einsatz des „Optischen Phantoms“ werden die Projektoren manuell mit Hilfe des Wilke-Phantoms komplanar ausgerichtet (vgl. [Kapitel 2-5](#)). Da kein CT-Gerät zur Verfügung steht, wird die Komplanarität rein visuell eingeschätzt, dadurch kann die Genauigkeit der Ausrichtung nicht besser als  $\pm 500 \mu\text{m}$  sein.

Anschließend wird das Wilke-Phantom durch das „Optische Phantom“ ersetzt. Nachdem die Justieranlage mit einer Wasserwaage waagrecht ausgerichtet worden ist und die Laserstrahlen auf die Kamerasensoren fokussiert worden sind, werden die ersten Bildaufnahmen gemacht. Die Aufnahme der Kamera 1 ist in der Abbildung 6-2 dargestellt.

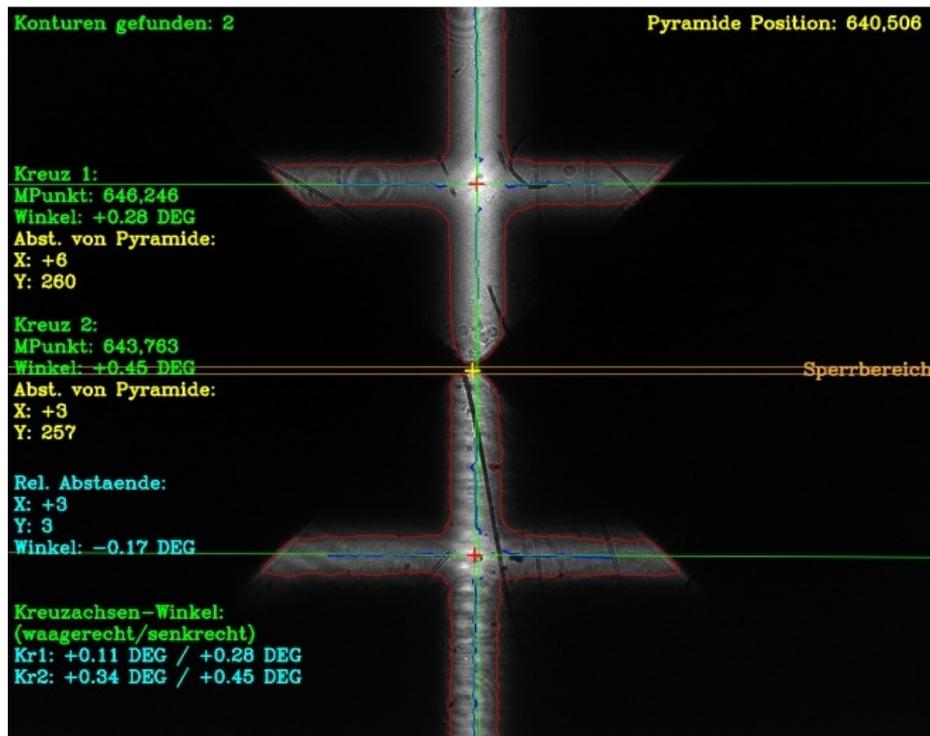


Abbildung 6-2: Bildaufnahme zweier komplanarer Laserkreuze, Mittenbereich

Alle gemessenen Daten für jedes Kreuz sind direkt ins Bild eingetragen. Die absoluten Werte von X- und Y-Abständen sind bezogen auf die Pyramidenspitze, die in der Abbildung mit einem kleinen gelben Kreuz markiert ist, gemessen. Für die Rotationswinkel sind die Mittelwerte der ausgemessenen Rotationswinkel der senkrechten und waagerechten Kreuzachsen genommen. Eine interne Prüfung des Programms mit

dem Debugger hat gezeigt, dass sich die beiden Winkel in jedem Kreuz voneinander um 90 Grad mit der Abweichung  $< 0,05$  Grad unterscheiden. Solch eine kleine Abweichung ergibt den Unterschied von ca. 0,8 mm zwischen Soll- und Ist-Wert der Laserlinie bei dem Abstand 1 m von der Kreuzmitte, was allerdings vernachlässigt werden kann.

Die relativen Abstände zwischen zwei Kreuzen sind aus den Werteunterschieden der absoluten Abstände der Kreuzachsen berechnet. Die relativen Werte von 3 Pixel in X- und Y-Richtungen entsprechen den Abständen von  $3 \times 5,3 \mu\text{m} = 15,9 \mu\text{m}$ , was bei dem angestrebten Genauigkeitsgrad der Justieranlage von  $\pm 100 \mu\text{m}$  als ein hervorragendes Ergebnis betrachtet werden kann.

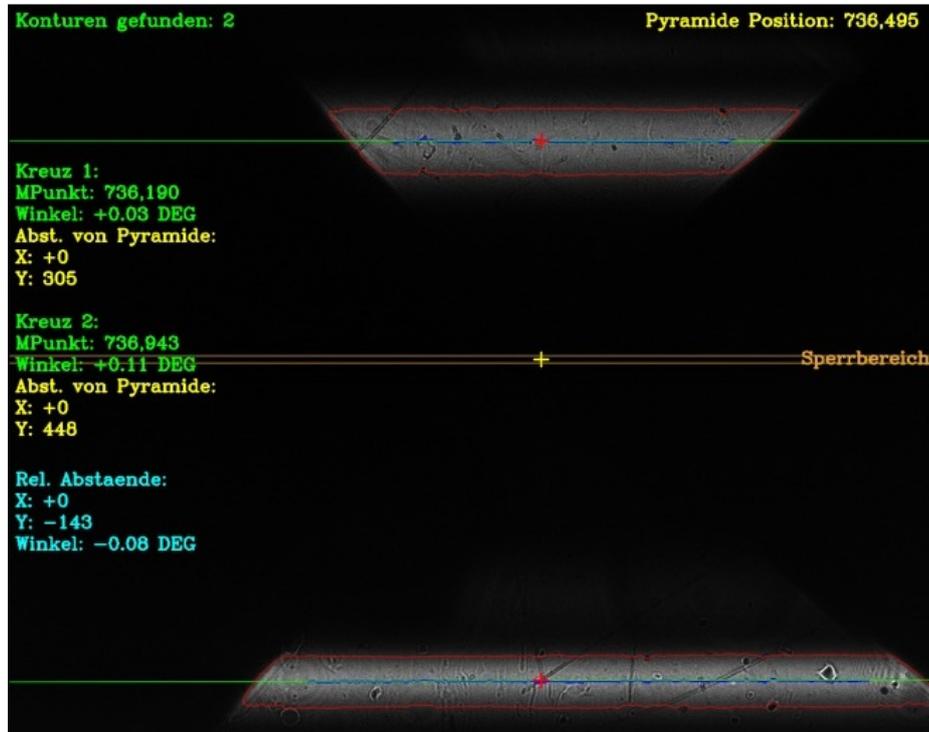
Der Unterschied im Rotationswinkel beträgt 0,17 Grad, was bei dem Abstand 1m von den Kreuzmitten den Linienunterschied von ca. 2,9 mm ergibt. Solche Abweichung ist sogar mit bloßem Auge sichtbar und ist bei der Justierung völlig unakzeptabel. Doch bei der manuellen Überprüfung der Komplanarität konnte diese Abweichung nicht detektiert werden. Das bedeutet, dass sie von dem Justiersystem generiert ist. Dafür sind folgende Ursachen vorstellbar:

- Entstehende Fehler beim Detektieren der Laserlinien. Bei den Versuchen, die Laserkreuze nach links/rechts und nach oben/unten zu bewegen, blieb der Winkelunterschied erhalten, was bedeutet, dass die Verschmutzungen der Optik wenig Auswirkung auf die Genauigkeit der Liniendetektion haben. Auch die kleineren Veränderungen der Parameter für die Bildverarbeitung haben keine großen Auswirkungen auf die Rotationswinkel gezeigt.
- Die Kameras und/oder die Spiegelpyramiden sind falsch positioniert. Es kann nicht garantiert werden, dass die Metallplatten des „Phantoms“ absolut flach sind und die Kamerasensoren exakt senkrecht/waagrecht ausgerichtet sind. Außerdem muss nachgeprüft werden, ob die Spiegelpyramide im Kameragehäuse korrekt ausgerichtet ist und alle ihre spiegelnden Seiten den Winkel von 45 Grad mit dem jeweiligen Kamerasensor bilden. Das Einschätzen aller dieser Faktoren erfolgt durch ein spezielles Kalibrierungsverfahren. Die grundlegenden Ansätze zum Kalibrieren der Kameras im „Phantom“ werden im nächsten Unterkapitel diskutiert.

Die senkrechten und waagerechten Winkel sind im Bild für jedes Kreuz zur besseren Anschaulichkeit getrennt angegeben (siehe Abb. 6-2, die unteren zwei Textzeilen). Für das Berechnen dieser Werte sind Bildaufnahmen aller Kameras benutzt.

Die Aufnahme der Kamera 2, die für die waagerechten Kreuzachsen zuständig ist, ist in der Abbildung 6-3 aufgeführt. Aus dieser Aufnahme können nur die absoluten und

relativen Werte der Rotationswinkel und Y-Abstände entnommen werden. Die Y-Abstände sind bezogen auf die Pyramidenspitze gemessen, direkt in einer Spalte des Bildes, in der sich die Pyramidenspitze befindet. Die entsprechenden Bezugspunkte der Laserlinien sind mit kleinen roten Kreuzen markiert.



**Abbildung 6-3: Bildaufnahme zweier komplanarer Laserkreuze, waagerechte Achsen**

Es ist zu beachten, dass die von Kamera 2 gemessenen absoluten Y-Abstände sich um 45/191 Pixel unterscheiden, was den resultierenden relativen Abstand von 143 Pixeln ergibt (entspricht 0,76 mm). Dies ergibt den Unterschied in senkrechten Neigungswinkeln beider Kreuze von 0,17 Grad. Genau wie die Abweichung der Rotationswinkel konnte auch diese Abweichung mit der manuellen Überprüfung der Komplanarität nicht nachgewiesen werden. Auch die Unterschiede in gemessenen Rotationswinkeln sind deutlich sichtbar (vgl. 0,28/0,45 Grad bei Kamera 1 mit 0,03/0,11 Grad bei Kamera 2). Das kann darauf hinweisen, dass die absolute Ausrichtung der Kamera 2 im „Phantom“ sowie die Ausrichtungen der Kameras 1 und 2 zueinander fehlerhaft sind und mit dem entsprechenden Kalibrierungsverfahren nachgemessen werden müssen.

Mit der Kamera 3 sind die senkrechten Kreuzachsen aufgenommen (siehe Abb. 6-4). Das erste Laserkreuz ist gar nicht aufgenommen und nur ein kleiner Teil der Kreuzachse des zweiten Kreuzes passt in die Bildaufnahme rein. Darin zeigt sich ein Konstruktionsfehler, der bei der Projektion des „Optischen Phantoms“ nicht berücksichtigt wurde. Dieser Fehler ist mit der Abbildung 6-5 veranschaulicht.

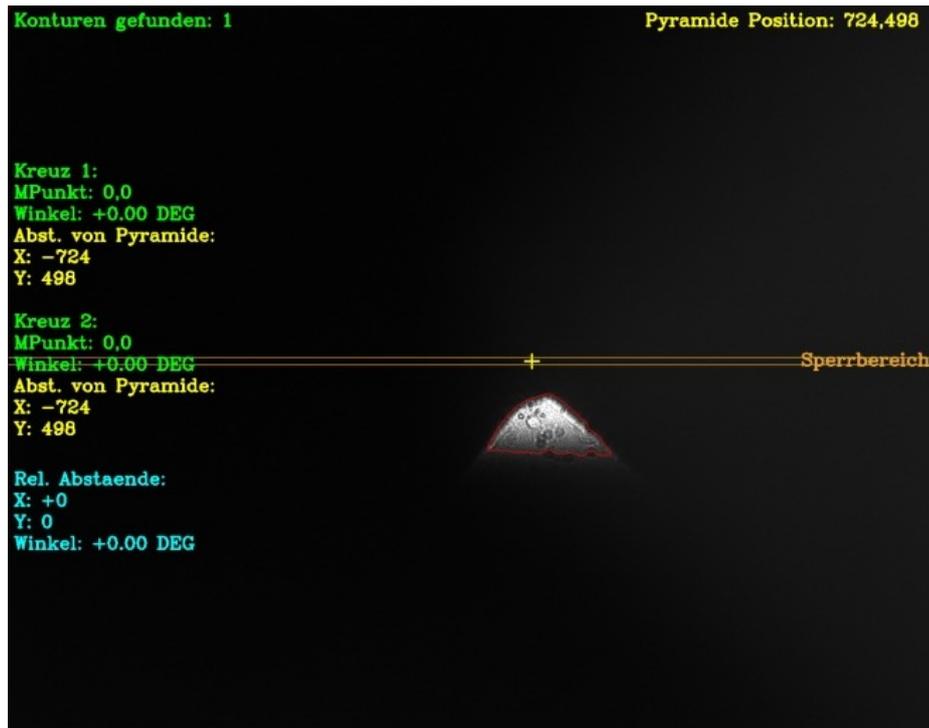


Abbildung 6-4: Bildaufnahme zweier komplanarer Laserkreuze, senkrechte Achsen

Da die optische Fläche eines Kamerasensors die Maße von einigen Millimetern hat (5,427 mm x 6,784 mm für uEye UI-1242LE-M), wird für die Spiegelung der Laserstrahlen nicht die ganze Oberfläche der Pyramidenspitze benutzt, sondern nur ein kleiner Bereich in der Nähe der Pyramidenspitze (in der Abb. 6-5 blau gefärbte Bereiche). Bei dem verwendeten Aufnahmeprinzip entspricht die Breite dieses Bereichs bei Kamera 1 der kürzeren Seite des Sensors und beträgt somit maximal 5,427 mm (in der Abb. 6-5 durch blaue gestrichelte Linien dargestellt).

