



TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Fakultät für Elektrotechnik und Informatik

Institut für Technische Informatik und Mikroelektronik

## Diplomarbeit

**Untersuchung und Evaluierung von Methoden zur Kalibrierung optischer  
Sensoren in Verbindung mit Lagesensoren**

---

eingereicht im: Juni 2007

von: Henry Meißner

verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. habil. O. Hellwich

Mitberichter: Dr.-Ing. V. Rodehorst

Betreuer: Dr.-Ing. A. Börner

Dipl.-Ing. D. Griessbach

---

# Danksagung

An dieser Stelle danke ich allen Personen, die mir in der Zeit meiner Diplomarbeit zu Seite standen. Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Olaf Hellwich, der mich durch seine Lehre an der TU Berlin erst an das Thema der Photogrammetrie herangeführt hat und mir darüber hinaus die Möglichkeit gab, meine Arbeit extern am Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt anzufertigen. Ebenfalls erwähnen möchte ich Dr. Volker Rodehorst, der mir in den Vorlesungen zur Computer Vision das Wissen vermittelte, welches die Grundlage für meine Diplomarbeit bildete. Für die tatkräftige Unterstützung bei meinen Recherchen und Ausarbeitungen danke ich allen Mitarbeitern der Einrichtung „Optische Informationssysteme“ am DLR in Berlin-Adlershof. Speziell danken möchte ich dabei Dr. Anko Börner und Dipl.-Ing. Denis Griebach, durch die ich auch in ratlosen Momenten zu neuen Ideen kommen konnte.

Berlin, Juni 2007

Henry Meißner

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>vi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>viii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Thema und Problemstellung . . . . .	1
1.2 Gliederung . . . . .	2
<b>2 Photogrammetrische Kalibration</b>	<b>3</b>
2.1 Grundlagen . . . . .	3
2.1.1 Ausgangspunkt . . . . .	3
2.1.2 Homographie . . . . .	4
2.2 Kalibrationsprozess . . . . .	5
2.2.1 Kameramatrix . . . . .	5
2.2.2 Parameter der radialsymmetrischen Verzeichnung . . . . .	6
2.2.3 Zusammenführung der Einzelkalibrationen . . . . .	6
2.3 Umsetzung in der Praxis . . . . .	7
2.3.1 Kalibrationsobjekt . . . . .	7
2.3.2 Aufnahme der Bilder . . . . .	8
2.3.3 Detektion der Kreuzungspunkte . . . . .	8
2.3.4 Homographie und radiale Verzeichnungsparameter . . . . .	12
2.4 Stereokamerakalibration . . . . .	14

2.4.1	Ansatz . . . . .	14
2.4.2	Absolute Orientierung . . . . .	15
2.4.3	Relative Orientierung . . . . .	16
2.5	Konzept einer Kalibration Kamera - Neigungssensor . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Alternative Kalibrationsverfahren</b>	<b>21</b>
3.1	Kalibration mit einem Goniometer . . . . .	21
3.1.1	Grundidee . . . . .	21
3.1.2	Mathematische Grundlagen . . . . .	21
3.1.3	Praktische Umsetzung . . . . .	25
3.2	Kalibration mit diffraktiv optischen Elementen . . . . .	28
3.2.1	Grundidee . . . . .	28
3.2.2	Versuchsaufbau . . . . .	30
3.2.3	Geometrische Kalibration . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>35</b>
4.1	Bewertung des implementierten, photogrammetrischen Algorithmus . . .	35
4.1.1	Genauigkeit der Punktdetektion . . . . .	36
4.1.2	Innere, äußere und relative Orientierung, Verzeichnungsparameter	38
4.2	Vergleich der Kalibrationsverfahren . . . . .	41
4.2.1	Bildhauptpunkt . . . . .	42
4.2.2	Ergebnisse . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>46</b>
<b>A</b>	<b>Das Lochkameramodell</b>	<b>48</b>
<b>B</b>	<b>Initialisierung der photogrammetrischen Parameter</b>	<b>50</b>
B.1	Der normierte 4-Punkt-Algorithmus zur Bestimmung der Homographie .	50
B.2	Interne und externe Orientierung aus der projektiven Transformation . .	51

<b>C Bestimmung der optischen Achse</b>	<b>54</b>
C.1 Ansatz . . . . .	54
C.2 Fixierung des Hauptpunktes mit Hilfe der Newtonschen Ringe . . . . .	55
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>58</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufnahmekonstellation mit sich ändernder Objekt-Bild-Rotation und Objekt-Bild-Translation [Matlab] . . . . .	9
2.2	Kantenbild einer Kalibrationsaufnahme [Matlab] . . . . .	10
2.3	Weicher Übergang der Grauwerte von Schwarz zu Weiß [Matlab] . . . . .	11
2.4	(Oben) Mögliche Anordnung der „Pattern“ einer Aufnahme; (Unten) Korrespondierende Masken für die Kreuzkorrelation [Matlab] . . . . .	11
2.5	(Links) Mit Schwelle detektierte Punktwolke; (Rechts) Gewichtet ermittelter, zugehöriger Kreuzungspunkt [Matlab] . . . . .	12
2.6	Schematischer Verlauf (von Links nach Rechts) einer Schritt für Schritt Punktdetektion [Matlab] . . . . .	14
2.7	Stereokamerasystem mit Neigungssensoren . . . . .	15
3.1	Raumstrahlen in Kugelkoordinaten [18] . . . . .	22
3.2	Zwei-Achsen-Manipulator und Kollimator [Photo v. Verfasser] . . . . .	26
3.3	Aufnahme des Kollimatorstrahls mit höherer Intensität [2] . . . . .	28
3.4	Idealisierte, verzeichnungsfreie Aufnahmesituation der Goniometerkalibration mit reduzierter Punktmenge [2] . . . . .	29
3.5	Schematische Darstellung der Erzeugung von Beugungsmustern [3] . . . . .	32
3.6	Schematischer Versuchsaufbau [3] . . . . .	33
3.7	Zuordnung von extrahierten (Hell) und idealen (Dunkel) Koordinaten; links: Passpunktfeld $5 \times 5$ , rechts: Passpunktfeld $31 \times 31$ [3] . . . . .	33
3.8	Ablaufschema der Kalibration mit DOE [3] . . . . .	34

4.1	Kalibrationsszene, erzeugt mit dem Simulator [Matlab] . . . . .	36
4.2	Bewertung der Punktdetektion durch Abstand der errechneten zur tatsächlichen Position [Matlab] . . . . .	37
4.3	Bestimmung des euklidischen Abstands zu einer extrahierten Geraden . .	44
A.1	Lochkameramodell [1] . . . . .	48
C.1	Aufbau zur Detektion der optischen Achse über Reflektion [2] . . . . .	56
C.2	Initiale Justierung (Links) Anfangszustand (Rechts) waagerechtes Reflexionsbild [2] . . . . .	56
C.3	Ausrichtung der optischen Achse; (Links, Mitte) dejustierte Kamera, (Rechts) justierte Kamera [3] . . . . .	57

# Tabellenverzeichnis

4.1	Genauigkeit der Punktdetektion der simulierten Bilder . . . . .	37
4.2	Genauigkeit der Punktdetektion der realen Bilder . . . . .	37
4.3	Parameter Kamera 1 . . . . .	38
4.4	Parameter Kamera 2 . . . . .	38
4.5	Rotationswinkel Kamera 1 . . . . .	39
4.6	Rotationswinkel Kamera 2 . . . . .	40
4.7	Verzeichnungsparameter beider Kameras . . . . .	40
4.8	Werte der relativen Orientierung . . . . .	41
4.9	Werte der relativen Orientierung . . . . .	43
4.10	Mittlerer euklidischer Abstand und Standardabweichung aller Kreuzungs- punkte zur jeweils extrahierten Geraden . . . . .	44

# 1 Einleitung

## 1.1 Thema und Problemstellung

Im Rahmen eines Projektes<sup>1</sup> des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in der Einrichtung Optische Informationssysteme, Berlin-Adlershof, wird ein Robotersystem entwickelt, das autonom, durch ihm unbekannte Räume, navigieren soll und dazu mit verschiedensten Sensoren ausgerüstet ist. Neben GPS<sup>2</sup>, inertialen Messeinheiten, und Neigungssensoren kommt auch ein Stereokamerapaar als optischer Sensor zum Einsatz. Mit Hilfe dieser Kameras soll die Bahn bzw. der Weg des Robotersystems verfolgt und aufgenommen werden können, indem Winkel- und Positionsänderungen aus einer Stereobildfolge bestimmt werden. Die Entwicklung dieses Algorithmus wurde bereits in [15] umgesetzt.

Um den systematischen Fehler der Berechnung von Position und Lage zu minimieren, bedarf es einer möglichst genauen Kenntnis der Kamera(s). Das bedeutet, sowohl die Parameter der Einzelkamera als auch die Orientierung der Bildsensoren zueinander müssen bekannt sein. Dazu werden in dieser Arbeit verschiedene Methoden der Kalibration behandelt und bewertet.

---

<sup>1</sup>Projekt IPS - Indoor Positionierungssystem; internes Projekt des DLR, Institut für Robotik und Mechatronik

<sup>2</sup>GPS - Global Positioning System

## 1.2 Gliederung

In Kapitel (2) wird ein photogrammetrisches Verfahren vorgestellt, mit dem die innere und äußere Orientierung von Bildsensoren bestimmt werden kann. Weiterhin wird gezeigt, wie die Orientierung zweier Kameras zueinander, aus den so erhaltenen Parametern, berechnet wird. Dieses Verfahren wurde im Zuge dieser Arbeit in einem Programm umgesetzt. Anschließend wird ein Konzept zur Stützung dieses Algorithmus mit Hilfe von Lagesensoren vorgestellt.

Kapitel(3) behandelt zwei Methoden, mit denen Kameraparameter durch genaue, optische Vermessung der Bildsensoren gewonnen werden können. Während ein Verfahren eine opto-mechanische Messmethode darstellt, nutzt das andere Verfahren diffraktiv-optische Elemente zur Vermessung der Kameraoptik.

In Kapitel (4) werden zunächst die Ergebnisse des entwickelten Algorithmus aus Kapitel (2) untersucht, sowie Fehler und Fehlerquellen diskutiert. Abschließend werden die Ergebnisse aller vorgestellten Methoden miteinander verglichen und bewertet.

Zusammenfassend soll Kapitel (5) unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse einen Ausblick stellen.

# 2 Photogrammetrische Kalibration

## 2.1 Grundlagen

Die Photogrammetrie ist eine Disziplin der Ingenieurwissenschaften, die Informationen der realen Welt aus Bildern extrahiert. Mit anderen Worten kann man sagen, dass aus zweidimensionalen Abbildungen dreidimensionale Daten gewonnen werden. Um zu solchen Informationen zu gelangen, werden Bildsensoren eingesetzt, die vorab kalibriert werden müssen. Diese Kalibration liefert eine genaue Beschreibung der Kamera, damit die Projektion aus dem realen Raum in den Bildraum eindeutig nachvollziehbar ist. In den folgenden Abschnitten soll eine Methode erläutert werden, mit der eine Kalibration mit zweidimensionalen Kalibrationsobjekten flexibel realisiert werden kann.

### 2.1.1 Ausgangspunkt

Ausgehend vom Lochkammermodell<sup>1</sup> wird die Abbildung eines Objektpunktes, in homogenen Koordinaten  $\mathbf{M} = [X, Y, Z, 1]^T$ , in den Bildraum mit dem zugehörigen Bildpunkt, in homogenen Koordinaten  $\mathbf{m} = [u, v, 1]^T$ , durch Gleichung (2.1) beschrieben [21].

$$s \mathbf{m} = \mathcal{K} [R_C^O \ t_C^O] \mathbf{M} \quad (2.1)$$

Die Rotationsmatrix  $R_C^O = [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{r}_3]$  und der Translationsvektor  $t_C^O = [t_x, t_y, t_z]^T$  werden als extrinsische Parameter verstanden. Sie orientieren das Kamerakoordinatensystem (C - Camera) zum Objektkoordinatensystem (O - Objekt). Der Parameter  $s$  ist diesbezüglich ein beliebiger Skalierungsfaktor. Die Kameramatrix  $\mathcal{K}$ , auch intrinsische

---

<sup>1</sup>Lochkammermodell - siehe Anhang (A)

Matrix genannt, ist gegeben durch

$$\mathcal{K} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Die Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  werden durch die Brennweite (in Pixel) bestimmt und  $\gamma$  entspricht der Scherung der Bildachsen. Die Parameter  $u_0$  und  $v_0$  sind die Koordinaten des Bildhauptpunktes. Der Bildhauptpunkt bezeichnet in der Photogrammetrie die optische Mitte einer Abbildung. Bei realen Objektiven ist dies nicht identisch mit der Bildmitte.

### 2.1.2 Homographie

Eine Homographie ist eine projektive Transformation [14], durch die eine Abbildung von geometrischen Objekten beschrieben werden kann. In diesem Fall wird eine Homographie im zweidimensionalen Raum betrachtet. Ein Objektpunkt  $\mathbf{M}$  wird durch eine Homographie  $\mathcal{H}$  zu  $\mathbf{m}$  abgebildet mit

$$s \mathbf{m} = \mathcal{H} \mathbf{M} \quad (2.3)$$

wobei gilt:  $\mathcal{H} = \mathcal{K} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{t}]$ .

Mit der Annahme, dass die Modellebene in  $Z = 0$  des Objektkoordinatensystems liegt (d.h. alle Objektpunkte müssen in einer Ebene liegen), vereinfacht sich Gleichung (2.1) ausgehend von

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathcal{K} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{r}_3 \ \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

zu der Form

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathcal{K} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

Aus  $n \geq 4$  Beobachtungen von Objekt- und homologen Bildpunkten, lässt sich eine Matrix  $\mathcal{L}$  bilden und aus dem zugehörigen homogenen Gleichungssystem  $\mathcal{L} x = 0$  die

Homographie mittels Singulärwertzerlegung bestimmen. Eine ausführliche Beschreibung dazu befindet sich im Anhang (B.1).

## 2.2 Kalibrationsprozess

### 2.2.1 Kameramatrix

Die Matrixkomponenten  $\mathbf{r}_1$  und  $\mathbf{r}_2$  aus Gleichung (2.5) sind orthonormal. Daraus lassen sich, mit  $\mathcal{H} = [\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \mathbf{h}_3]$ , folgende Beziehungen ableiten:

$$\mathbf{h}_1^T \mathcal{K}^{T-1} \mathcal{K}^{-1} \mathbf{h}_2 = 0 \quad (2.6)$$

$$\mathbf{h}_1^T \mathcal{K}^{T-1} \mathcal{K}^{-1} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T \mathcal{K}^{T-1} \mathcal{K}^{-1} \mathbf{h}_2 \quad (2.7)$$

Aus der zuvor bestimmten Homographie und den Gleichungen (2.6) und (2.7) lässt sich nun ein homogenes Gleichungssystem aufstellen, welches den Lösungsvektor für die symmetrische Matrix  $(\mathcal{K}^{T-1} \mathcal{K}^{-1})$  liefert, aus dem wiederum die Kameraparameter  $\alpha, \beta, \gamma, u_0$  und  $v_0$  extrahiert werden können. Die Initialwerte für  $R_C^O$  und  $t_C^O$  werden ebenfalls aus der projektiven Transformationsmatrix  $\mathcal{H}$  bestimmt. Eine ausführliche Beschreibung zur Berechnung von  $\mathcal{K}$ ,  $R_C^O$  und  $t_C^O$ , befindet sich im Anhang (B.2).

Mit Hilfe einer Maximum-Likelihood-Schätzung (MLE)<sup>2</sup> werden die Ergebnisse verfeinert, indem die Distanz der Punkte, die aus den Bildern extrahiert wurden, und die Punkte, welche aus den berechneten Parametern „rückgerechnet“ wurden, nach folgender Vorschrift minimiert wird:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|m_{ij} - \hat{m}(\mathcal{K}, R_{C_i}^O, t_{C_i}^O, M_j)\|^2 \quad (2.8)$$

Hierbei entspricht  $m_{ij}$  dem „i-ten“ Punkt im „j-ten“ Bild. Der Ausdruck  $\hat{m}(\mathcal{K}, R_{C_i}^O, t_{C_i}^O, M_j)$  steht für den homologen Punkt, der durch die initiierten Parameter berechnet wurde.

---

<sup>2</sup>MLE - gebräuchlicher als MLS, da abgeleitet von Maximum Likelihood Estimation

### 2.2.2 Parameter der radialsymmetrischen Verzeichnung

Sobald ein aufgenommenes Bild radialsymmetrische Verzeichnungen aufweist, macht man einen systematischen Fehler bei der oben beschriebenen Berechnungsmethode. Aus diesem Grund muss diese Verzeichnung geeignet parametrisiert bzw. modelliert werden. In der Praxis wird eine radialsymmetrische Verzeichnung häufig mit einem Polynom  $n$ -ter Ordnung modelliert, wobei oftmals nur den ersten beiden Teiltermen eine gewichtige Rolle zugesprochen wird. Für diesen Fall sieht das Modell folgendermaßen aus:

$$u_r = u + (u - u_0)[k_1(u_n^2 + v_n^2) + k_2(u_n^2 + v_n^2)^2] \quad (2.9)$$

$$v_r = v + (v - v_0)[k_1(u_n^2 + v_n^2) + k_2(u_n^2 + v_n^2)^2] \quad (2.10)$$

Die tatsächliche (verzeichnete) Position eines Punktes  $(u_r, v_r)$  ist die radiale Verschiebung des berechneten Punktes  $(u, v)$  in Abhängigkeit vom Bildhauptpunkt  $(u_0, v_0)$  um die Distanz, die bestimmt wird durch die Verzeichnungsparameter  $k_1$  und  $k_2$  sowie die normalisierten Bildkoordinaten  $u_n$  und  $v_n$ .

Aus den Beziehungen (2.9) und (2.10) ergeben sich zwei Gleichungen für jeden Punkt,

$$\begin{bmatrix} (u - u_0)(u_n^2 + v_n^2) & (u - u_0)(u_n^2 + v_n^2)^2 \\ (v - v_0)(u_n^2 + v_n^2) & (v - v_0)(u_n^2 + v_n^2)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_r - u \\ v_r - v \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

so dass sich die Lösung aus der Methode der kleinsten Quadrate direkt aus dem Gleichungssystem  $Dk = d$  ergibt, wobei sich  $D$  aus jeweils zwei Beobachtungen von  $m$  Punkten aus  $n$  Bildern zusammensetzt.

### 2.2.3 Zusammenführung der Einzelkalibrationen

Die Prozedur zur Bestimmung der Kameramatrix  $\mathcal{K}$ , der Rotationsmatrix  $R_C^O$  und des Translationsvektors  $t_C^O$  ist separat zur Bestimmung der radialsymmetrischen Verzeichnungsparameter  $k_1$  und  $k_2$  implementiert. Tatsächlich hängt jedoch die Genauigkeit beider Verfahren direkt von einander ab, da in beiden Fällen die mathematisch bestimmten Punkte möglichst genau sein müssen, um die tatsächliche Distanz zwischen den grafisch

extrahierten und den berechneten Punkten mittels MLE zu minimieren. Während man einerseits die beiden Prozeduren alternierend mit den aktualisierten Parametern des jeweils anderen Verfahrens anwenden kann, ist es ebenso möglich, alle Parameter innerhalb einer MLE zu schätzen:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|m_{ij} - \hat{m}(\mathcal{K}, k_1, k_2, R_{C_i}^O, t_{C_i}^O, M_j)\|^2 \quad (2.12)$$

## 2.3 Umsetzung in der Praxis

### 2.3.1 Kalibrationsobjekt

Um den Zusammenhang der Abbildung eines Punktes vom Objektraum in den Bildraum laut Gleichung (2.1) lösen zu können bedarf es einer genauen Kenntnis des Kalibrationsobjektes. Das bedeutet, sowohl über die geometrischen Abmessungen als auch über die Genauigkeiten dieser Maße muss man hinreichend genaue Aussagen treffen können. In der Praxis ist die Verwendung von Objekten mit einem Schachbrettmuster sehr verbreitet, da eine Punktdetektion an den Ecken vier benachbarter Elemente eine einfache und sichere Methode zur eindeutigen Merkmalsextraktion bietet. Eine andere Möglichkeit wäre beispielsweise ein Kalibrationsobjekt bestehend aus äquidistant verteilten Kreisen, bei denen man die Merkmale als Mittelpunkt der einzelnen Elemente extrahieren kann. Durch reale, perspektivische Transformation ist jedoch die Bestimmung der Zentren der entstehenden Ellipsen nicht trivial.