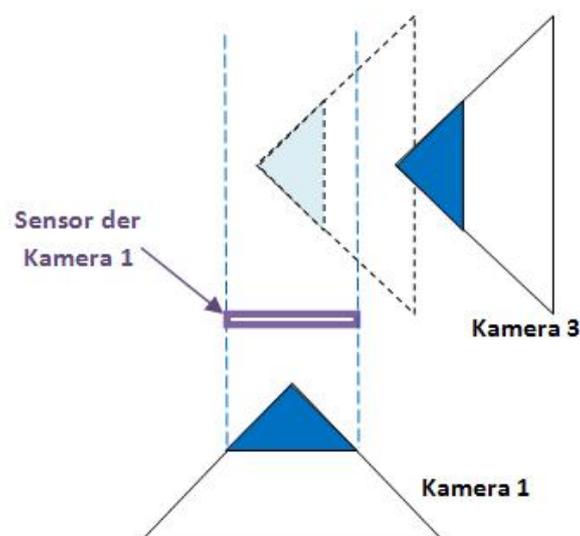


Abbildung 6-5: Fehler der Positionierung der Pyramidenspiegel im "Phantom"

Bedingt durch den Aufbau des Gerüsts ist die Pyramide der Kamera 3 um 90 Grad zur Pyramide der Kamera 1 gedreht (vgl. Abb. 4-5). Die Breite des Nutzbereichs des Pyramidenspiegels von Kamera 3 beträgt ebenfalls 5,427 mm bei der Höhe von 2,714 mm (berechnet aus dem rechtwinkligen Dreieck, gebildet durch eine Spiegelseite der Pyramide).

Wenn ein Laserstrahl die Pyramide der Kamera 1 von vorne trifft, muss die senkrechte Kreuzachse gleichzeitig in den Nutzbereich der Pyramide von Kamera 3 fallen. Um diese Bedingung zu erfüllen, müssen die Nutzbereiche beider Pyramiden direkt übereinander liegen (siehe Abb. 6-5, gestrichelte Pyramide). Da die Länge des Nutzbereichs der Kamera 3 halb so groß ist wie die Breite des Nutzbereichs von Kamera 1, wird der letztere somit um die Hälfte verringert, aber die senkrechte Kreuzachse ist dann von beiden Kameras sichtbar.

Die Gehäuse für alle drei Kameras wurden nach derselben Zeichnung gebaut. Dabei wurde nicht berücksichtigt, dass beim Einbau dieser Gehäuse in das bereits erstellte Gerüst die Pyramide der Kamera 3 so verstellt ist, dass ihr Nutzbereich nicht bzw. nur teilweise den Nutzbereich der Kamera 1 überlappt. Das bewirkt, dass die senkrechten Kreuzachsen nicht gleichzeitig von beiden Kameras registriert bzw. nicht vollständig aufgenommen werden können.

Mit dem entstandenen Fehler ist die komplette Ausmessung der Lage eines Laserkreuzes im Raum nicht möglich, da die entscheidenden Informationen über die senkrechten Kreuzachsen komplett bzw. teilweise fehlen. Das rechnerische Kompensieren des Fehlers ist ebenfalls nicht möglich. Der einzige Weg, den Fehler zu beseitigen, ist der Umbau des Gehäuses der Kamera 3.

Die Tatsache, dass ein Laserkreuz teilweise aufgenommen ist, während das andere komplett fehlt, zeigt auf die Notwendigkeit der Kalibrierung der Kamera 3.

### **6.5 Befehle für die Ansteuerung des Lasersystems**

Die Hauptaufgabe des zu entwickelnden „Optischen Phantoms“ ist die Unterstützung beim Justieren der Lasersysteme. Für den Operator sind vor allem nicht die ermittelten Daten über die Positionen der Laserlinien interessant, sondern die Handlungsschritte, die unternommen werden müssen, um das Lasersystem korrekt zu justieren.

Die Ansteuerung der APOLLO-Module mit insgesamt zehn Befehlen erfolgt über eine Fernbedienung. Für den Operator wäre es also am bequemsten, die nötigen Befehle direkt vom Bildschirm ablesen zu können. Außerdem ist es vorstellbar, bei einer weiteren Entwicklung der Justieranlage die Fernbedienung abzuschaffen und das Justierverfahren

vollständig zu automatisieren. Dabei wird das Lasersystem über die Befehle angesteuert, die von der Justiersoftware generiert sind.

Zur Anzeige der Ansteuerungsbefehle wurde die Software um ein zusätzliches Formular erweitert (siehe Abb. 6-6).

The screenshot shows a software window titled 'Lasersteuerung'. It contains two main sections: 'Laserkreuze Steuerung' and 'Kamera Positionierung (nach XZ-Winkel)'. The 'Laserkreuze Steuerung' section has three columns: 'Rotate', 'Tilt', and 'Move'. The 'Kamera Positionierung' section has four columns: 'Kamera 1', 'Kamera 2', 'Kamera 3', and 'Positionierung'. A 'Fenster schliessen' button is located at the bottom right.

Laserkreuze Steuerung			
	Rotate	Tilt	Move
<b>Kreuz 1:</b>	Im Uhrzeigersinn 0,34 DEG	DOWN / RIGHT -0,08 DEG/-0,32 DEG	OK / OK 0,03 mm/-0,02 mm
<b>Kreuz 2:</b>	OK -0,02 DEG	DOWN / RIGHT -0,39 DEG/-0,32 DEG	OK / OK -0,03 mm/0,02 mm

Kamera Positionierung (nach XZ-Winkel)				
	Kamera 1	Kamera 2	Kamera 3	Positionierung
<b>Kreuz 1:</b>	0,34 DEG	0,02 DEG	0 DEG	not OK
<b>Kreuz 2:</b>	-0,02 DEG	0,12 DEG	0 DEG	OK

Abbildung 6-6: Formular zur Ausgabe der Ansteuerungsbefehle

Neben den generierten Befehlen und zusammengefassten Messdaten werden in der unteren Hälfte des Formulars die von allen Sensoren ermittelten Rotationswinkel der Laserkreuze aufgeführt. Im Idealfall müssen diese Winkel bei jedem Kreuz gleich sein (abgesehen von erlaubten Toleranzen). Die größeren Werteabweichungen deuten auf fehlerhafte Ausrichtung der Kameras.

Das Prinzip, nach dem die Ansteuerungsbefehle bestimmt werden, ist im Anhang 2: "Generieren der Befehle für das Laseransteuerungssystem" beschrieben.

## 6.6 Kalibrieren der Kameras im „Phantom“

### 6.6.1 Ausgleich der Fehler in Kameraausrichtung

Wie im letzten Kapitel gezeigt wurde, kann kein „Phantom“ absolute korrekte Werte über die Lagen der aufgenommenen Laserlinien liefern. Die Ursache für die entstehenden Fehler liegt an der nicht ausreichend präzisen Ausrichtung der Kameras innerhalb des „Phantoms“. Die Metallplatten, aus denen das Phantomgerüst besteht, sind nicht ideal flach und es kann nicht garantiert werden, dass darauf befestigte Kameras absolut parallel zueinander liegen. Als Ergebnis weist eine Laserlinie, die von zwei Sensoren zum

gleichen Zeitpunkt aufgenommen wurde, in jeder Bildaufnahme eine unterschiedliche Höhe und einen unterschiedlichen Neigungswinkel auf. Die Situation ist zusätzlich dadurch erschwert, dass auch die Spiegelpyramiden innerhalb der Kameragehäusen schief zu den Kamerasensoren stehen können. Dadurch können weitere Abweichungen entstehen.

Es ist sehr schwer bzw. nicht möglich, die Unebenheiten der Gerüstplatten und Kameragehäusen mechanisch komplett zu entfernen. Es wäre viel einfacher, die Positions- und Winkelunterschiede in den Bildaufnahmen der Laserlinien zu messen und diese bei folgenden Berechnungen zu kompensieren. Als Referenzstrahlungsquellen für solche „Kalibrierung“ können die Laserprojektoren dienen, deren Laserkreuze komplanar und die Kreuzachsen exakt senkrecht/waagrecht sind.

Nachdem die untere Gerüstplatte des „Phantoms“ mit der Wasserwaage waagrecht ausgerichtet ist, erfolgt die Bildaufnahme beider Laserkreuze. Die aus den Bildern ermittelten Neigungswinkel und Höhenunterschiede werden als Offsets in der Datei gespeichert, die alle Informationen über das „Phantom“ enthält. Diese Offsetwerte werden bei jedem Einsatz des „Phantoms“ aufgerufen und bei den Berechnungen eingesetzt.

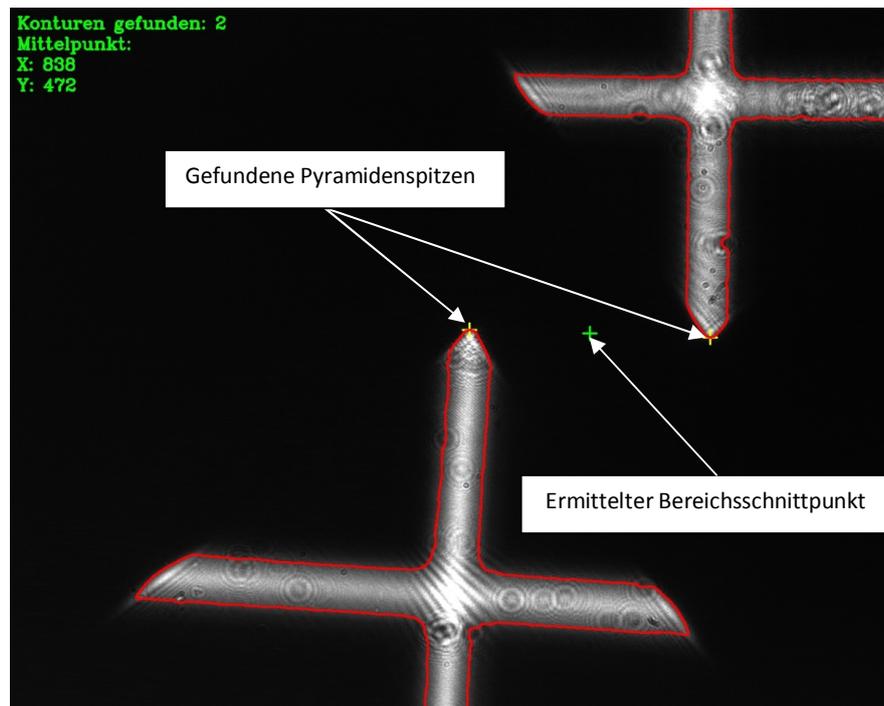
Das beschriebene Kalibrierungsverfahren kann jedoch nicht bei der Firma LAP durchgeführt werden, da keine Laserquellen zur Verfügung stehen, die die gestellten Anforderungen an Komplanarität und Ausrichtung mit höherer Präzision erfüllen. Die maximale mögliche Genauigkeit von  $\pm 500 \mu\text{m}$  bei der Ausrichtung der Laserstrahlen mit dem Wilke-Phantom ist für die Kalibrierung der Kameras nicht ausreichend.

### **6.6.2 Ermitteln der Position des Bereichsschnittpunktes in einem Kamerasensor**

Durch den Einsatz des viereckigen Pyramidenspiegels für die Umlenkung der Laserstrahlen ist das aufgenommene Bild in vier dreieckige Bereiche aufgeteilt, die einen gemeinsamen Punkt haben (vgl. [Abb. 5-2](#)). Dieser Schnittpunkt wird durch die Lage der Pyramidenspitze über den Kamerasensor festgelegt und soll sich idealerweise genau in der Mitte des aufgenommenen Bildes befinden. Doch in der Realität ist die Pyramidenspitze mehr oder weniger versetzt, so dass der Schnittpunkt weit von der Bildmitte liegt. Seine Position hat aber eine große Bedeutung für die Liniendetektion, denn er gilt als Bezugspunkt für die Aufteilung des Bildes, das Trennen der Konturlinien (siehe [Kap. 5.3.7](#)) und das Messen der Linienabstände (siehe [Kap. 6.4](#)).

Wenn die Pyramidenspitze mit einem Laserstrahl beleuchtet wird, ist sie auch im aufgenommenen Bild sichtbar. Dieser Effekt kann bei der Positionsermittlung ausgenutzt werden.

Das Verfahren zur Ermittlung des Schnittpunktes wird mit zwei komplanar ausgerichteten Laserprojektoren durchgeführt. Das Programm wird in den Kalibrierungsmodus umgeschaltet und die Bildaufnahme gestartet. Eine Kamera im Gehäuse wird auf den Untersuchungstisch gestellt und von beiden Seiten bestrahlt, so dass die Laserstrahlen beidseitig durch die Pyramidenspitze laufen und die aufgenommenen Kreuze sich im oberen und unteren Bildbereich befinden (siehe Abb. 6-7).