In dem konkreten Fall, der in dieser Arbeit behandelt wird, ist ein Kalibrationsschachbrett von einer professionellen Druckfirma in A0 mit 12 x 16 Elementen zum Einsatz gekommen. Jedes Element hat dabei eine Ausdehnung von 60 x 60 mm. Um zu garantieren, dass die Z-Ebene überall im Objekt tatsächlich zu 0 angenommen werden kann, wurde die Rückseite mit ausreichend starken Metallstreben verstärkt, so dass eine

Scherung<sup>3</sup> oder Torsion<sup>4</sup> verhindert wird.

### 2.3.2 Aufnahme der Bilder

Der durch Gleichung (2.12) beschriebene Minimierungsalgorithmus schätzt bei einem Durchlauf die Kameramatrix  $\mathcal{K}$ , die Rotation der Kamera  $R_C^O$  zum Objekt, die Translation  $t_C^O$  zum Objekt und zwei Parameter der radialsymmetrischen Verzeichnung  $k_1$  und  $k_2$ . Aus diesem Grund ist es notwendig Bilder aufzunehmen und zu nutzen, die möglichst viele unterschiedliche Informationen zu den einzelnen Parametern liefern. Das bedeutet, dass neben einer signifikanten Änderung der Objekt-Bild-Translation auch die Objekt-Bild-Rotation zwischen den Bildern zu ändern ist. Terme der radialen Verzeichnung lassen sich konsistent bestimmen, indem garantiert wird, dass Punkte im gesamten Sensorbild zu finden sind.

Eine mögliche Konstellation ist in Bild (2.1) dargestellt. Teilbild (1) zeigt hierbei die Zentralperspektive, die Teilbilder (2) bis (5) eine Translation nach rechts, links, oben bzw. unten mit einer jeweiligen Rotation zum Objektmittelpunkt und Teilbild (6) eine um die Z-Ebene rotierte Zentralperspektive.

### 2.3.3 Detektion der Kreuzungspunkte

Das kleinste eindeutige Merkmal dieses Kalibrationsfeldes ist der Punkt, an dem die Ecken vier benachbarter Elemente zusammentreffen. Diese Punkte haben zu deren nächsten Nachbarn den gleichen Abstand, welcher der Länge oder Breite eines Elements entspricht. Es gibt verschiedene Methoden zur Extraktion dieser Kreuzungspunkte. Eine Möglichkeit ist es, aus einem Bild die horizontalen und vertikalen Linien bzw. Kanten zu nutzen um Kreuzungspunkte am Schnitt einer Vertikalen mit einer Horizontalen zu

---

<sup>3</sup>Scherung - [mechanisch] Verformung eines Materials durch zwei parallel zueinander in entgegengesetzter Richtung wirkende Kräfte [6]

<sup>4</sup>Torsion - schraubenförmige Verdrehung langgestreckter Körper durch entgegengesetzt gerichtete Drehmomente [6]

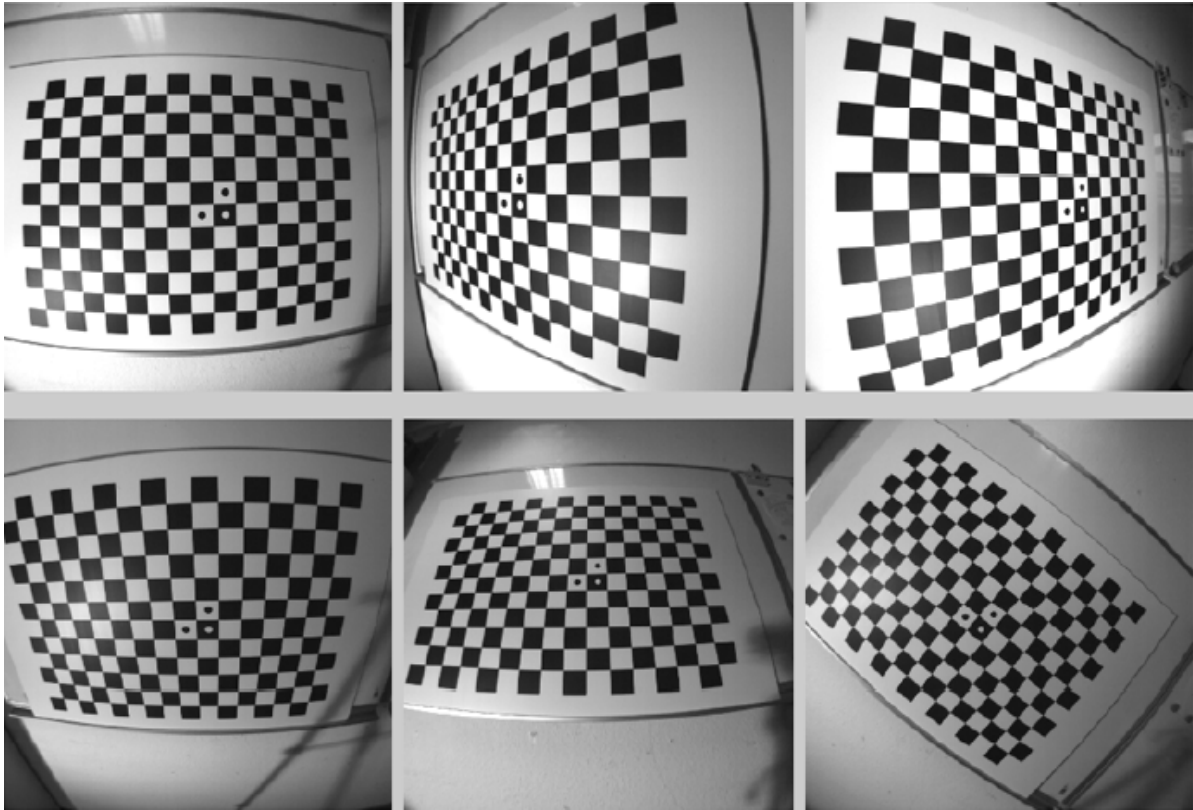


Abbildung 2.1: Aufnahmekonstellation mit sich ändernder Objekt-Bild-Rotation und Objekt-Bild-Translation [Matlab]

detektieren. Hierzu wird die Bildmatrix Faltung<sup>5</sup> mit einem Kernel transformiert. Ein Beispiel für einen Kernel zur Kantenextraktion ist der Laplace-Operator:

$$D_{xy}^2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Eine Faltungsberechnung lässt sich mit Hilfe der Fast-Fourier-Transformation<sup>6</sup> zu einer Multiplikation vereinfachen. Dabei wird das Bild in den Frequenzraum transformiert. Nach Multiplikation mit dem ebenfalls transformierten Kernel und inverser Fast-Fourier-Transformation enthält das Bild lediglich die Kanten, mit denen die Erkennung der Kreu-

<sup>5</sup>Faltung - ein mathematischer Operator, der für zwei Funktionen f und g eine dritte Funktion liefert.

Diese gibt eine Art „Überlappung“ zwischen f und einer gespiegelten und verschobenen Version von g an und ähnelt einem gleitenden Durchschnitt. [6]

<sup>6</sup>Fast Fourier Transformation kurz FFT - ist die Überführung einer Funktion in ihre spektralen Anteile, in Grauwertbildern sind dies die zweidimensionalen Grauwertdifferenzen benachbarter Pixel [6]

zungspunkte vollzogen werden kann. Ein Beispiel hierfür zeigt Bild (2.2). Experimentell

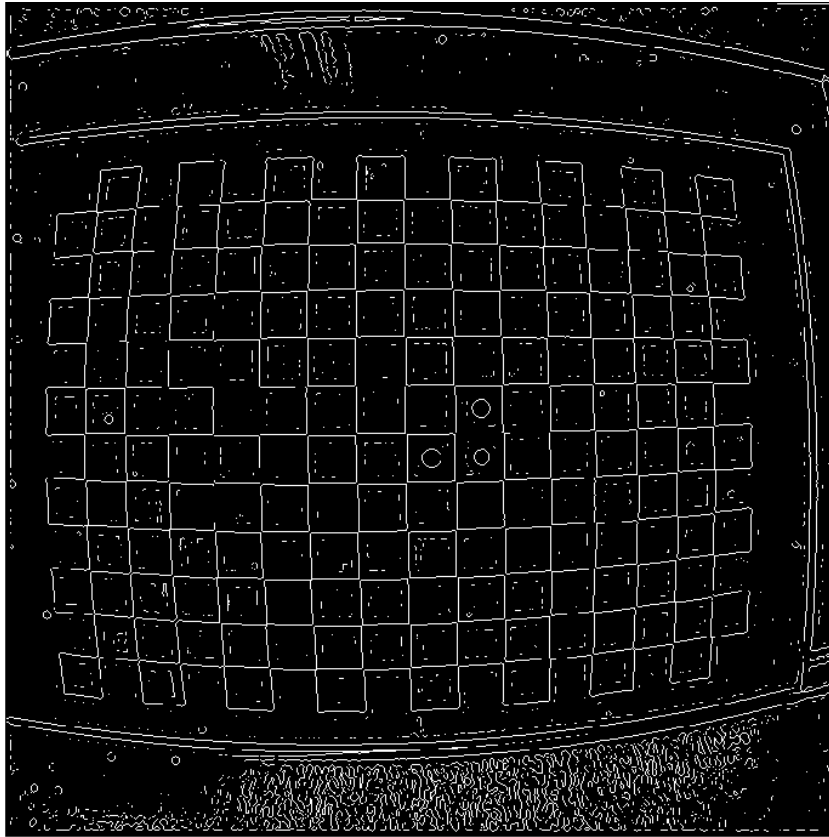


Abbildung 2.2: Kantenbild einer Kalibrationsaufnahme [Matlab]

hat sich dabei gezeigt, dass der Verlauf der Kanten nicht stetig auf einer Linie erfolgt, sondern Sprünge um mehrere Pixel nicht selten sind. Dies ist unter Umständen durch geeignete Vorabfilterung kompensierbar. Der Übergang eines schwarzen Elements des Kalibrationsobjektes zu einem weißen Element ist jedoch keineswegs eindeutig, wie Bild (2.3) zeigt.

Mit Hilfe der normalisierten Kreuzkorrelation ist es möglich ohne Vorfilterung den Schnittpunkt vier benachbarter Elemente subpixelgenau zu bestimmen. Hierzu wird zuerst ein Bereich, in dem ein Kreuzungspunkt liegen soll, entweder durch externe Eingabe (z.B. Computermaus oder manuelle Bildkoordinatenangabe) oder durch Berechnung (mit hinreichenden Vorkenntnissen) aus dem Bild extrahiert. Im abstrahierten Fall gibt



Abbildung 2.3: Weicher Übergang der Grauwerte von Schwarz zu Weiß [Matlab]

es [vgl. Bild (2.4)] vier verschiedene Möglichkeiten, wie sich die Anordnung der Kalibrationselemente gestalten kann. Die dazu korrespondierenden Masken, mit der die Korrelation berechnet werden soll, sind jeweils darunter abgebildet. Ein Vorteil dieses

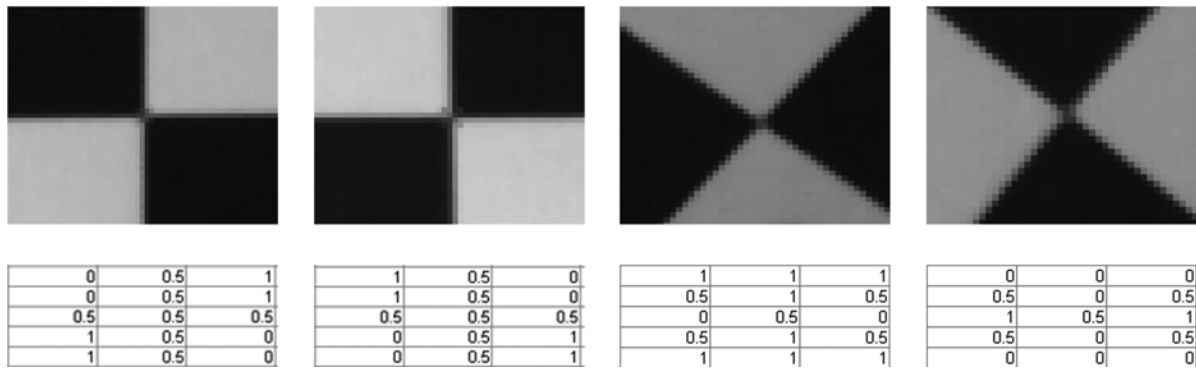


Abbildung 2.4: (Oben) Mögliche Anordnung der „Pattern“ einer Aufnahme; (Unten) Korrespondierende Masken für die Kreuzkorrelation [Matlab]

Verfahrens im Vergleich zu dem Verfahren der Kantenextraktion ist, dass es durch geeignete Maskengenerierung möglich ist, den nicht eindeutigen Schwarz-Weiß-Übergang zu modellieren. Der Übergang von 0 auf 1 wird über den Zwischenwert 0.5 innerhalb der verwendeten Maske realisiert. Anschließend wird an jeder Stelle des Bildausschnittes die normalisierte Kreuzkorrelation mit der Gleichung

$$r_{KKF} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (A_{ij} - \bar{A})(B_{ij} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (A_{ij} - \bar{A})^2)(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (B_{ij} - \bar{B})^2)}} \quad (2.14)$$

berechnet und der jeweilige Skalar in einer Matrix abgelegt. Diese Matrix enthält aufgrund der Normalisierung nur Werte zwischen 0 und 1. Mit Hilfe dieser Koeffizienten lassen sich nun die Koordinaten des Bildausschnittes so wichten, dass nach anschließender Mittelwertbildung, über alle Koordinaten des Teilbildes, der Kreuzungspunkt subpixelgenau bestimmt ist. Unter Verwendung eines Schwellwertes für die Signifikanz eines Koeffizienten ist es möglich den Bereich um einen potentiellen Kreuzungspunkt weiter einzuschränken. Bild (2.5) zeigt, die mit der Schwelle ( $r_{KKF} \geq 0.5$ ) erhaltene Punktwolke, welche zur Mittelwertberechnung genutzt wird und den daraus resultierenden Punkt.

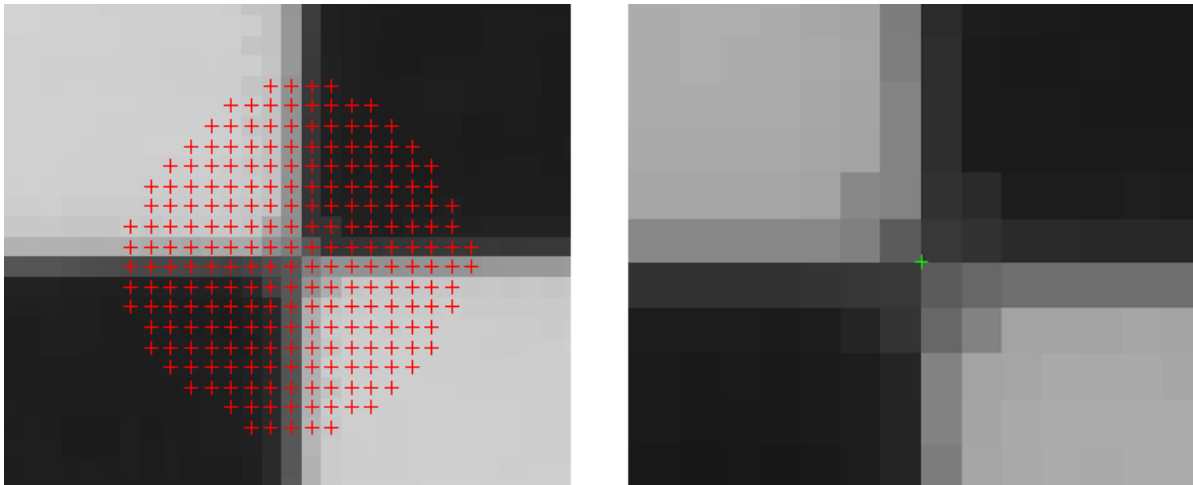


Abbildung 2.5: (Links) Mit Schwelle detektierte Punktwolke; (Rechts) Gewichtet ermittelter, zugehöriger Kreuzungspunkt [Matlab]

### 2.3.4 Homographie und radiale Verzeichnungsparameter

Wie aus Gleichung (2.3) ersichtlich, ist der Ausgangspunkt aller Berechnung die Homographie  $\mathcal{H}$ , aus der alle Parameter für die weitere Schätzung berechnet werden. Hierzu

ist es unabdingbar diese Transformation hinreichend genau bestimmen zu können. Ein mögliches Problem ist, dass Kreuzungspunkte aus dem aufgenommenen Bild zwar ausreichend exakt detektiert werden, die tatsächliche Position aber aufgrund einer radialen Verzeichnung [vgl. Gleichung (2.9) und (2.10)] verschoben von der erkannten Position ist. Die radiale Verzeichnung hat ihren Ursprung im Bildhauptpunkt der Aufnahme. Die Wirkung der radialen Komponente ist hier gleich null. Deshalb empfiehlt es sich die Punkte, welche in die Berechnung der Homographie eingehen sollen nahe dem Bildhauptpunkt zu wählen. Da dieser Punkt jedoch erst mittels Kalibration bestimmt werden soll ist es lediglich möglich der Annahme zu folgen, dass der Hauptpunkt voraussichtlich in der Nähe des Mittelpunktes der Aufnahme liegt. Somit sollten alle Punkte für die Initialberechnung im Bereich des Zentrums des Bildes sein.

Die erste Eingabe kann, wie auf Seite 10 bereits erwähnt, extern erfolgen. Im konkreten Fall dieser Arbeit bedarf das implementierte Programm einer Eingabe per Maus um die Punkte für die Berechnung der Homographie mit dem normierten 4-Punkt-Algorithmus<sup>7</sup> zu beginnen.

Nach der daraus resultierenden Initialisierung der Kameramatrix  $\mathcal{K}$ , der Rotation  $R_C^O$  und der Translation  $t_C^O$  erfolgt in einem weiteren Schritt die erste Schätzung der radialsymmetrischen Verzeichnungsparameter  $k_1$  und  $k_2$ .