**Abbildung 6-7: Ermitteln des Bereichsschnittpunktes mit zwei Laserstrahlen**

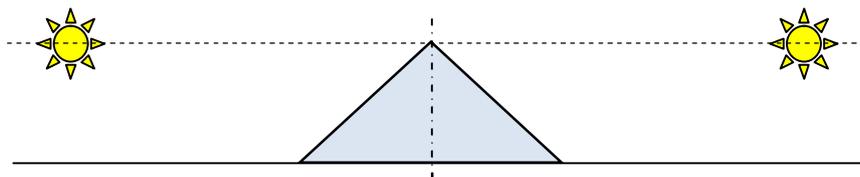
Im Kalibrierungsmodus werden genau wie bei normaler Messung die Konturen aller vorhandenen Figuren ermittelt, doch jetzt wird nach den Spitzen gesucht. Da es bekannt ist, dass die Figuren nur im oberen und unteren Bildbereiche liegen, wird das Bild zeilenweise untersucht. Die Vorgehensweise unterscheidet sich dabei in Abhängigkeit von der Anzahl der gefundenen Figuren:

- Wenn nur eine Figur gefunden wurde, wird angenommen, dass die Konturen von beiden Figuren zusammengeschmolzen sind. In diesem Fall wird das komplette Bild zeilenweise gescannt, dabei wird auf die engste Stelle gesucht (die Zeile, wo sich die äußeren zwei Konturpunkte am nächsten sind). Die gefundene Zeile (oder die mittlere Zeile eines Zeilenbereichs, in dem die Abstände zwischen äußeren Konturpunkten gleich sind) wird als X-Koordinate des gesuchten Schnittpunktes angenommen. Die Y-Koordinate wird als die Mitte zwischen zwei äußeren Konturpunkten in der gefundenen Zeile gesetzt.

- Wenn zwei oder mehr Figuren gefunden sind, wird jeder Bildbereich einzeln untersucht. Im oberen Bildbereich wird die Zeile ermittelt, in der sich der am tiefsten liegende Konturpunkt (oder mehrere Punkte) befindet (der Punkt, der die größte Y-Koordinate hat), im unteren Bereich – die Zeile mit dem/den am höchsten liegenden Punkt(en) (der Punkt mit kleinster Y-Koordinate). Dabei wird nicht berücksichtigt, ob die gefundenen Konturen zur aufgenommenen Laserlinie gehören oder die Störungsquelle umkreisen. Die ermittelten Zeilen werden als X-Koordinaten der Figurenspitzen angenommen (in der Abbildung 6-7 mit gelben Kreuzen markiert). Die entsprechenden Y-Koordinaten werden als die Mitten zwischen zwei äußeren Konturpunkten in jeweiliger Zeile gesetzt. Anschließend wird der Mittelwert beider Figurenspitzen berechnet und als der gesuchte Schnittpunkt gesetzt (in der Abbildung 6-7 mit grünem Kreuz markiert).
- Sind im Bild keine Figuren gefunden, werden die Koordinaten des Schnittpunktes auf (0,0) gesetzt, was von dem Programm als ein fehlender Schnittpunkt definiert wird.

Beim Ermitteln des Bereichsschnittpunktes ist die Lage der Strahlungsquellen bezüglich der Spiegelpyramide von großer Bedeutung. Folgende Bedingungen müssen bei der Ausrichtung der Kameragehäuse und Laserstrahler erfüllt werden (siehe Abb. 6-8):

- Beide Laserprojektoren befinden sich auf der gleichen Höhe und sind komplanar ausgerichtet.
- Die Basis der zu beleuchtenden Spiegelpyramide liegt in waagerechter Ebene und ihre Spitze befindet sich auf gleicher Höhe mit Laserquellen.



**Abbildung 6-8: Ausrichtung der Strahlungsquellen im Kalibrierungsmodus**

Sind die beiden Bedingungen nicht erfüllt, tritt die optische Verzerrung ein (vgl. Anhang 1: „Optische Verzerrungen in aufgenommenen Bildern“, Punkt 2) und der Schnittpunkt wird senkrecht versetzt.

Die Ermittlung des Schnittpunktes kann entweder mit Laserstrahlen, die auf die Pyramidenspitze fokussiert sind, oder auch mit nicht fokussierten Laserstrahlen durchgeführt werden. Die dabei erhaltenen Ergebnisse unterscheiden sich gering. Nähere

Informationen zu beiden Methoden sind im Anhang 3: „Ermitteln des Bereichsschnittpunktes eines Kamerasensors“ zu finden.

## 7 Struktur und Ablauf der Anwendersoftware

Nach einem kurzen Überblick über die Entwicklungsumgebung und Programmiersprache, die bei der Softwareentwicklung verwendet wurden, wird der Programmaufbau anhand der Beschreibung einzelner Softwaremodule detailliert vorgestellt. Anschließend wird auf den Programmablauf und die Zusammenarbeit einzelner Programmblöcke eingegangen, wo die Kontrolle über den parallelen Ablauf mehrerer Prozesse von großer Bedeutung ist.

### 7.1 Entwicklungsumgebung und Programmiersprache

Die Software für das „optische Phantom“ wurde mit .NET unter dem Einsatz der Programmiersprache C++ erstellt.

.NET ist eine von der Firma Microsoft entwickelte Software-Plattform zur Entwicklung und Ausführung von Anwendungsprogrammen. .NET besteht aus einer Laufzeitumgebung (*Common Language Runtime*), in der die Programme ausgeführt werden, sowie einer großen Sammlung von Klassenbibliotheken, Programmierschnittstellen und Dienstprogrammen. .NET ist auf verschiedenen Plattformen verfügbar und unterstützt die Verwendung einer Vielzahl von Programmiersprachen, wie C/C++, C#, VB und Java<sup>50</sup>. Die Software-Plattform wird vom Hersteller als eine IDE<sup>51</sup> in Form des *Microsoft Visual Studio .NET* angeboten. In diesem Projekt wurde *Visual Studio 2010* (VS2010) eingesetzt.

Unter .NET ist es möglich, die Anwendungen für Windows durch Verwendung der neuen *Windows-Forms*-Klassen komfortabel zu erstellen. Der Aufbau einer grafischen Benutzeroberfläche wird nach einem „Baukastenprinzip“ realisiert. Alle nötigen Formularelemente (Knöpfe, Textfelder u.a.) werden aus der sogenannten *Toolbox* geholt und auf der Benutzeroberfläche positioniert. Über das Eigenschaftfenster können die für jedes Element spezifischen Parameter verändert werden.

Die Steuerelemente können außerdem unter bestimmten Bedingungen die *Ereignisse* auslösen. Ein Ereignis aktiviert eine Programmfunktion, die anschließend die Berechnungen durchführt oder den Programmablauf beeinflusst. Ein Beispiel für einen Ereigniselement ist „*Timer*“, der dasselbe Ereignis in regelmäßigen Zeitabständen auslöst. Das Element „*Button*“ (Knopf) löst dagegen das Ereignis erst aus, wenn es durch den Benutzer mit der Maus betätigt wird.

Als Programmiersprache für das Projekt standen am Anfang der Arbeit C#, Java und C/C++ zur Auswahl. Die ersten zwei sind rein objektorientierte Sprachen, was die höhere Datensicherheit anhand der Datenverkapselung anbietet. Doch zur Anwendung wurde

---

<sup>50</sup> Vergl. <http://www.wikipedia.de/.NET> (Stand 23.07.2013)

<sup>51</sup> Integrierte Entwicklungsumgebung (Abkürzung von engl. „Integrated Development Environment“)

C/C++ ausgewählt. Erstens wird ein großer Teil der professionellen Softwareentwicklung auf der Basis dieser Hochsprache durchgeführt<sup>52</sup> und auch bei der Firma LAP ist diese C++ am weitesten verbreitet. Zweitens ist C++ sehr flexibel und ist sowohl für prozedurale als auch für objektorientierte Anwendungsentwicklung geeignet. Allerdings handelt sich bei Toolboxelementen immer um die Objekte der jeweiligen Klassen, so dass bei der Entwicklung der *Windows-Forms-Anwendung* die objektorientierte Programmierung zum Einsatz kommt.

Ein weiterer Grund für die Anwendung der Hochsprache C++ für die Erstellung der Software zum „optischen Phantom“ liegt darin, dass die im Projekt eingesetzten OpenCV-Bibliotheken speziell für das Programmieren in C/C++ entwickelt wurden und deren Benutzung mit anderen Sprachen ohne weitere Maßnahmen nicht möglich ist. Außerdem ist C++ als Programmiersprache für Kamera-API<sup>53</sup> von dem Hersteller der uEye-Kameras, die in diesem Projekt verwendet werden, empfohlen, weil sie den effizienteren Zugriff auf alle Kamerafunktionen bietet<sup>54</sup>.

### 7.2 Softwaremodule

Die komplette Software besteht aus mehreren Modulen, die in zwei Gruppen aufgeteilt sind. Ein Modul beinhaltet eine Quelldatei, wo sich standardmäßig alle dazugehörigen Funktionen befinden, und eine Header-Datei mit Funktionsprototypen. Eine Ausnahme bilden die Module der ersten Gruppe, die für die Darstellung der grafischen Oberfläche einzelner Windows-Formulare verantwortlich sind. Ihre Struktur wird von Visual Studio automatisch festgelegt, so dass sich alle zugehörigen Daten und Funktionen in der Header-Datei befinden. Dazu gehören folgende Module:

- **MainForm** enthält die Steuerelemente der grafischen Oberfläche des Hauptformulars und die Funktionen für die Ansteuerung von parallel ablaufenden Prozessen. Unter dem Einsatz von Threads steuert dieses Modul den kompletten Programmablauf an.
- **CamPosit** betreibt das Formular zum Einstellen der Kamerapositionen innerhalb des „Phantoms“. In diesem Modul sind sowohl die Funktion zum Ablesen von eingesetzten Kamerakoordinaten als auch die Funktion zum Setzen neuer Werte implementiert.
- **CamAdjust** betreibt das Formular zum Einstellen der Kameraausrichtungen in einem „Phantom“. Alle möglichen Ausrichtungen sind mit einer Indexzahl von 0 bis

---

<sup>52</sup> Vergl. Kaiser, Geleitwort

<sup>53</sup> Programmierschnittstelle (Abkürzung von engl. „Application Programming Interface“)

<sup>54</sup> Vergl. IDS Imaging uEye Kamera-Handbuch, Programmierhinweise

5 kodiert. Die Entschlüsselung dieser Indizes ist im Anhang 4: „Indizes der Kameraausrichtungen“ zu finden.

- **Exposure** betreibt das Formular zum Einstellen der Belichtungszeiten jeder Kamera. Über die Schieberegler können die Belichtungszeiten manuell eingestellt werden (Minimal- und Maximalwerte sind vom Kameramodell und eingestellter Pixeltaktfrequenz der jeweiligen Kamera abhängig). Als Option kann eine automatische Regelung der Belichtungszeiten eingeschaltet werden. Der Sollwert der mittleren Bildhelligkeit (der Wert zwischen 0 und 255) wird über das Formular gesetzt.
- **PixInfo** betreibt das Formular zum Einstellen der Pixelgröße jeder Kamera. Dieser Parameter ist extrem wichtig für das Umrechnen der Koordinaten in einer Bildaufnahme in metrische Werte und umgekehrt. In diesem Modul sind sowohl die Funktion zum Ablesen von eingesetzten Pixelgrößen als auch die Funktion zum Setzen neuer Werte implementiert.
- **Figure** betreibt das Formular zum Einstellen des aufgenommenen Figurentyps für jede Kamera. Abhängig von diesen Figurentypen werden die Berechnungen bei der Liniendetektion angepasst. Es wird zwischen „Kreuz“, „waagerechte Linie“ und „senkrechte Linie“ unterschieden. In der bereits entwickelten „Phantom“-Konstruktion nimmt Kamera 1 standardmäßig ein „Kreuz“ auf, während die beiden anderen Kameras eine „waagerechte Linie“ aufnehmen.
- **Regulating** betreibt das Formular zur Anzeige der ermittelten Laserkreuzparameter und der Befehle an das Laseransteuerungssystem. Das Modul beinhaltet die Funktion zum Setzen neuer Werte von einer externen Quelle und eine Funktion zum Generieren und Ausgeben der Ansteuerungsbefehle.

Der zweiten Gruppe sind die Module zugeordnet, die keine Funktionen zur Ansteuerung der grafischen Oberfläche und zum Programmablauf enthalten. Dazu gehören folgende Module:

- **Camera** dient als Schnittstelle zwischen der „Phantom“-Software und dem Kameratreiber. Das Modul beinhaltet die Funktionen zur Parametereinstellung und Ansteuerung der angeschlossenen Kameras und zum Konvertieren der aufgenommenen Bilder in OpenCV-Bildformat (IPLImage).
- **ImageProc** enthält die Algorithmen zur Bildverarbeitung und ist mit Programmbibliotheken von OpenCV verbunden. Dieses Modul beinhaltet die Funktionen zur Bildvorverarbeitung (Formatkonvertierung, Anwenden des Gauß-Filters und Binarisierung), Kontursuche und Liniendetektion sowie die Funktionen

zur Ermittlung des Bereichsschnittpunktes und zum Einzeichnen der Informationen (Texte und Linien) direkt in die Bilder.

- **CalcPyr** beinhaltet die Funktionen zum Berechnen der genauen räumlichen Positionen der Pyramidenspiegelspitzen anhand der festgelegten Kamerapositionen innerhalb des „Phantoms“ und Offsets zwischen den jeweiligen Sensormittelpunkten und Bereichsschnittpunkten. Die Pyramidenspitzen dienen als Bezugspunkte bei der Ermittlung der Laserkreuzparameter.

### 7.3 Datenstrukturen

Die Klasse *planeT* beinhaltet neben dem Speicher für drei Bildaufnahmen auch die Methoden für Bildverarbeitung und Positionsbestimmung der Laserkreuze im Raum.