Mit den in erster Näherung errechneten Werte lassen sich nun mit Gleichung (2.3) und genauer Kenntnis der Objektmatrix  $\mathbf{M}$  Regionen in der Umgebung der Initialisierungspunkte berechnen, in denen dann mit der normalisierten Kreuzkorrelation weitere Punkte detektiert werden. Somit ist es praktikabel Schritt für Schritt neue Koordinaten aufzunehmen um die Schätzung der Parameter nach Maximum-Likelihood zu festigen. Bild (2.6) zeigt hierzu einen schematischen Verlauf. Eine Detektion, aller Punkte, in einem Schritt gestaltet sich oftmals insofern schwierig, dass einerseits die erste Berechnung der Homographie und somit auch die Parameter der inneren und äußeren Orientierung nicht genau genug sind und andererseits die ebenfalls zunächst unzulänglich geschätzten Ver-

---

<sup>7</sup>normierter 4-Punkt-Algorithmus - Erklärung im Anhang (B.1)

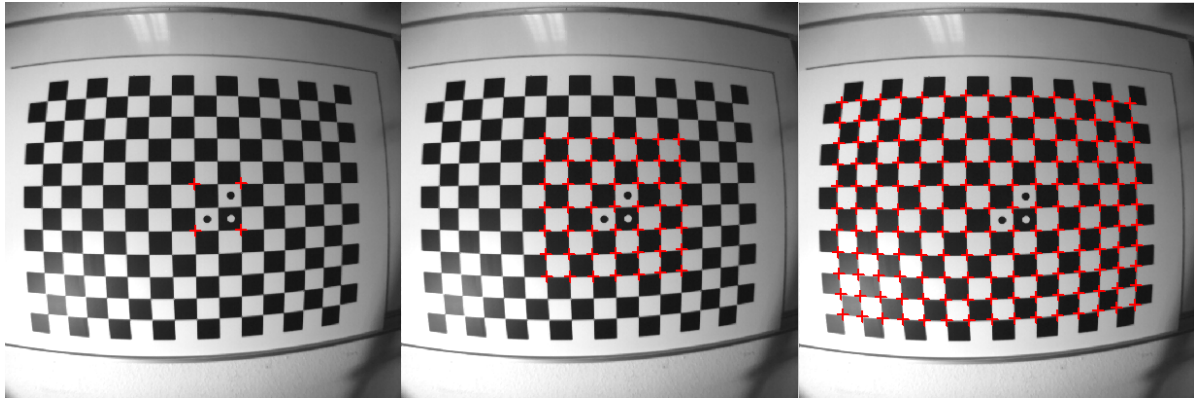


Abbildung 2.6: Schematischer Verlauf (von Links nach Rechts) einer Schritt für Schritt Punktdetektion [Matlab]

zeichnungparameter an Einfluß gewinnen, je größer der Abstand zwischen dem „neuen“ Punkt und dem Bildhauptpunkt wird.

Sobald alle Kreuzungspunkte der Aufnahme erfasst sind und garantiert ist, dass diese über dem gesamten Bildbereich verteilt sind, wird die MLE die Modellparameter so bestimmen, dass der Abstand, zwischen real „gemessenen“ Koordinaten und mittels Modell berechneten Koordinaten, minimal ist.

## 2.4 Stereokamerakalibration

### 2.4.1 Ansatz

Informationen einer Szene, die gleichzeitig aus zwei verschiedenen Perspektiven oder Positionen aufgenommen sind, werden genutzt um daraus räumliche Daten zu extrahieren. Die Genauigkeit dieser Daten hängt entscheidend von der möglichst exakten Kenntnis der relativen Lage der Kameras zueinander ab. Zur Bestimmung der Lage zueinander bedarf es einer Stereokalibration.

Abbildung (2.7) zeigt den Entwicklungsaufbau des Kamerasystems, welches im Zuge

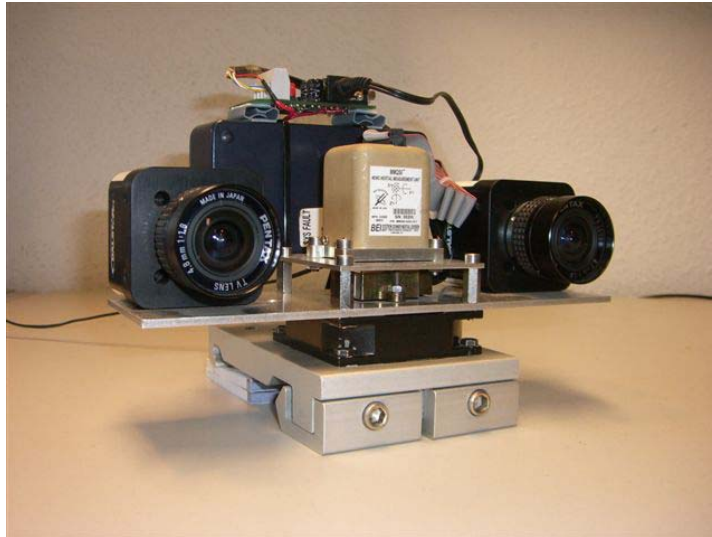


Abbildung 2.7: Stereokamerasystem mit Neigungssensoren

dieser Arbeit kalibriert werden soll, inklusive Neigungssensoren für Roll<sup>8</sup> und Pitch<sup>9</sup>.

## 2.4.2 Absolute Orientierung

Nach Gleichung (2.12) lassen sich für beide Kameras, unabhängig voneinander, die Parameter der inneren Orientierung ( $k_1, k_2$  und  $\mathcal{K}$ ) und die Parameter der äußeren Orientierung ( $R_C^O$  und  $t_C^O$ ) für jede aufgenommene Szene bestimmen. Man erhält also eine absolute Kamera-Objekt Orientierung für jeden der beiden Bildsensoren. Unter der Voraussetzung, dass beide Kameras zum gleichen Zeitpunkt die gleiche Szene beobachteten, kann die gemeinsame Orientierung des Kamerapaares mit den Gleichungen (2.15) und (2.16) ermittelt werden.

---

<sup>8</sup>Roll - Drehbewegung um die X-Achse eines Rechts-Hand-Koordinatensystems (Verwendung in der Luftfahrt: X - Flugrichtung; Y - Richtung rechte Tragfläche; Z - senkrecht zu X und Y, nach unten zeigend) [4]

<sup>9</sup>Pitch - Drehbewegung um die Y-Achse eines Rechts-Hand-Koordinatensystems [4]

$$R_{Cam1}^{Cam2} = (R_{Cam1}^O)(R_{Cam2}^O)^{-1} \quad (2.15)$$

$$t_{Cam1}^{Cam2} = t_{Cam1}^O - t_{Cam2}^O \quad (2.16)$$

Wenn nun für alle aufgenommenen Szenen die Orientierung der Kameras zueinander errechnet wird, sind die Parameter nach der Maximum-Likelihood-Schätzung aus Gleichung (2.12) für die Rotationsmatrizen und Translationsvektoren aufgrund eines Restfehlers nicht exakt gleich.

$$(R_{Cam1}^{Cam2})_i \neq (R_{Cam1}^{Cam2})_{i+1} \quad (2.17)$$

$$(t_{Cam1}^{Cam2})_i \neq (t_{Cam1}^{Cam2})_{i+1} \quad (2.18)$$

Durch eine Mittelwertbildung der einzelnen Matrix- bzw. Vektorkomponenten über alle Bilder kann die Lösung stabilisiert werden. Diese Mittelwertbildung ist aber nur unter der Voraussetzung zulässig, dass die Ursache der Restfehler unkorreliert bzw. statistisch unabhängig von der Aufnahmesituation und der Merkmalsextraktion ist. Sind die Parameter der äußeren Orientierung einer oder mehrerer Szenen durch falsche oder eingeschränkte Merkmalszuordnung berechnet worden, so sind diese signifikant falsch und führen zu einer nicht korrekten Verschiebung des Mittelwertes.

### 2.4.3 Relative Orientierung

Die beiden Kameras sind fest auf einer Plattform montiert und können ihre Lage zueinander nicht verändern. Die Differenzen aus den Gleichungen (2.17) und (2.18) entstehen also während der Maximum-Likelihood-Schätzung und nicht physisch. Es bietet sich daher an, einen der beiden Bildsensoren zum Objekt zu orientieren und den zweiten relativ zum Ersten. Dazu wird nach der Initialisierung der äußeren und inneren Orientierung beider Kameras,  $R_{Cam1}^{Cam2}$  und  $t_{Cam1}^{Cam2}$  nach Gleichung (2.15) und (2.16) initial bestimmt und Gleichung (2.12) erweitert:

$$\sum_{c=1}^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|m_{cij} - \hat{m}(\mathcal{K}_c, k_{c1}, k_{c2}, R_{C_{ci}}^O, t_{C_{ci}}^O, R_{Cam1}^{Cam2}, t_{Cam1}^{Cam2}, M_j)\|^2 \quad (2.19)$$

Dabei steht  $c$  als Index der betrachteten Kamera. Im Fall des relativ orientierten Bildsensors kann man  $R_{C\ 2i}^O$  und  $t_{C\ 2i}^O$  aus den korrespondierenden Parametern  $R_{C\ 1i}^O$ ,  $t_{C\ 1i}^O$  und  $R_{Cam1}^{Cam2}$ ,  $t_{Cam1}^{Cam2}$  berechnen:

$$R_{C\ 2i}^O = (R_{Cam1}^{Cam2})^{-1} R_{C\ 1i}^O \quad (2.20)$$

$$t_{C\ 2i}^O = t_{C\ 1i}^O - t_{Cam1}^{Cam2} \quad (2.21)$$

Durch diese Erweiterung des Algorithmus erreicht man eine größere Überbestimmung des Gleichungssystems zur Schätzung der Parameter. Es müssen dreizehn zusätzliche Parameter geschätzt werden.

- Kameraparameter des relativen Bildsensors(5)
- Verzeichnungsparameter des relativen Bildsensors(2)
- die Winkel der relativen Rotation(3)
- die Parameter der relativen Translation (3)

Die Anzahl der Beobachtungen verdoppelt sich jedoch, wenn beide Kameras gleichzeitig die gleiche Szene aufnehmen. Das bedeutet, mit zwei Informationen pro Punkt (x- und y-Koordinate), ist das Gleichungssystem überbestimmter als das Gleichungssystem der Einzelkalibration, sobald mehr als 6 Punkte aufgenommen sind.

## 2.5 Konzept einer Kalibration Kamera - Neigungssensor

Im Verlauf der Maximum-Likelihood-Schätzung aus Gleichung (2.12) werden alle Parameter, ausgehend von den Initialisierungswerten, so modifiziert, dass die mathematische Differenz zwischen allen aufgenommenen Punkten und allen berechneten Punkten minimal ist. Mit steigender Zahl der Bilder und somit auch der beobachteten Punkte nimmt die Zahl der zu schätzenden Parameter der äußeren Orientierung linear zu. Wenn nun diese Parameter ( $R_{C\ i}^O$  und  $t_{C\ i}^O$ ) gemessen anstatt geschätzt werden, so bliebe die Anzahl der

zu schätzenden Variablen konstant, unabhängig von der Zahl der beobachteten Bilder. Mit steigender Anzahl der Bilder steigt somit auch die Überbestimmung des Gleichungssystems und stabilisiert die Lösung.

Mit Hilfe von Neigungssensoren, die im Schwerfeld der Erde absolute Messungen der Rotationswinkel um die X- und Y-Achse im Weltkoordinatensystem messen, erhält man zwei von drei Rotationswinkel, welche in die Schätzung nach Gleichung (2.12) eingehen. Somit kann man diese beiden Winkel der Rechnung entziehen bzw. als Konstanten dem Schätzalgorithmus übergeben. Folgende Anforderungen und mathematischen Zusammenhänge müssen dabei berücksichtigt werden.

Die Neigungssensoren müssen so montiert werden, dass die Achsen des Kamerakoordinatensystems parallel zu den Achsen des Neigungssensorkoordinatensystems sind. Dies ist eine Anforderung an den experimentellen Aufbau und muss durch eine mechanisch genaue Montage erfüllt werden oder im weiteren Verlauf mit in die Schätzung eingehen. Des Weiteren muss der Fehler der Achsenausrichtung innerhalb der Sensoren (Gehäuse-Sensor) berücksichtigt werden. Hersteller geben diesen Fehler im Beiblatt der Neigungssensoren an. Sind diese Anforderungen erfüllt, so ist es möglich folgende mathematischen Zusammenhänge mit den gemessenen Neigungswinkeln zu bilden [8].

Der Neigungswinkel  $\varphi_y$  um die Y-Achse dieses Koordinatensystems wird genutzt, um die X-Achse einer Rotationsmatrix der Sensoren zu konstruieren.

$$e_1 = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_y) \\ 0 \\ -\sin(\varphi_y) \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Die z-Komponente der Y-Achse ergibt sich aus dem Neigungswinkel um die X-Achse des Neigungssensorkoordinatensystem ( $\varphi_x$ ):

$$e_{2z} = \sin(\varphi_x) \quad (2.23)$$

Weiterhin gilt das  $e_1 \perp e_2$ , woraus folgt das deren Skalarprodukt 0 sein muss:

$$0 = e_{1x}e_{2x} + e_{1y}e_{2y} + e_{1z}e_{2z} \quad (2.24)$$

$$0 = e_{2x} \cos(\varphi_y) - \sin(\varphi_y) \sin(\varphi_x) \quad (2.25)$$

$$e_{2x} = \sin(\varphi_x) \tan(\varphi_y) \quad (2.26)$$

Aufgrund der Normierung von  $e_2$  folgt:

$$e_{2y} = \pm \sqrt{1 - e_{2x}^2 - e_{2z}^2} \quad (2.27)$$

$$e_{2y} = \pm \sqrt{\cos(\varphi_x)^2 - \sin(\varphi_x)^2 \tan(\varphi_y)^2} \quad (2.28)$$

Die Z-Achse ( $e_3$ ) steht wiederum senkrecht auf  $e_1$  und  $e_2$ :

$$e_3 = e_1 \times e_2 \quad (2.29)$$

$$e_3 = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_y) \\ 0 \\ -\sin(\varphi_y) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \sin(\varphi_x) \tan(\varphi_y) \\ \pm \sqrt{\cos(\varphi_x)^2 - \sin(\varphi_x)^2 \tan(\varphi_y)^2} \\ \sin(\varphi_x) \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

$$e_3 = \begin{pmatrix} \sin(\varphi_y) \cdot \pm \sqrt{\cos(\varphi_x)^2 - \sin(\varphi_x)^2 \tan(\varphi_y)^2} \\ -\frac{\sin(\varphi_x)}{\cos(\varphi_y)} \\ \cos(\varphi_y) \cdot \pm \sqrt{\cos(\varphi_x)^2 - \sin(\varphi_x)^2 \tan(\varphi_y)^2} \end{pmatrix} \quad (2.31)$$

Daraus folgt die Rotationsmatrix  $R_{N\ xy}^W$  der Neigungssensoren (N) um die X- und Y-Achse des Weltkoordinatensystems (W):

$$R_{N\ xy}^W = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{21} & e_{31} \\ e_{12} & e_{22} & e_{32} \\ e_{13} & e_{23} & e_{33} \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

Sie betrachtet aber lediglich zwei Rotationen (Roll, Pitch). Die Rotation um die Z-Achse  $R_{N\ z}^W$  muss mathematisch einbezogen und im weiteren Verlauf geschätzt werden. Es ergibt sich folgende Gleichung für die Orientierung  $R_N^W$  der Neigungssensoren im Weltkoordinatensystem:

$$R_N^W = R_{N\ z}^W R_{N\ xy}^W \quad (2.33)$$

Die Orientierung  $R_C^W$  des Kamerakoordinatensystems zum Weltkoordinatensystem wird durch Gleichung (2.34) beschrieben. Die genaue Lage des Kalibrationsobjektes (O) im

Weltkoordinatensystem (W) wird mit  $R_O^W$  bezeichnet. Sie ist nicht bekannt und wird im weiteren Verlauf der Schätzung zugeführt. Die Orientierung  $R_C^O$  von Kamera (C) zum Kalibrationsobjekt (O) wird mit dem photogrammetrischen Algorithmus aus Kapitel (2.2) berechnet.

$$R_C^W = R_C^O R_O^W \quad (2.34)$$

Unter der Voraussetzung, dass die Rotation  $R_N^C$  von Kamerasystem zu den Neigungssensoren bekannt ist bzw. geschätzt wird, gilt  $R_N^W = R_N^C R_C^W$ . Daraus folgt aus Gleichung (2.33) und (2.34):

$$R_{N_z}^W R_{N_{xy}}^W = R_N^C R_C^O R_O^W \quad (2.35)$$

Das Auflösen dieser Gleichung nach  $R_C^O$  ergibt:

$$R_C^O = R_{N_z}^W R_{N_{xy}}^W (R_N^C)^{-1} (R_O^W)^{-1} \quad (2.36)$$

Die Matrix  $R_C^O$  ist genau die Rotationsmatrix, welche während der photogrammetrischen Methode zur Anwendung kommt und zu jedem Bild geschätzt wird. Berücksichtigt man nun den Aspekt, dass nicht alle Größen zeitlich variabel (d.h. abhängig von der Position Kamera-Objekt) sind, so erweitert sich Gleichung (2.36) zu:

$$R_C^O(t) = R_{N_z}^W(t) R_{N_{xy}}^W(t) (R_N^C)^{-1} (R_O^W)^{-1} \quad (2.37)$$

Zu sehen ist, dass von den beiden Rotationen, die sich zeitlich ändern, nur  $R_{N_z}^W(t)$  geschätzt werden muss, da  $R_{N_{xy}}^W(t)$  als gemessene Größe eingeht. Die Schätzung von  $R_{N_z}^W(t)$  beschränkt sich auf einen Winkel (um die Z-Achse). Die Matrizen für  $(R_N^C)^{-1}$  und  $(R_O^W)^{-1}$  bleiben konstant und müssen mit je 3 Winkeln geschätzt werden. Das bedeutet, dass für  $n$  Bilder  $6 + n$  Winkel geschätzt werden müssen. Der Algorithmus aus Kapitel (2.2) schätzt für jedes Bild 3 Winkel für die Kamera-Objekt Orientierung. Das bedeutet, bei  $n$  Bildern müssen  $3n$  Winkel geschätzt werden. Bei  $n \geq 4$  Bilder einer Szene kann durch diese gemessenen Neigungswinkel eine Parameterreduzierung erreicht werden.

# 3 Alternative Kalibrationsverfahren

## 3.1 Kalibration mit einem Goniometer

### 3.1.1 Grundidee

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebene, photogrammetrische Methode zur Kalibration einer Kamera liefert die Ergebnisse der Parameter durch eine Minimierung einer mathematischen Differenz nach Schätzung der Initialzustände. Das Verfahren mittels Goniometer<sup>1</sup> und Manipulator<sup>2</sup> bietet im Gegensatz dazu die Möglichkeit jedem einzelnen Pixel einer Matrix- oder auch Zeilenkamera zwei Winkel eines Raumstrahls zuzuordnen und somit die Kamera, zumindest theoretisch, vollständig, geometrisch zu kalibrieren. Jedoch sei vorweggenommen, dass aufgrund der Auflösung moderner Kameras von weit mehr als einer Millionen Pixel eine vollständige Kalibration nur unter hohem Zeitaufwand möglich wäre.

### 3.1.2 Mathematische Grundlagen

Durch einen Kollimator<sup>3</sup> wird ein Lichtstrahl erzeugt, der parallel zur Z-Achse eines Laborkoordinatensystems (LKS) verläuft. Es existiert eine raumfeste Drehachse, die parallel zur Y-Achse des LKS. Winkel um diese Achse werden im weiteren Verlauf mit  $\alpha$  bezeichnet. Eine zweite Drehachse, liegt im Fall  $\alpha = 0$  parallel zur X-Achse. Diese Drehungen werden durch den Winkel  $\beta$  beschrieben. Die beschriebenen Beziehungen sind in

---

<sup>1</sup>Goniometer - Winkelmessgerät

<sup>2</sup>Manipulator - Gerät zum Rotieren und Bewegen von Objekten, oftmals als „nodal bench“ bezeichnet

<sup>3</sup>Kollimator - Vorrichtung in optischen Geräten, mit der ein unendlich entferntes Ziel in endlichem Abstand dargestellt wird

Bild (3.1) dargestellt.