Deklaration:

```
class planeT{
private:
    IplImage* img[3];
public:
    planeT(void);
    ~planeT();
private:
    void Kreuz(IplImage* img,CvPoint koord,CvScalar farbe);
    CvSeq* Konturen(int numb,compSettings c_set,bool mode);
    void FindFigure(int numb,compSettings c_set);
    void CalcDiff(int numb);
public:
    void FreeRun(int numb);
    CvPoint Mittelpunkt(int numb,compSettings c_set);
    bool CompPlane(int numb,compSettings c_set);
    void SetBild(IplImage* bild, int numb);
    void SetFigure(int numb,char wert);
    IplImage* GetBild(int numb);
};
```

Erläuterung wichtigster Speicherblöcke und Methoden:

**IplImage\* img[3]** – Speicher für drei aufgenommene Bilder.

**CvSeq\* Konturen()** – Die Methode zum Suchen nach den Konturlinien in einem Bild.

**CvPoint Mittelpunkt()** – Die Methode zum Suchen nach dem Bereichsschnittpunkt (im Kalibrierungsmodus).

**void FindFigure()** – Die Methode zum Suchen nach Figurenpositionen im Bild (im Messungsmodus).

**void CalcDiff()** – Die Methode zur Berechnung der Differenzen in der Lage zweier Kreuze in einem Bild (im Messungsmodus).

Die Struktur *crossPos* wird für die Speicherung der Daten einer im Bild gefundener Figur verwendet:

```
struct crossPos{
    char figure;
    CvPoint mp;
    double angle;
};
```

**Char figure** – bezeichnet den Figurentyp. „k“ steht für einen Kreuz, „w“ für die waagerechte Linie und „s“ für die senkrechte.

**CvPoint mp** – enthält die Koordinaten des ermittelten Figurenmittelpunktes (x,y) im aktuellen Bild.

**Double angle** – der Neigungswinkel der Figur bezüglich der waagerechten Koordinatenachse, in DEG

Da insgesamt sechs verschiedene Figuren gespeichert werden müssen (drei für jede Laserquelle), werden sechs *crossPos*-Strukturen benötigt. Diese werden in einem Vektor der Größe 2x3 vereint:

```
Vector <vector <crossPos>> pos (2, vector <crossPos> (3));
```

Die Struktur *planePos* wird für die Speicherung der ermittelten Laserposition im Raum bezogen auf die Referenzebene verwendet:

```
struct planePos{
    double phi_xz;           //Winkel auf Fläche XZ
    double phi_xy;           //Winkel auf Fläche XY
    double phi_yz[3];        //Winkel auf Fläche YZ (für alle 3 Kameras)
    double sx;               //Abstand von MP der Kamera 1 (X-Achse)
    double sy;               //Abstand von MP der Kamera 1 (Y-Achse)
};
```

### 7.4 Die Datei „CamData.xml“

Alle Informationen, die die Eigenschaften des „Phantoms“ beschreiben, müssen dauerhaft gespeichert und bei jedem Programmstart wieder abgerufen werden. Dafür wird eine Datei benötigt, in der die Informationen über alle verwendeten „Phantome“ abgespeichert sind. Auf Wunsch der Firma LAP sollen die Daten in XML<sup>55</sup>-Format gespeichert werden. Für die Verarbeitung solcher Dateien wurden die speziellen in Visual Studio vorhandenen Klassen zum Lesen und Schreiben der XML-Dokumente hinzugefügt.

---

<sup>55</sup> Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Form von Textdateien

Eine von dem Anwendungsprogramm erzeugte XML-Datei mit einem gespeichertem „Phantom“ hat folgende Struktur:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
_ <Kameradaten>
  _ <Phantom SerNr="100000001">
    ± <IDS_Kamera SerNr="4002817943">
    ± <IDS_Kamera SerNr="4002817942">
    ± <IDS_Kamera SerNr="4002819883">
  </Phantom>
</Kameradaten>
```

Es ist zu sehen, dass das „Phantom“ mit einer Seriennummer identifiziert ist, die ihm bei der Datenaufzeichnung verliehen wurde. Die drei Kameras, die zusammen ein „Phantom“ bilden, besitzen ebenfalls ihre Seriennummer, doch diese wurden ihnen bei der Herstellung vergeben und sind im ROM der Kameras festgespeichert.

Jede Kamera beinhaltet in ihrer Unterebene weitere Daten:

```
_ <IDS_Kamera SerNr="4002817943">
  <Datum>13.07.2013 11:36:31</Datum>
  <Modell>UI124xLE-M</Modell>
  <Sensor>1280*1024</Sensor>
  <Mittelpunkt>674,600</Mittelpunkt>
  <Position>0,0,150</Position>
  <Ausrichtung>0</Ausrichtung>
  <OffsetWinkel>0</OffsetWinkel>
  <OffsetXY>0</OffsetXY>
</IDS_Kamera>
```

Neben des Kameramodells (<Modell>) und der Sensorauflösung (<Sensor>) sind hier der ermittelte Bereichsschnittpunkt (<Mittelpunkt>), X/Y/Z-Koordinaten im „Phantom“ (<Position>), Index der Kameraausrichtung (<Ausrichtung>) und die benötigten Offsetwerte, die im Kalibrierungsvorgang gemessen werden (<OffsetWinkel>, <OffsetXY>), aufgelistet.

### 7.5 Programmablauf

Bei dem Ausführen einer *Windows-Forms-Anwendung* befindet sich der Rechner ständig in einem Erwartungszustand auf die Eingabeereignisse (Drücken einer Taste, Auslösen eines Timers usw.). Ist ein Ereignis ausgelöst, wird die entsprechende Funktion ausgeführt. Während der Funktionsverarbeitung ist das Formular blockiert und kann erst dann auf neu eintreffende Ereignisse reagieren, wenn die aufgerufene Funktion komplett abgearbeitet ist. Bei langwierigen Funktionen bleibt das Programm über ein längeres Zeitintervall blockiert, was für eine Echtzeit-Anwendung unannehmbar ist. Durch das Verwenden von Threads kann dies aber verhindert werden.

Durch Threads lässt man die Prozesse, die viel Rechenzeit benötigen, parallel zum Hauptprogramm ablaufen, ohne dieses zu beeinträchtigen. Das Hauptprogramm selbst wird hierbei als Hauptthread betrachtet, das den Ablauf aller anderen Threads ansteuert.

Zur Ausführung von Threads ist in Visual Studio eine Klasse „*BackgroundWorker*“ vorgesehen. Ein Objekt dieser Klasse muss im Hauptprogramm implementiert werden. Der Programmcode, der parallel zum Hauptprogramm ausgeführt werden soll (Ereignisbehandlungsroutine), wird in der Methode „*DoWork()*“ des *BackgroundWorkers* angelegt und kann durch den Aufruf der Methode „*RunWorkerAsync()*“ gestartet und parallel zum Hauptprogramm ausgeführt werden.

Die Programmstruktur ist durch das in der Abbildung 7-1 dargestellte Ablaufschema grob veranschaulicht. Nach dem Start der Anwendung wird das Hauptprogramm zunächst im normalen Modus ausgeführt und alle ausgelösten Ereignisse werden sequentiell bearbeitet. Ein neues globales Objekt der Klasse *planeT* wird angelegt, das den Speicher für drei Bilder sowie die Methoden zur Bildverarbeitung beinhaltet.

Sobald die Taste „Bildaufnahme starten“ betätigt ist, wird der *BackgroundWorker* gestartet und der Flag<sup>56</sup> „Aufnahme“, der den aktuellen Programmzustand anzeigt, wird auf „Aufnahme aktiv“ gesetzt. Nun kann der Zustand des Flags entweder durch das Betätigen der Taste „Bildaufnahme stoppen“ oder durch das Beenden des Programms wieder auf den Wert „Aufnahme gestoppt“ gesetzt werden. Auch das Auftreten von Fehlern bei der Bildaufnahme oder bei der Bildverarbeitung aktueller Bilder bewirkt sofort die Änderung des Flag-Zustandes und löst somit das Stoppen des Programms aus.

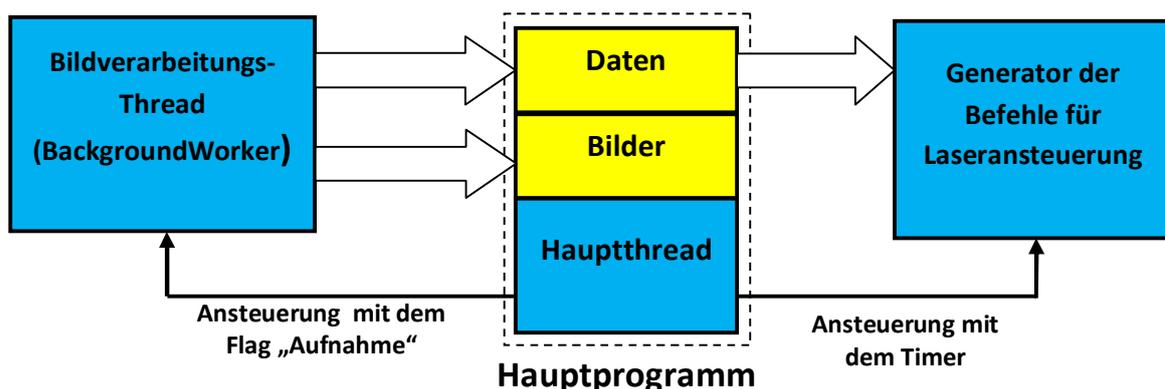


Abbildung 7-1: Ablaufschema der Software für das "Optische Phantom"

Die Ereignisbehandlungsroutine des *BackgroundWorkers* wird zyklisch durchgelaufen, solange der Flag „Aufnahme“ den Wert „Aufnahme aktiv“ behält. Innerhalb jedes

<sup>56</sup> Eine Hilfsvariable, die zur Kennzeichnung bestimmter Programmzustände benutzt wird

Durchlaufs werden zunächst drei Bilder aufgenommen. Wenn die Aufnahme fehlerfrei erfolgt ist, findet im nächsten Schritt die Bildverarbeitung anhand des eingestellten Programmmodus und der Bildverarbeitungsparameter statt, dafür wird die entsprechende Methode des Objektes *planeT* aufgerufen. Die ermittelten Daten über die Laserlinien sowie die aufgenommenen Bilder werden anschließend im Objekt *planeT* abgelegt. Schließlich werden die Farbbilder, die mit Texten und weiteren Informationen ergänzt wurden, im Hauptformular ausgegeben. Nach der Ausgabe wird der Speicherinhalt des *planeT*-Objekts gelöscht und der Zyklus wird wiederholt.

Bei der Bildaufnahme ist zu beachten, dass die Änderungen der Kamerabelichtungszeiten durch das Hauptprogramm erfolgen, indem dieses den Kameratreiber direkt anspricht. Die eigentliche Bildaufnahme wird aber zum gleichen Zeitpunkt von *BackgroundWorker* über denselben Kameratreiber angesteuert. Der Kameratreiber wird also gleichzeitig von zwei unterschiedlichen Threads angesprochen und kann somit als „threadsicher“ bezeichnet werden.

Die Objekte der Benutzeroberfläche von *Windows-Forms-Anwendungen* sind aber nicht threadsicher und können nur von Thread angesteuert werden, zu der sie gehören. So sind die Textfelder des „Formulars zum Generieren der Befehle an Laseransteuerungssystem“ nicht von *BackgroundWorker* veränderbar<sup>57</sup>. Um die aktuell ermittelten Daten im Formular trotzdem ausgeben zu können, müssen diese in regelmäßigen Zeitabständen von dem Datenspeicher (*PlaneT*-Objekt) abgelesen werden. Dieser Vorgang wird durch einen Timer angesteuert, der im Intervall von 100 ms die ermittelten Daten aus dem gemeinsamen Speicher ausliest und sie an das Befehlsformular weiterleitet.

Ein Timer-Ereignis kann die gerade ausgeführten Anweisungen nicht unterbrechen und wird erst dann berücksichtigt, wenn die zuvor initiierten Anweisungen abgearbeitet sind<sup>58</sup>. Durch diese Eigenschaft ist der gleichzeitige Zugriff von zwei Threads auf die gemeinsamen Speicherbereiche ausgeschlossen. Somit werden die Konflikte zwischen Threads vermieden.

Beim Beenden des Programms muss beachtet werden, dass alle Hintergrundthreads geschlossen werden, bevor der Hauptthread geschlossen wird. Der *BackgroundWorker* wird mit der Methode *CancelAsync()* beendet.

---

<sup>57</sup> Vergl. Kaiser, Seite 1167

<sup>58</sup> Vergl. Kaiser, Seite 1155

## 8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die Aufgabenstellungen noch einmal kurz skizziert und die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst. Ein Fazit über die realisierten und nicht realisierten Funktionalitäten sowie ein Ausblick auf die Problemlösungen und mögliche Erweiterungen werden gegeben.

### 8.1 Fazit

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines optisch-elektronischen Systems, das die Unterstützung bei dem Justieren von Laserprojektionssystemen anbietet. Im Laufe des Entwicklungsprozesses ist man auf folgende Punkte eingegangen:

- Diskussion über die Notwendigkeit des Einsatzes eines neuen elektronischen Justiersystems anstatt der aktuell verwendeten Vorrichtungen zum Justieren der Laserprojektoren (siehe [Kapitel 2](#)).
- Zusammenfassen der Mindestanzahl der benötigten Parameter eines Laserstrahls, mit denen seine Lage und Ausrichtung im Raum eindeutig festgelegt werden kann (siehe [Kapitel 3.2](#)).
- Entwickeln der mathematischen Methoden zur Bestimmung der benötigten Parameter eines Laserstrahls (siehe [Kapitel 3.3](#)).
- Diskussion über die verschiedenen Möglichkeiten der Realisierung eines Systems, das die Laserstrahlen an mehreren verschiedenen Positionen ausmisst (siehe [Kapitel 3.3](#)).
- Diskussion über die verschiedenen Methoden zur gleichzeitigen Erfassung der Strahlungen zweier Laserprojektoren aus gegenüberliegenden Richtungen (siehe [Kapitel 4.1](#)).
- Auswahl der passenden Hardware (Kameras, Switches, Kabel) und Optik (Spiegel und Filter) (siehe [Kapitel 4.2](#)).
- Definition der mechanischen Spezifikationen und der Entwurf des Gesamtaufbaus der Justieranlage (Gerüst und Kameragehäuse) (siehe [Kapitel 4.5](#)).
- Entwickeln der vorläufigen Anwendersoftware mit grafischer Benutzeroberfläche, mit der alle für die Justieranlage notwendigen Funktionalitäten ausgearbeitet und getestet werden können (Ansteuerung der Kameras, Speichern und Konvertieren der aufgenommenen Bilder, grafische Ausgabe usw.).
- Entwickeln der Methoden zur maschinellen Erkennung der Figuren in einem Bild anhand der Algorithmen für Bildverarbeitung (siehe [Kapitel 5.3](#)).
- Entwickeln der Methoden zur maschinellen Detektion der Linien in ermittelten Figuren (siehe [Kapitel 5.4](#)).

- Umsetzen der Methoden zum Bestimmen der Lage und der Ausrichtung der Laserstrahlen, die im Kapitel 3 besprochen wurden, in die zu entwickelnde Anwendersoftware.
- Inbetriebnahme und Testen der realisierten Justieranlage (siehe [Kapitel 6](#)).
- Ergänzen der Anwendersoftware mit notwendigen Funktionalitäten, neuen Modulen (z.B. Kalibrierungsmodus) und komfortabler Benutzeroberfläche.

Die am Anfang der Arbeit gestellten Ziele (siehe [Kapitel 1.2](#)) wurden größtenteils erreicht.

Das „Optische Phantom“ nimmt gleichzeitig die Strahlen von zwei zu justierenden Laserprojektoren mit drei Kameras auf.

Die Ansteuerung des „Phantoms“ sowie das Bereitstellen der Messergebnisse erfolgt in Echtzeit, indem die neu aufgenommenen Bilder unverzüglich verarbeitet werden, bevor die neue Bildaufnahme stattfindet. Die maximale erreichbare Bildverarbeitungsrate liegt schätzungsweise bei 10 – 15 Bilder/Sekunde, was für die entwickelte Anwendung völlig ausreichend ist.

Durch die grafischen Ausgaben der Hilfslinien und Messergebnisse direkt in aufgenommene Bilder sowie durch das Generieren der Befehle zur Ansteuerung der Laserprojektoren, hat der Benutzer einen ständigen Überblick über die Laserlinien verschafft.

Die entwickelte Methode zum Detektieren der Laserlinien funktioniert zuverlässig und zeigt im Allgemeinen gute und stabile Ergebnisse. Die Linienstützpunkte werden auch bei schwierigen Lichtverhältnissen mit ausreichender Genauigkeit bestimmt. Allerdings muss das Programm bei veränderten Lichtverhältnissen jedes Mal manuell darauf angepasst werden. Außerdem ist die Genauigkeit dieser Methode sehr stark durch die Qualität der verwendeten Laserquellen beeinflusst (zur detaillierten Information siehe [Kapitel 5.1](#) und [Kapitel 5.4.2](#)).

Der komplette Justiervorgang konnte jedoch nicht vollständig simuliert werden. Ein Konstruktionsfehler, der in der Projektierungsphase des „Optischen Phantoms“ nicht aufgefallen war, hat die korrekte Aufnahme der Laserlinien mit einer Kamera verhindert (zur detaillierten Information siehe [Kapitel 6.4](#)) und somit die Berechnungen der Laserkreuzparameter unmöglich gemacht.

Im Laufe der Arbeit wurde außerdem festgestellt, dass die Ausrichtung der Pyramidenspiegel in Kameragehäusen bezüglich ihrer Kamerasensoren eine große Auswirkung auf die Endergebnisse der Messung hat. Mit der neu entwickelten Methode

zur Kalibrierung der Kameras konnten die Abweichungen in den Positionen der Pyramidenspiegel erfasst und gemessen werden (siehe [Kapitel 6.6](#)).

### 8.2 Ausblick

Während der Durchführung des Projekts sind weitere Ideen zur Erweiterung und Verbesserung des entwickelten Systems entstanden:

- Aufgrund des beim Projektieren des „Phantom“-Gerüsts entstandenen Fehlers (siehe [Kapitel 6.4](#)) muss die Konstruktion nachbearbeitet werden. Es muss entweder das Gehäuse der betroffenen Kamera oder das komplette Gerüst angepasst werden. Die Veränderung des Gerüsts wird bevorzugt, denn in diesem Fall bleiben alle drei Kameragehäuse weiterhin identisch und können problemlos gegenseitig ausgetauscht werden.
- Die optischen Folienfilter, die zur Dämpfung der Laserstrahlenintensität auf die Kamerasensoren angebracht wurden, wurden mit dem speziellen optischen Klebstoff nur an einigen Stellen des Sensors befestigt. Dadurch entstehen die Luftspalten zwischen dem Filter und der Sensoroberfläche, die schließlich das Erscheinen der Newton-Ringe<sup>59</sup> hervorrufen. Eine mögliche Lösung wäre die gleichmäßige Verteilung des Klebstoffes über die ganze Filteroberfläche oder das Erhöhen des Abstandes zwischen dem Sensor und dem Filter.
- Die Gläser, die die Fenster der Kameragehäuse bedecken, rufen bei bestimmten Strahlungswinkeln starke Reflexionen hervor. Ein Teil der Laserstrahlung, die nicht vom Pyramidenspiegel erfasst wurde, fällt auf das gegenüberliegende Fensterglas und wird zurück auf die Pyramide gespiegelt. Im ungünstigsten Fall bewirken diese Reflektionen das Entstehen von Geisterfiguren in den Bildaufnahmen. Möglicher Lösungsweg: komplettes Entfernen der Gläser oder Ersetzen durch speziell beschichtete Gläser.
- Die Anwendungssoftware des „Phantoms“ ist so aufgebaut, dass die Aufnahme der neuen Bilder erst dann erfolgt, wenn die bereits aufgenommenen Bilder verarbeitet und die Ergebnisse ausgegeben sind. Die beiden Prozesse sind in der Regel sehr zeitaufwendig. Als Folge treten die unnötigen Wartezeiten zwischen den Bildaufnahmen ein, die sich unmittelbar auf die maximal erreichbare Bildverarbeitungsrate auswirken. Um diese Wartezeiten zu verkürzen, muss die Programmstruktur reorganisiert werden. Durch das Zerteilen des Bildverarbeitungsthreads in mehrere einzelne Prozesse, die parallel zueinander ablaufen, werden die eigentliche Bildaufnahme und darauf folgende

---

<sup>59</sup> Hell-dunkel-Zonen in einer Bildaufnahme, die durch Interferenz am Luftspalt zwischen zwei reflektierenden, nahezu parallelen Oberflächen entstehen.

Bildverarbeitung voneinander getrennt. So können die bereits aufgenommenen Bilder verarbeitet werden, während sich die Kameras mit den Aufnahmen der neuen Bilder beschäftigen.

- Um die Kalibrierung einer Kamera durchzuführen, muss diese aus dem „Phantom“ herausgenommen werden und mit höchster Genauigkeit bezüglich der Lichtquellen ausgerichtet werden (siehe [Kapitel 6.6.2](#)). Eine mögliche Lösung zum Vereinfachen dieses Prozesses wäre die Entwicklung einer separaten Kalibrierungsanlage mit fest eingebauten Lichtquellen und Platz zum Befestigen des Kameragehäuses.

Das in diesem Projekt erarbeitete Konzept und die Softwarestruktur wurden speziell für das Justieren der zwei gegenüberliegenden Laserprojektoren entwickelt. Doch diese lassen sich prinzipiell auf ein beliebiges Projektor-Paar im APOLLO-Lasersystem übertragen, da die Strahlungen aller APOLLO-Projektoren die identischen Eigenschaften haben. Der mechanische Aufbau des Systems und der Optik müssen jedoch bei Bedarf entsprechend angepasst werden. Die Möglichkeiten der Verwendung des „Optischen Phantoms“ an anderen Laserprojektionssystemen müssen genauer erforscht werden. Es kann vorkommen, dass sich in ihren Eigenschaften (Linienform, Linienbreite, Intensitätsverteilung, Wellenlänge usw.) unterscheidende Laserquellen auch absolut inkompatible Bildaufnahmen liefern, für deren Verarbeitung unterschiedliche Methoden benötigt werden.

## Literaturverzeichnis

### Bücher

Bartsch, H.-J.      *Taschenbuch mathematischer Formeln für Ingenieure und  
Naturwissenschaftler*, 22. Auflage; Fachbuchverlag Leipzig; 2011

Eichler, J.,      *Laser. Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*; 6. Auflage;  
Eichler, H.      Springer Verlag; 2006

Liftin, G.      *Technische Optik in der Praxis*; 3. Auflage; Springer Verlag; 2005

Meschede, D.      *Optik, Licht und Laser*; 3. Auflage; Vieweg+Teubner; 2008

Kaiser, R.      *C++ mit Microsoft Visual C++2008*; Springer Verlag; 2009

Bradski, G.,      *Learning OpenCV*; 1. Edition; O'Reilly; 2008  
Kaehler, A.

Laganieri, R.      *OpenCV 2 Computer Vision Application Programming Cookbook*;  
Packt Publishing; 2011

## Betriebsdokumente

- LAP GmbH      *Installations- und Gebrauchsanweisung APOLLO; Manual 1019; Rev. 6-de, 08/2012*
- LAP GmbH      *APOLLO Advanced Laser System for Patient Alignment; Rev. 26-en, 07/2011*
- LAP GmbH      *CARINAsim – Software for Patient Marking and Virtual Simulation; Softwarebeschreibung und Bedienung; 2010*
- LAP GmbH      *Workflow CARINAsim; Rev 14; Softwarebeschreibung und Bedienung; 2010*
- LAP GmbH      *Strahlentherapie, alles was man wissen sollte; Schulungsvorlagen; 09/2011*
- LAP GmbH      *Optisches Phantom, Montage; Rev. 1.0, 2013*
- LAP GmbH      *Prisma Kamera, Zusammenbau; Rev. 1.0, 2013*
- IDS Imaging      *uEye Kamera-Handbuch; Ver. 3.80; 2012*
- IDS Imaging      *Datenblatt USB 2.0 Industriekamera uEye UI-1242LE-M; 2013*

## Dokumente von Webseiten

Bogner, L. *Intensitätsmodulierte konformale Strahlentherapie*; 2000;  
<http://www.uniklinikum-regensburg.de/imperia/md/content/kliniken-institute/strahlentherapie/habil-bogner.pdf>, heruntergeladen am  
27.06.2013

Klautke, G. *Strahlentherapie: Grundlagen der Tele- und Brachytherapie*; 2013;  
[http://www.strahlentherapie.med.uni-rostock.de/fileadmin/user\\_upload/Vorlesung/Grundlagen\\_der\\_Strahlentherapie\\_Tele\\_und\\_Brachy-V.pdf](http://www.strahlentherapie.med.uni-rostock.de/fileadmin/user_upload/Vorlesung/Grundlagen_der_Strahlentherapie_Tele_und_Brachy-V.pdf), heruntergeladen am 27.06.2013

Der gesamte Programmcode der Anwendungssoftware sowie die dazugehörigen Projektdateien befinden sich auf einer CD-ROM, die bei dem Prüfungsausschuss des Departments Informations- und Elektrotechnik der Fakultät Technik und Informatik der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg eingesehen werden kann.

## Anhang

### Anhang A1: Optische Verzerrungen in aufgenommenen Bildern

Bei der Bildaufnahme eines Laserkreuzes mit einer Kamera der Justieranlage, fällt dieser nicht direkt auf Kamerasensor, sondern wird durch das Spiegelsystem umgeleitet. Werden die Laserkreuzebenen bezüglich der Referenzebenen gekippt, entstehen in den Aufnahmen die Verzerrungen, die nachfolgend aufgelistet sind.

Für jeden Fall wurden zwei Bildaufnahmen angefertigt: zum einen mit einem fokussiertem Laserkreuz und zum anderen mit nicht fokussiertem. Dadurch sind die Grenzbereiche der Laserkreuze deutlich sichtbar. Die Bildaufnahme des Laserkreuzes 1 befindet sich immer in oberer Bildhälfte.

Anmerkung. Für die ersten Experimente ist ein provisorischer Aufbau des Kameragehäuses verwendet worden, bei dem die Spiegelpyramide auf eine quadratische Metallplatte angeklebt ist. Diese Platte ist mit vier Gewindestiften an die Kameraplatine angeschraubt. In allen nachfolgenden Abbildungen wird diese Konstruktion, betrachtet aus verschiedenen Blickwinkeln, schematisch dargestellt.

1. Die Laserkreuzebenen stimmen mit den Referenzebenen überein (wegen des provisorischen Aufbaus ist die unterschiedliche Rotation der beiden Kreuze, entstanden durch die fehlerhafte Ausrichtung der Spiegelpyramide, merkbar).

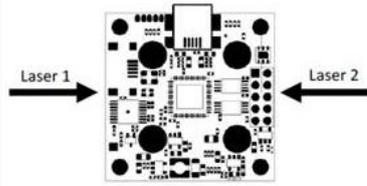
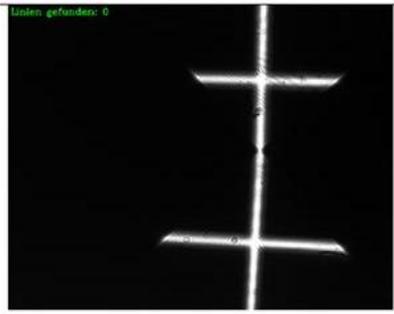
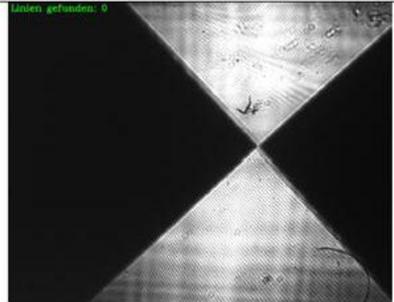
Bewegungsart	Graphische Darstellung	Aufgenommenes Bild (Effekt)
Laserkreuze komplanar		
		

Abbildung A1-1: Zwei Laserkreuze, die mit dem Referenzkreuz komplanar sind