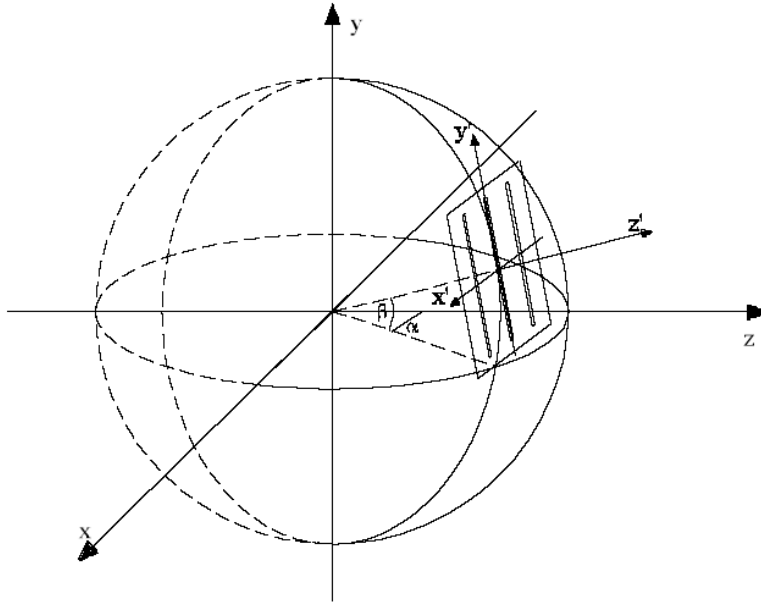


Abbildung 3.1: Raumstrahlen in Kugelkoordinaten [18]

Drehmatrizen um die jeweiligen Achsen haben die Form:

$$\mathcal{R}(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{R}(\beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{R}(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Die geometrische Abbildungsgleichung einer idealen Lochkamera im Laborkoordinatensystem ist:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \lambda \mathcal{R} \vec{r}_B \quad (3.1)$$

mit Objektpunkt  $\vec{r} = [x, y, z]'$ , dem Kameraort  $\vec{r}_0 = [x_0, y_0, z_0]'$ , dem Maßstabsfaktor  $\lambda$ , der allgemeinen Drehmatrix  $\mathcal{R}$  und dem Bildvektor  $\vec{r}_B = [x_B, y_B, -f]'$ , wobei  $f$  für die Brennweite der zu kalibrierenden Kamera steht.

Die Objektkoordinaten werden, wie Bild (3.1) zeigt in Kugelkoordinaten angegeben. Mit dem Abstand Bildebene zu Objektebene ( $\mathcal{T}$ ) folgt für den Objektpunkt  $\vec{r} = [-\mathcal{T} \sin \alpha, \mathcal{T} \cos \alpha \sin \beta, \mathcal{T} \cos \alpha \cos \beta]'$ . Nach Subtraktion von  $\vec{r}_0$  und anschließender Normierung ergibt sich aus Gleichung (3.1):

$$\left( \begin{bmatrix} -\mathcal{T} \sin \alpha \\ \mathcal{T} \cos \alpha \sin \beta \\ \mathcal{T} \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \right) \frac{1}{N} = \frac{\lambda \mathcal{R} \vec{r}_B}{|\lambda \vec{r}_B|} \quad (3.2)$$

mit dem Normierungsfaktor

$$N = \mathcal{T} \sqrt{\left(-\sin \alpha - \frac{x_0}{\mathcal{T}}\right)^2 + \left(\cos \alpha \sin \beta - \frac{y_0}{\mathcal{T}}\right)^2 + \left(\cos \alpha \cos \beta - \frac{z_0}{\mathcal{T}}\right)^2}$$

Bei der Grenzwertbetrachtung  $\lim \mathcal{T} \rightarrow \infty$  bleibt die rechte Seite von Gleichung (3.2) nach der Normierung unverändert und es folgt:

$$\begin{bmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \sin \beta \\ \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} = \frac{\mathcal{R} \vec{r}_B}{|\vec{r}_B|} \quad (3.3)$$

Diese Gleichung besagt, dass Richtungsstrahlen, die aus dem Unendlichen kommen, in der Kamera unabhängig vom Ort der Kamera abgebildet werden. Diese Aussage gilt ebenso für den Fall, dass die Drehachsen nicht durch das Projektionszentrum der Kamera verlaufen. In diesem Fall lautet die Ausgangsgleichung:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \lambda \mathcal{R} \vec{r}_B + \mathcal{R} \vec{\Delta} \quad (3.4)$$

wobei  $\vec{\Delta}$  der Abstandsvektor des Projektionszentrums vom Schnittpunkt der Drehachsen ist. Wird der resultierende Vektor  $\vec{r}_0 + \mathcal{R} \vec{\Delta}$  auf beiden Seiten von Gleichung (3.4) subtrahiert, gilt die Grenzwertbetrachtung wie bei Gleichung (3.2).

Sind  $\alpha$  und  $\beta$  gleich null, d.h. der Kollimatorstrahl, die X- und Y-Achse bilden ein

Rechtssystem, so gilt nach (3.3):

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{\mathcal{R}r_B}{|r_B|} \quad (3.5)$$

Wobei sich  $\mathcal{R} = \mathcal{R}(\alpha)\mathcal{R}(\beta)$  ergibt. Mit der einleitenden Definition der Achsen des Kugelkoordinatensystems spielt die Drehung  $\mathcal{R}(\gamma)$  für die geometrische Kalibration keine Rolle. Die allgemeine Drehmatrix hat somit folgende Form

$$\mathcal{R}(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \sin \beta & \sin \alpha \cos \beta \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \sin \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}$$

Nach einsetzen in Gleichung (3.5) und Umstellen durch Multiplikation mit  $\mathcal{R}^{-1}$  folgt:

$$\begin{bmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \sin \beta \\ \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} = \frac{r_B}{|r_B|}$$

Zu sehen ist hierbei, dass dies die Gestalt von Gleichung (3.3) ist. Mit anderen Worten; die Winkel des Goniometers sind die Kugelkoordinaten des Kollimatorstrahls im Kamerakoordinatensystem. Die Division der X-Komponente durch die Z-Komponente, sowie der Y-Komponente durch die Z-Komponente stellt den Zusammenhang der Bildkoordinaten zu den Manipulatorwinkeln her. Somit gilt:

$$x_B = f \frac{\tan \alpha}{\cos \beta} \quad (3.6)$$

$$y_B = -f \tan \beta \quad (3.7)$$

Die Voraussetzungen, dass die Gleichungen (3.6) und (3.7) gelten sind:

1. Kollimatorstrahlrichtung und die beiden Drehachsen in der Position  $\alpha = 0$  und  $\beta = 0$  bilden ein Rechtssystem
2. Die Optische Achse der Kamera  $[0, 0, -f]'$  ist parallel zum Kollimatorstrahl
3. Die Bildebene befindet sich im Abstand der Brennweite  $f$  vom Projektionszentrum und ihre Normalenrichtung ist parallel zur optischen Achse

4. Die Abbildung ist verzeichnungsfrei

Während die Punkte 1 und 2 Anforderungen an den experimentellen Aufbau stellen, sind nun gerade die Bestimmung der realen Abweichungen von 3 und 4 Aufgabe der geometrischen Kalibration. Die geometrische Kalibration einer realen digitalen Kamera mittels Manipulator nach Gleichung (3.6) und (3.7) muss deshalb wie folgt interpretiert werden. Unter Beachtung von Punkt 1 und 2 gibt es eine eindeutige Zuordnung zwischen den Winkeln  $(\alpha, \beta)$  und dem belichteten Ort  $r_B^{\vec{}}$  der Kamera. Zusätzlich wird die Bildkoordinate  $(i, j)$  des abgebildeten Kollimatorstrahls ermittelt. Damit ist der eindeutige Zusammenhang zwischen gemessener Bildkoordinate und seinem Ort  $r_B^{\vec{}}$  im Kamerakoordinatensystem hergestellt. Unabhängig davon, ob die Bedingung 3 und 4 erfüllt ist. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, so existiert über die Gleichung (3.6) und (3.7) ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der gemessenen Bildkoordinate  $(i, j)$  und dem Ort  $r_B^{\vec{}}$  in einer virtuellen, idealen, den Bedingungen 3 und 4 entsprechenden Abbildungsebene:

$$\begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i\delta \\ j\delta \\ -f \end{bmatrix} + \vec{\Delta}k \quad (3.8)$$

Der Pixelabstand im Bildsensor bzw. der Kameramatrix wird hierbei mit  $\delta$  bezeichnet. Der Vektor  $\vec{\Delta}k = [\Delta x(i, j), \Delta y(i, j), 0]'$  ist der Lagekorrekturvektor für jedes Pixel  $(i, j)$  in der Sensor- bzw. Bildebene, welcher durch die Gleichungen (3.6) und (3.7) und (3.8) bestimmt werden kann.

Ist für jedes Pixel ein solcher Vektor bestimmt, so ist die Kamera geometrisch kalibriert.

### 3.1.3 Praktische Umsetzung

Im Laborgebäude des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Berlin-Adlershof gibt es für die praktische Umsetzung einer geometrischen Kalibration folgenden Versuchsaufbau:

- ein Labor mit Reinraumklasse 10000

- einen Zwei-Achsen-Manipulator mit einer Genauigkeit der Winkel von  $\pm 2.5 \text{ arcsec}$  und einer Auflösung von  $0.5 \text{ arcsec}$
- einen Kollimator mit  $f = 1200 \text{ mm}$  und einem Durchmesser der Strahlenoptik  $D = 150 \text{ mm}$

Bild (3.2) zeigt diesen Laborraum mit dem Manipulator und dem integrierten Goniometer, ein Stereokamera paar, welches dort installiert wurde, sowie den Kollimator (in der rechten Bildhälfte).

Im ersten Schritt muss sichergestellt werden, dass die Bedingungen 1 und 2 aus den



Abbildung 3.2: Zwei-Achsen-Manipulator und Kollimator [Photo v. Verfasser]

mathematischen Grundlagen erfüllt sind. Bedingung 1 („Kollimatorstrahlrichtung und

die beiden Drehachsen in der Position  $\alpha = 0$  und  $\beta = 0$  bilden ein Rechtssystem“) wurde bereits beim Einrichten des Laborraums berücksichtigt. Zur Erfüllung von Bedingung 2 („Die Optische Achse der Kamera  $[0, 0, -f]'$  ist parallel zum Kollimatorstrahl.“) befindet sich im Anhang (C) eine algorithmische Beschreibung. Die Nullposition gilt dann als erreicht, wenn in der Kamera der gefundene Bildhauptpunkt belichtet ist.

Wie oben beschrieben ist eine geometrische Kalibration dann als vollständig anzusehen, wenn für jedes Pixel ein zugehöriger Raumstrahl angegeben ist. Dies ist aber bei gebräuchlichen Matrixkameras mit weit mehr als 1 Megapixel zeitlich kaum möglich. Bei Zeilenkameras, wie die High Resolution Stereo Camera<sup>4</sup>, mit einer Auflösung von etwa 5000 bis 12000 Pixel pro Zeile, wird im Gegensatz zu Matrixkameras für jedes Pixel ein Lagekorrekturvektor bestimmt.