2. Die senkrechten Neigungswinkel der Laserkreuze sind verändert.

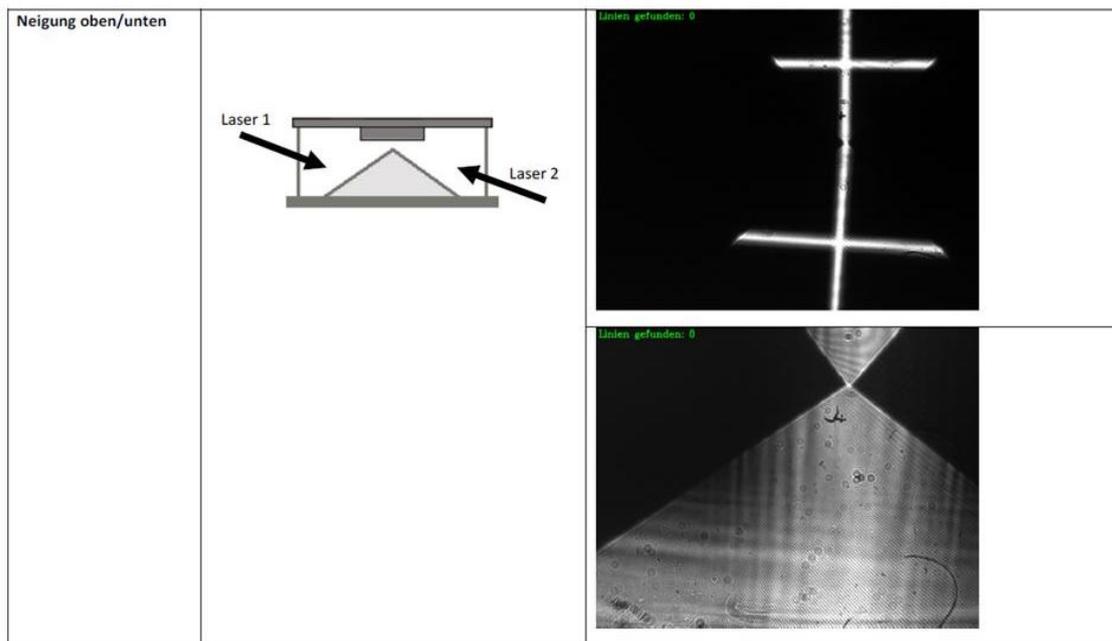


Abbildung A1-2: Zwei Laserkreuze mit verstellten senkrechten Neigungswinkel

3. Die waagerechten Neigungswinkel der Laserkreuze sind verändert.

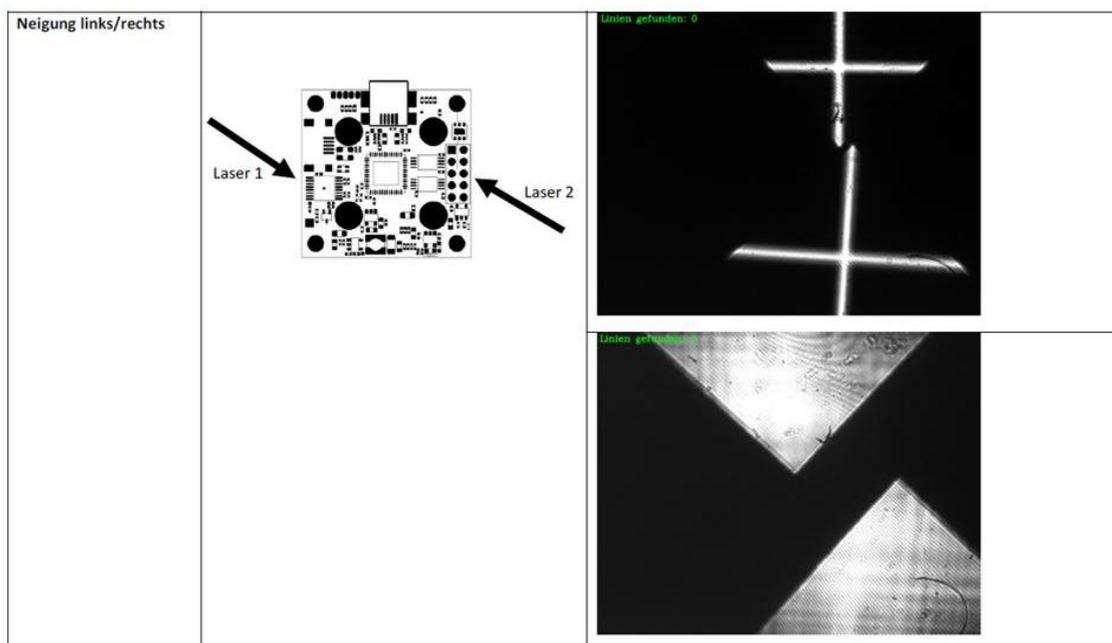


Abbildung A1-3: Zwei Laserkreuze mit verstellten waagerechten Neigungswinkel

## 4. Laserkreuze sind bewegt bezüglich des Referenzkreuzes.

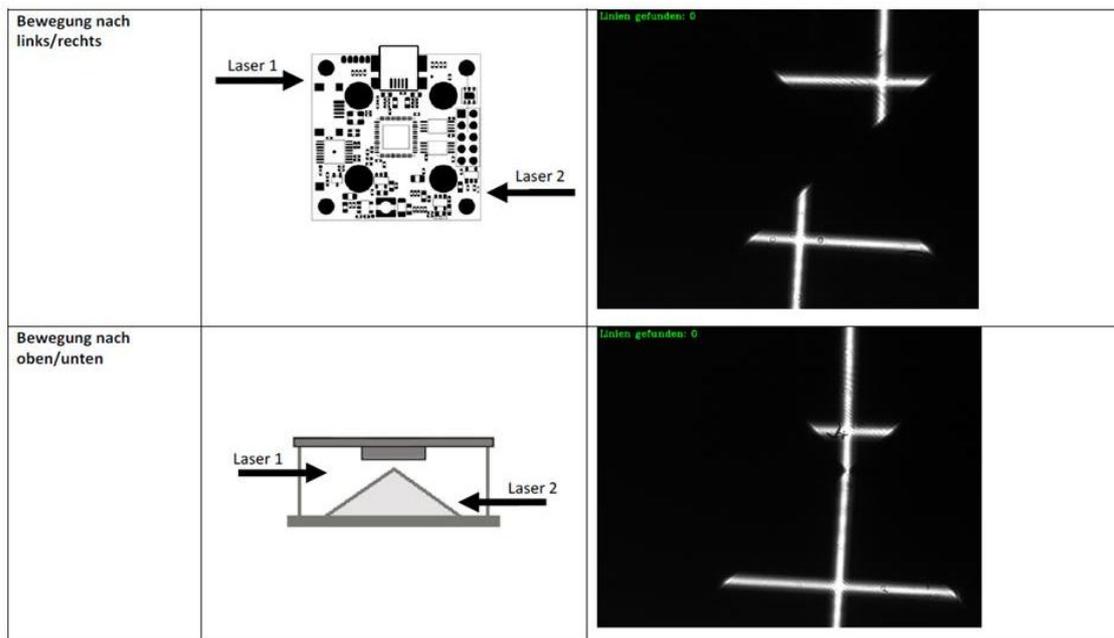


Abbildung A1-4: Zwei Laserkreuze, waagrecht/senkrecht bewegt

## 5. Laserkreuze sind rotiert.

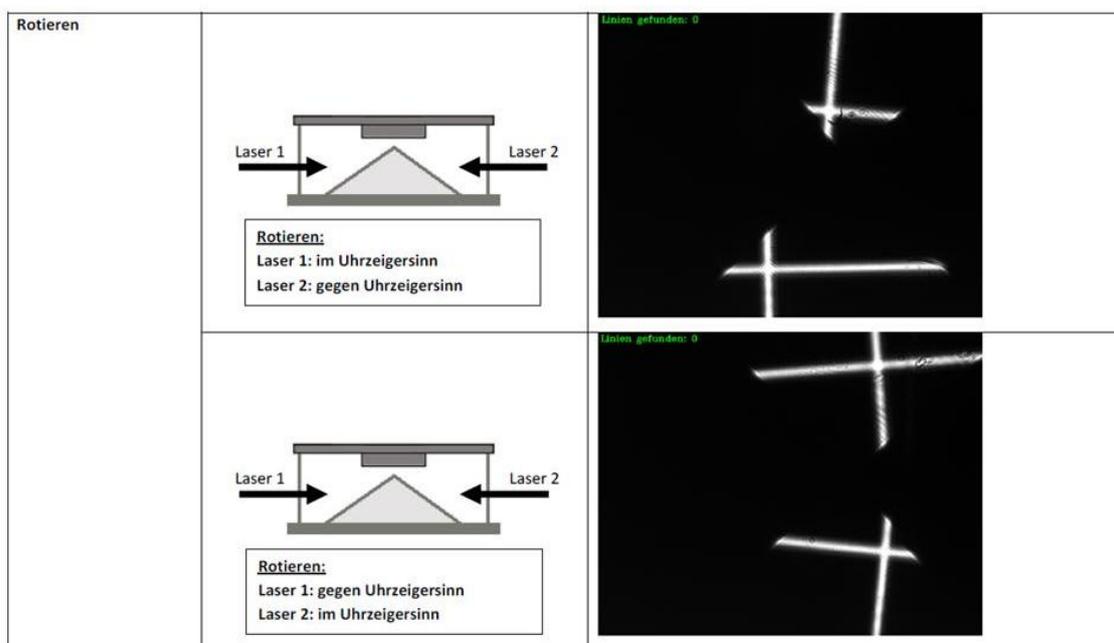


Abbildung A1-5: Zwei Laserkreuze, rotiert

## Anhang A2: Generieren der Befehle für die Ansteuerung des Lasersystems

Die Projektoren des APOLLO-Systems werden von dem Operator über eine Fernbedienung angesteuert (siehe Abb. A2-1).

Folgende Befehle sind ausführbar:

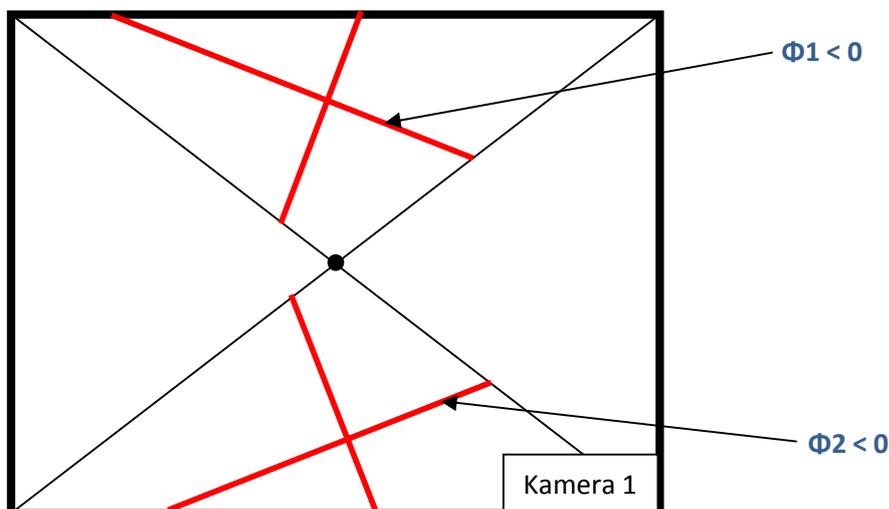
- Drehen im / gegen Uhrzeigersinn
- Neigen nach oben / unten
- Neigen nach links / rechts
- Bewegen nach oben / unten
- Bewegen nach links / rechts

Die entsprechenden Befehle werden von der Software des „Optischen Phantoms“ generiert und an Ausgabe weitergeleitet.



Abbildung A2-1: Fernbedienung des APOLLO-Lasersystems

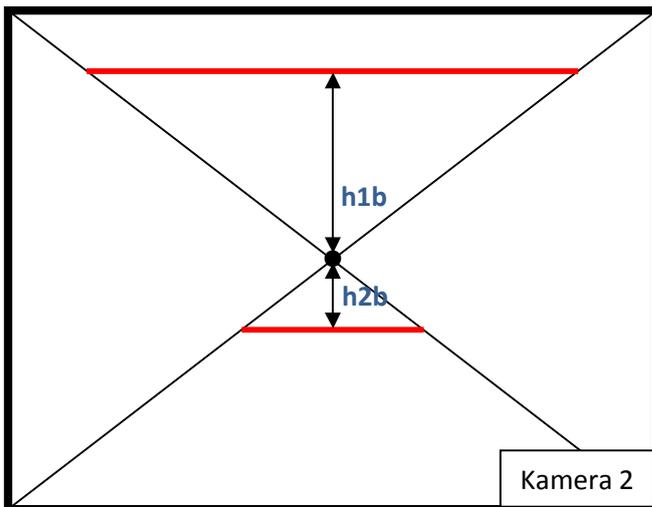
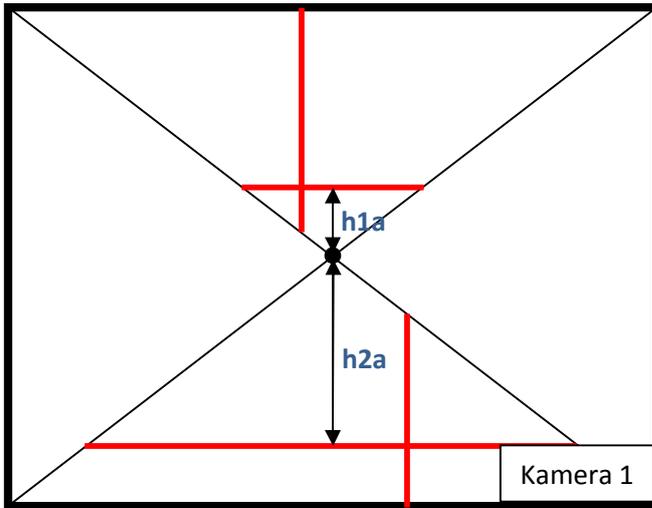
### Drehen im Uhrzeigersinn / gegen Uhrzeigersinn



Befehle an die Ansteuerungssystem

	$\Phi < 0$	$\Phi > 0$	$\Phi \approx 0$
Kreuz 1	Counter Clockwise	Clockwise	OK
Kreuz 2	Clockwise	Counter Clockwise	OK

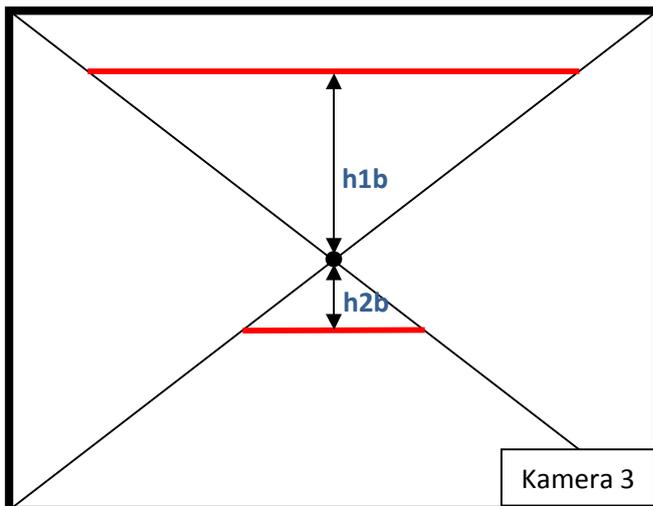
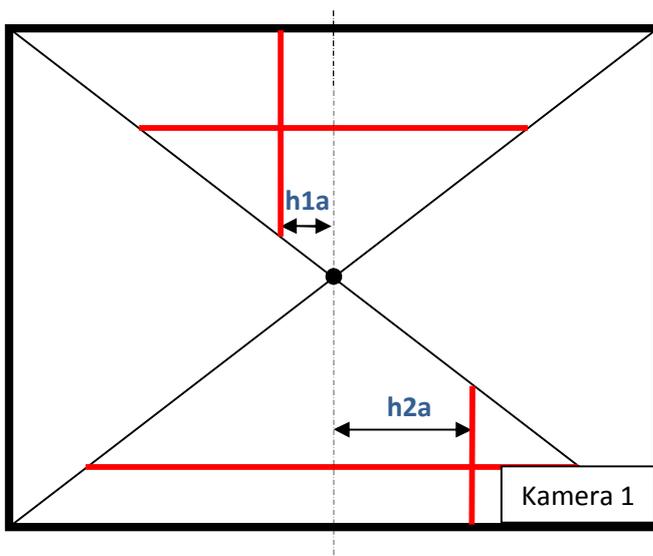
## Neigung nach oben / nach unten



## Befehle an die Ansteuerungssystem

	$h_{xa} < h_{xb}$	$h_{xa} > h_{xb}$	$h_{xa} \approx h_{xb}$
Kreuz 1	Up	Up	OK
Kreuz 2	Down	Down	OK

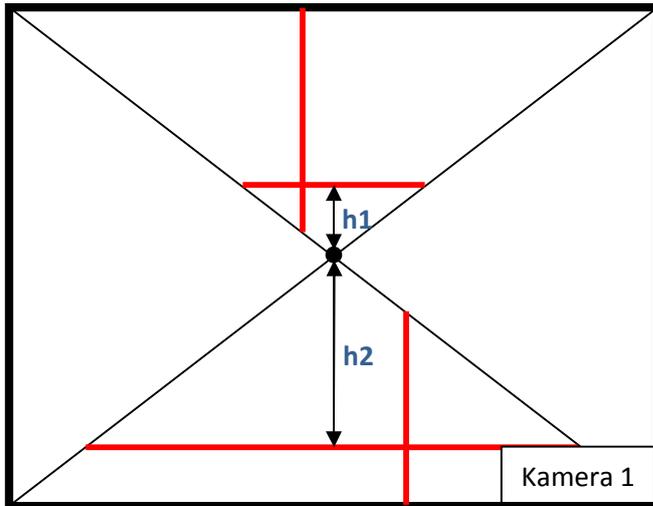
## Neigung nach links / nach rechts



## Befehle an die Ansteuerungssystem

	$ h_{xa}  < h_{xb}$	$ h_{xa}  > h_{xb}$	$ h_{xa}  \approx h_{xb}$
Kreuz 1	Right	Left	OK
Kreuz 2	Right	Left	OK

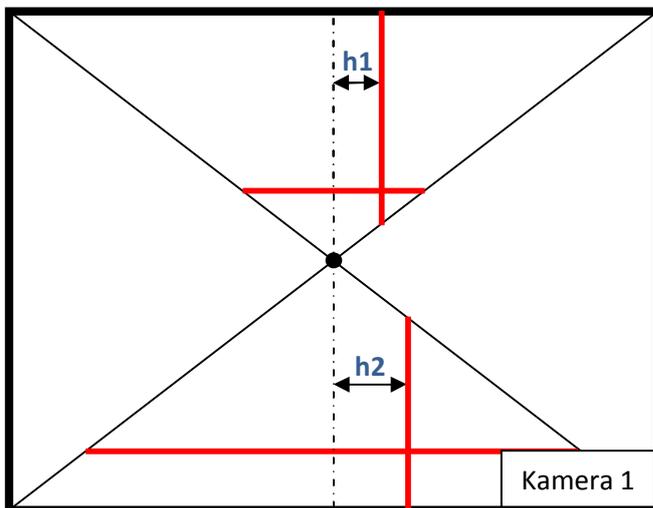
## Bewegung nach oben / nach unten



## Befehle an die Ansteuerungssystem

	$h1 < h2$	$h1 > h2$	$h1 \approx h2$
Kreuz 1	Down	Up	OK
Kreuz 2	Up	Down	OK

## Bewegung nach links / nach rechts



## Befehle an die Ansteuerungssystem

	$h1 < h2$	$h1 > h2$	$h1 \approx h2$
Kreuz 1	Left	Right	OK
Kreuz 2	Left	Right	OK

## Anhang A3: Ermitteln des Bereichsschnittpunktes eines Kamerasensors

Die Ermittlung des Schnittpunktes erfolgt durch direkte Bestrahlung der Pyramidenspitze mit zwei Laserstrahlen aus den gegenüberliegenden Richtungen. Folgende Bedingungen müssen dabei erfüllt werden:

- Beide Laserprojektoren befinden sich auf der gleichen Höhe und sind komplanar ausgerichtet.
- Die Basis der zu beleuchtenden Spiegelpyramide liegt in waagerechter Ebene und ihre Spitze befindet sich auf gleicher Höhe mit Laserquellen (siehe Abb. A3-1).

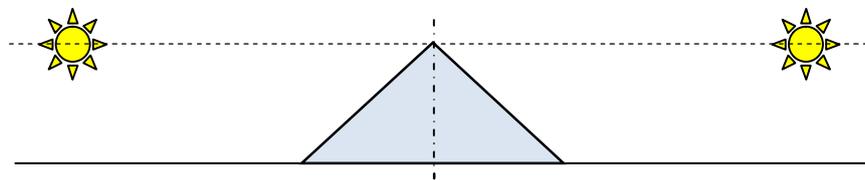


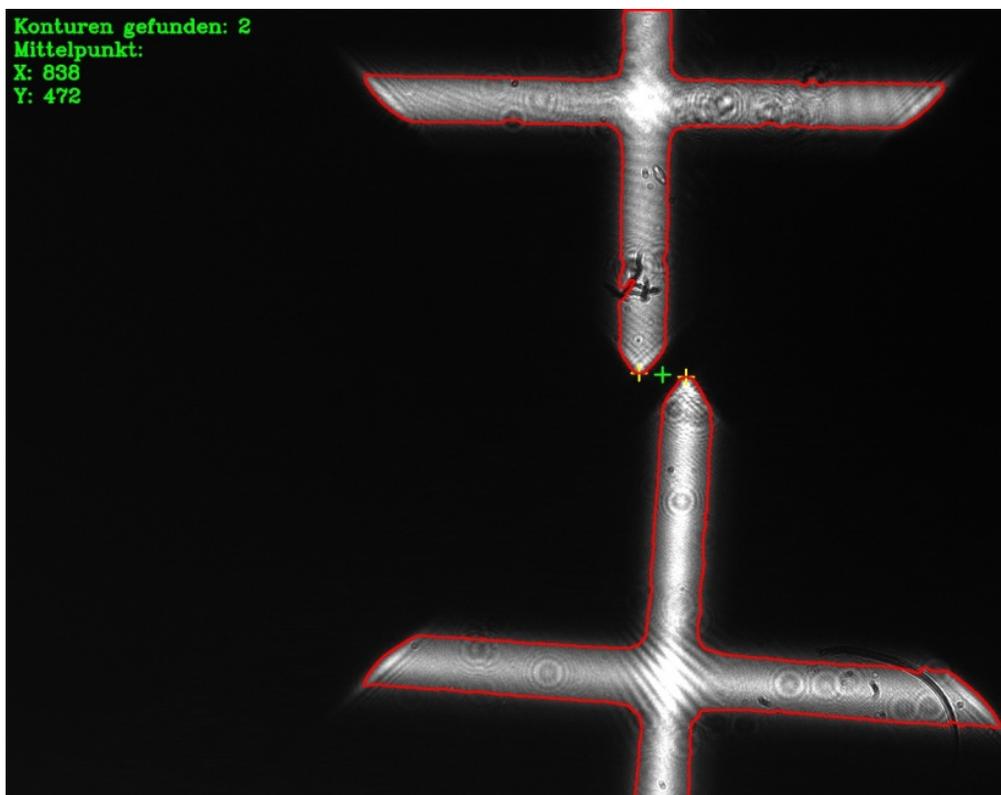
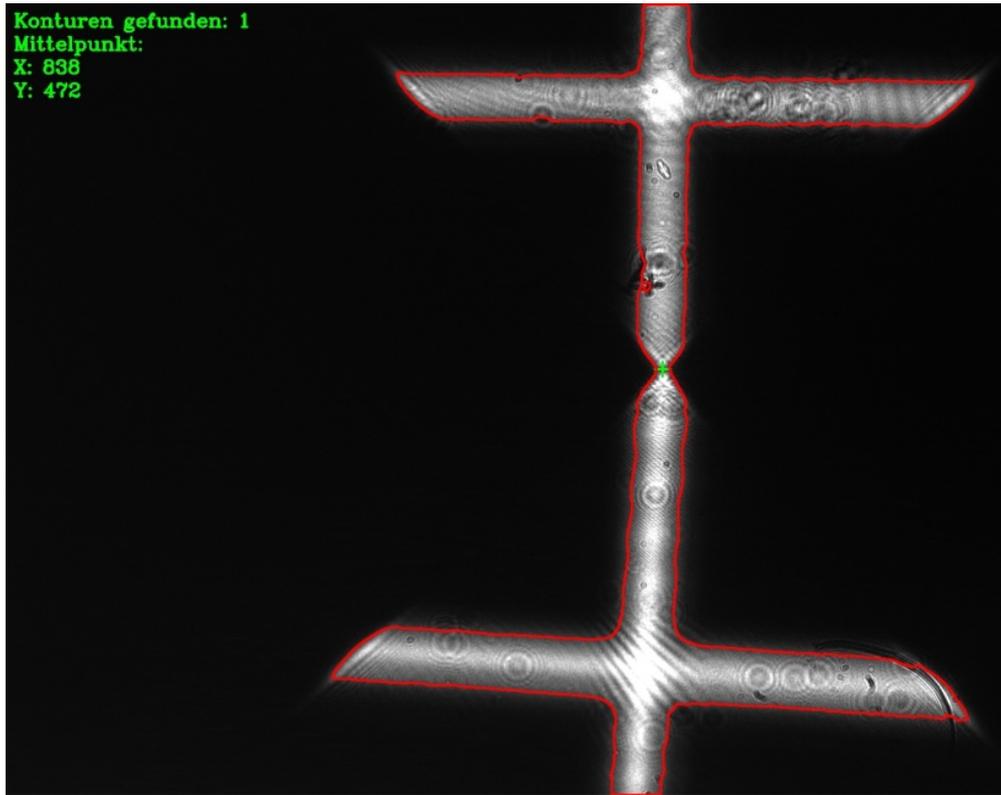
Abbildung A3-1: Ermitteln der Lage der Pyramidenspitze

Sind die beiden Bedingungen nicht erfüllt, trifft die optische Verzerrung ein (vgl. Anhang 1: „Optische Verzerrungen in aufgenommenen Bildern“, Punkt 2) und der Schnittpunkt wird senkrecht versetzt.

### Mit fokussierten Laserstrahlen

Bei der Benutzung der fokussierten Laserstrahlen, müssen diese genau auf die Pyramidenspitze ausgerichtet werden.

Bei der Messung kann die Pyramide beliebig um ihre senkrechte Drehachse gedreht werden. Das Ergebnis (das grüne Kreuz und die Koordinaten des Schnittpunktes) bleibt, trotz der eingetroffenen optischen Verzerrung, unverändert (vgl. Anhang 1: „Optische Verzerrungen in aufgenommenen Bildern“, Punkt 3).

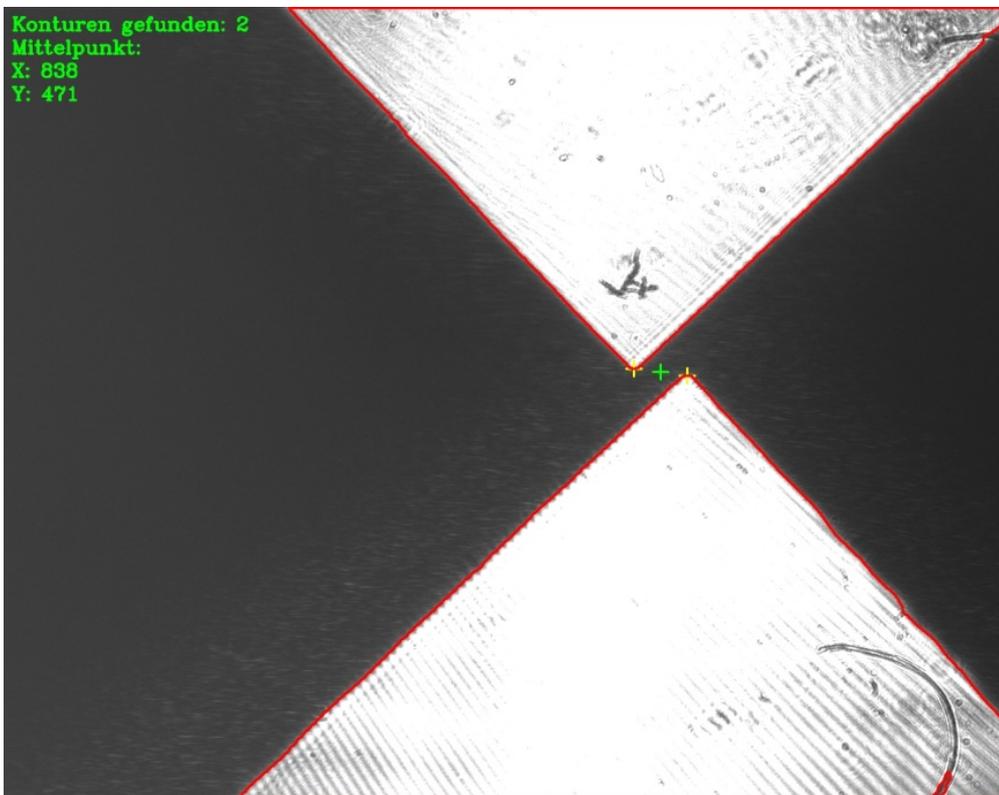
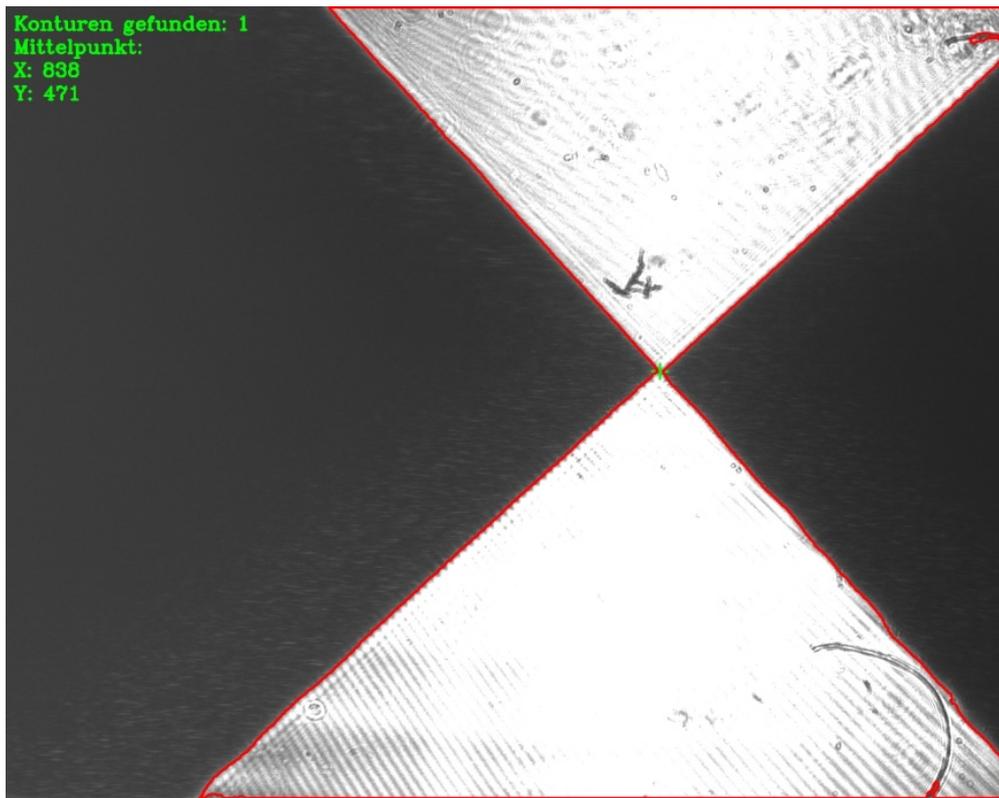


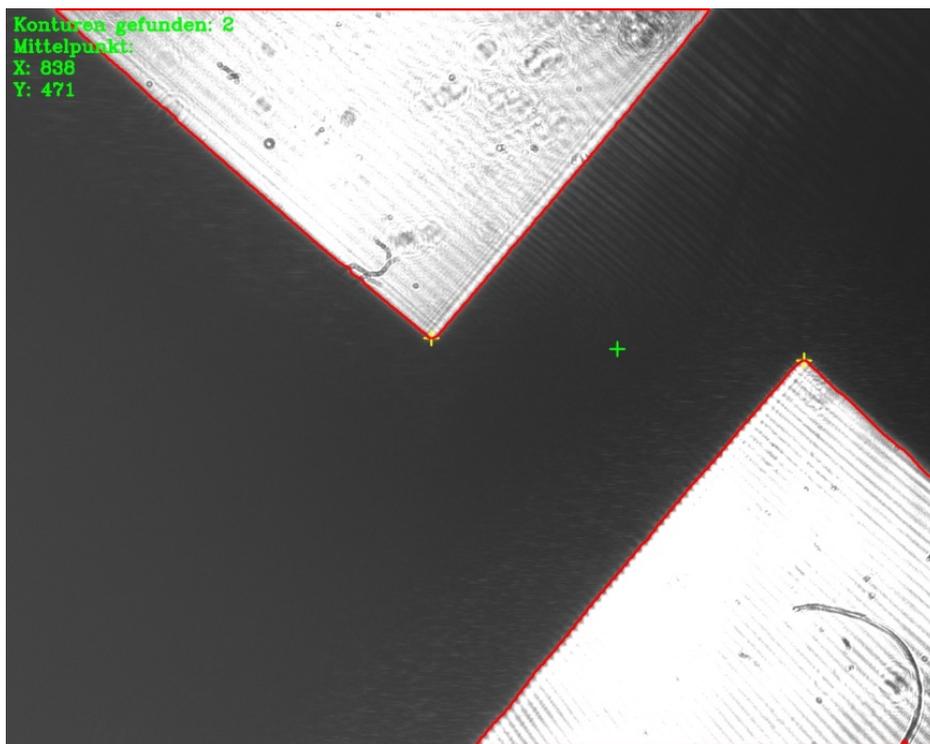


### Mit nicht fokussierten Laserstrahlen

Die nicht fokussierten Laserstrahlen beleuchten nicht nur die Pyramidenspitze, sondern die ganze Spiegelseite und somit den ganzen Bildbereich des jeweiligen Kreuzes. Deshalb müssen sie nicht präzise ausgerichtet werden. Allerdings sehen die Pyramidenspitzen etwas verschwommen aus.

Bei der Drehung der Pyramide um ihre senkrechte Achse bleibt das Ergebnis der Messung (das grüne Kreuz und die Koordinaten des Schnittpunktes), trotz der eingetroffenen optischen Verzerrung (vgl. Anhang 1: „Optische Verzerrungen in aufgenommenen Bildern“, Punkt 3) unverändert.





## Anhang A4: Indizes der Kameraausrichtungen

Die Kameras in der Justieranlage können auf unterschiedliche Weise ausgerichtet werden, so dass die eingehenden Laserstrahlen von jeder Kamera anders aufgenommen werden. Die Informationen über die Kameraausrichtungen müssen der Software mitgeteilt werden. Dafür werden die „Indizes der Kameraausrichtungen“ benutzt.

Für die Ermittlung des Index wird die Kamera entlang der Z-Achse des „Phantoms“ angesehen (siehe Abb. A4-1). Der entsprechende Index wird der Tabelle A4-1 entnommen.

Im aktuell verwendeter „Phantom“-Konstruktion sind die Indizes der Kamera 1 und 2 auf 0 gesetzt, der Index der Kamera 3 ist gleich 5.

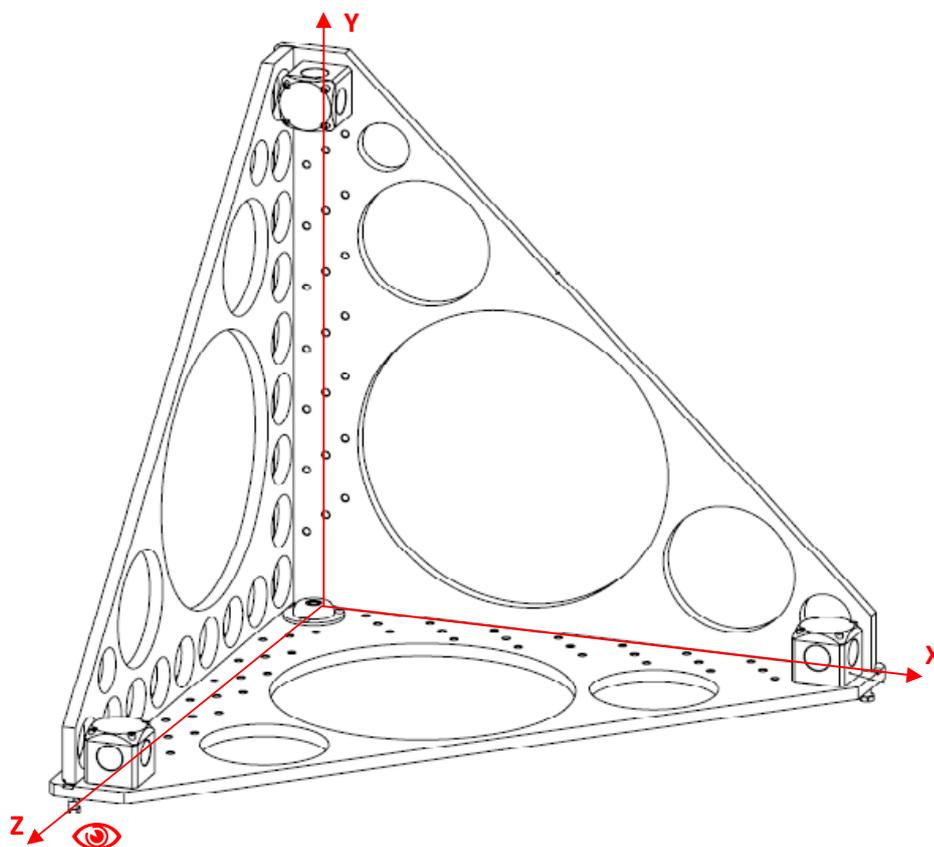


Abbildung A4-1: Koordinatenachse des "Optischen Phantoms"

Anmerkung. Für die ersten Experimente ist ein provisorischer Aufbau des Kameragehäuses verwendet worden, bei dem die Spiegelpyramide auf eine quadratische Metallplatte angeklebt ist. Diese Platte wird mit vier Gewindestiften an die Kameraplatine angeschraubt. In allen nachfolgenden Abbildungen wird diese Konstruktion, betrachtet aus verschiedenen Blickwinkeln, schematisch dargestellt.

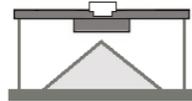
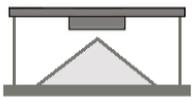
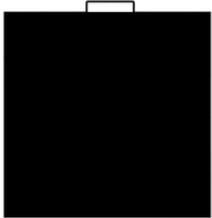
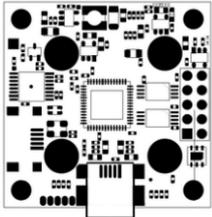
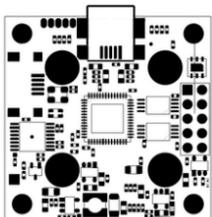
Index	Ausrichtung USB-Anschluss	Ausrichtung Pyramidenspitze	Blickwinkel entlang der Z-Achse des „Phantoms“
0	Nach vorne	Nach oben	
1	Nach hinten	Nach oben	
2	Nach oben	Nach hinten	
3	Nach unten	Nach hinten	
4	Nach unten	Nach vorne	
5	Nach oben	Nach vorne	

Tabelle A4-1: Indexe der Kameraausrichtungen