Eine erhebliche Reduzierung des Zeitaufwands bei der Aufnahme von Punkten mittels Manipulator wird dadurch erreicht, dass lediglich ein geringer Teil der Punkte mit der zu kalibrierenden Kamera aufgenommen wird. Durch den Kollimator wird mit einer entsprechenden Blende ein Punktstrahl erzeugt und mit dem Bildsensor im Fernfeld erfasst. Bei Experimenten kann es vorkommen, dass ein Strahl, welcher exakt ein Pixel des Sensors beleuchtet durch seine sehr geringe Intensität nicht mehr von den Intensitäten des Dunkelstromrauschens<sup>5</sup> zu unterscheiden ist. Durch Erhöhen der Intensität wird dieses Problem gelöst, bedarf aber einer nachträglichen Berechnung des tatsächlichen Pixels, da in diesem Fall auch benachbarte Punkte belichtet werden. Bild (3.3) zeigt einen solchen Fall, bei dem durch Mittelpunkts- oder Intensitätsbestimmung die korrekten Koordinaten extrahiert werden können.

Nachdem die ausgewählten Pixel mit den dazugehörigen Winkeln „angefahren“ wurden

---

<sup>4</sup>High Resolution Stereo Camera - Die HRSC ist eine digitale, multispektrale Stereo-Luftbildkamera für photogrammetrische und fernerkundliche Anwendungen und wurde am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. vom Institut für Planetenforschung Berlin-Adlershof konzipiert und entwickelt. [17]

<sup>5</sup>Dunkelstromrauschen - Im CCD-Chip werden Ladungsträger durch Lichteinwirkung freigesetzt. Unabhängig vom Auftreffen des Lichts gibt es eine Ladung im Charge-coupled Device (CCD), die stets vorhanden ist, den Dunkelstrom. Diese Ladung wird zum Nutzsignal addiert und verursacht Rauschen. [12]

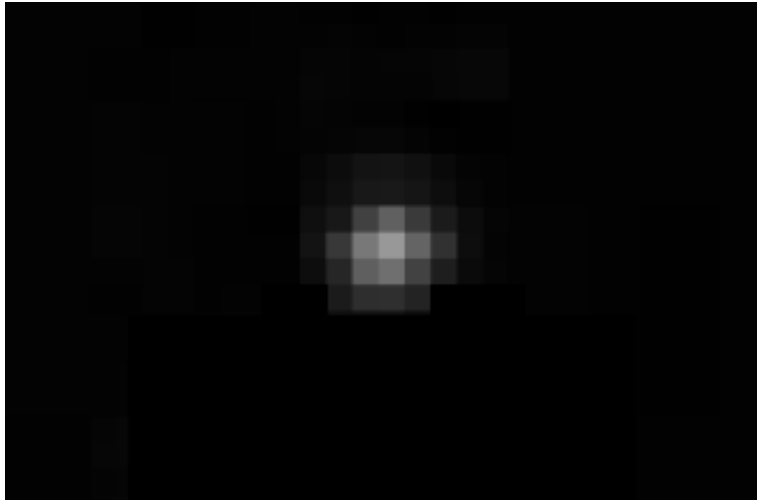


Abbildung 3.3: Aufnahme des Kollimatorstrahls mit höherer Intensität [2]

und für jede Szene ein Einzelbild erstellt ist, werden alle Punkte in einem Gesamtbild zusammengefasst, wobei nun für jedes belichtete Pixel die Koordinaten und der Lagekorrekturvektor bekannt sind. Den restlichen Pixeln wird durch Interpolation der erforderliche Lagekorrekturvektor aus Gleichung (3.8) zugeordnet. Bild (3.4) zeigt schematisch ein solches Gesamtbild (in diesem Fall idealisiert, d.h. mit verzeichnungsfreier Optik).

Somit gilt im praktischen Fall eine Kamera dann als geometrisch kalibriert, sobald eine über dem ganzen Bildsensor (zumeist äquidistant) verteilte Punktmenge mit den Raumwinkeln  $\alpha$  und  $\beta$  (vgl. Glg. 3.8), den zugehörigen Bildkoordinaten und dem daraus resultierenden Lagekorrekturvektor  $\vec{\Delta}k$  erfasst ist und den restlichen Punkten mittels Interpolation ein Wert für die Winkel und Lagekorrektur zugewiesen ist.

## 3.2 Kalibration mit diffraktiv optischen Elementen

### 3.2.1 Grundidee

Genau wie die beiden vorangegangenen Verfahren zur Kalibration von optischen Sensorsystemen nutzt auch das Verfahren mit diffraktiv, optischen Elementen (DOE) Testfelder

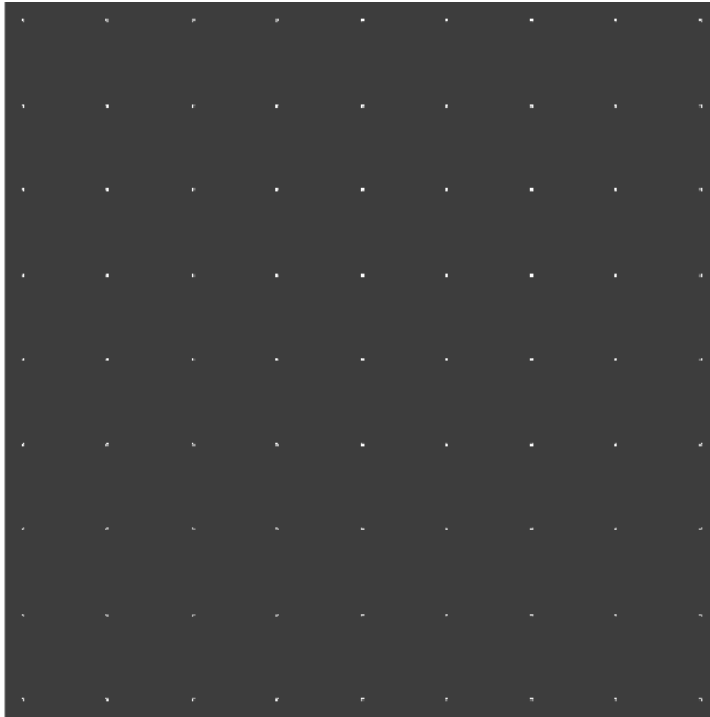


Abbildung 3.4: Idealisierte, verzeichnungsfreie Aufnahmesituation der Goniometerkalibration mit reduzierter Punktmenge [2]

zur geometrischen Kalibration. In [16] konnte nachgewiesen werden, dass Beugungsbilder, speziell die der Fraunhoferschen Beugung (vgl. [9]), solchen Testfeldern äquivalent sind. Im Folgenden soll gezeigt werden, welche neuen Möglichkeiten sich mit dem Einsatz steuerbarer diffraktiver optischer Elemente, auch Spatial Light Modulators (SLM) genannt, in diesem Zusammenhang ergeben [3]. Die Hauptkomponenten eines solchen dynamischen Lichtmodulators sind ein Flüssigkristalldisplay, eine Steuerelektronik, eine spezielle Grafikkarte und eine Steuersoftware. Der Versuchsaufbau ist so gestaltet, dass die Parameter der Inneren Orientierung, wie Kamerakonstante, Hauptpunkt und Verzeichnung, allein bestimmt werden können. In Abbildung (3.5) wird das Prinzip der Generierung von Beugungsmustern dargestellt.

### 3.2.2 Versuchsaufbau

Der experimentelle Aufbau ist schematisch in Bild (3.6) dargestellt. Der Lichtstrahl eines He-Ne-Lasers (Wellenlänge 633nm) wird entsprechend der Apparatur der zu kalibrierenden Kamera aufgeweitet und mit einer Kollimatoroptik zu einem parallelen Strahlenbündel geformt. Die vom Kollimator erzeugte ebene Welle trifft auf einen Strahlteiler und wird aufgespaltet. 50 Prozent des Strahlungsanteils der auftreffenden Lichtwelle werden reflektiert und 50 Prozent transmittiert. Der vom Strahlteiler reflektierte Lichtanteil wird am SLM entsprechend der gewünschten Intensitätsverteilung der Welle gebeugt. Durch die Lichtmodulation entstehen Lichtbündel mit definierten und hochgenau bekannten Beugungswinkeln, die wiederum auf den Strahlteiler gelenkt werden. Die gebeugte Welle trifft nach ihrem Durchgang durch den Strahlteiler auf die Eingangsoptik des zu kalibrierenden Sensorsystems. Auf der Fokalebene des Sensors entsteht dann das gewünschte Beugungsbild, das entsprechend gespeichert wird.

An dieser Stelle wird deutlich, dass das Verfahren mit diffraktiv, optischen Elementen dem Verfahren mit einem Manipulator (incl. Goniometer) ähnelt. Auch hier werden Raumstrahlen erzeugt, deren Winkel sehr genau bekannt sind. Ein großer Vorteil dieser Methode ist jedoch, dass alle Strahlen durch ein SLM auf einmal erzeugt werden können und nicht erst aus Einzelbildern zusammengeführt werden müssen.

### 3.2.3 Geometrische Kalibration

Im ersten Schritt wird die optische Achse zum Laserstrahl ausgerichtet [vgl. Anhang (C)]. Im zweiten Schritt werden die Bildkoordinaten der Beugungspunkte automatisch ermittelt. Dazu wird ein Gauß-Fit-Algorithmus<sup>6</sup> als stabiles Verfahren zur Anwendung gebracht. Es bestimmt die Schwerpunktkoordinaten der einzelnen Beugungsfiguren auf Subpixelgenauigkeit. In Schritt drei wird jeder einzelne Beugungspunkt innerhalb einer vorgegebenen Umgebung, mit dem Abstand  $R_1$  vom Hauptpunkt, dem entsprechenden vom SLM gebeugten Strahl und seiner idealen Abbildung in der Sensorebene zugeordnet

---

<sup>6</sup>Gauß-Fit-Algorithmus - Methode zur Schwerpunktfindung in Messreihen [20]

(vgl. Bild 3.7). Dies geschieht indem der geringste Abstand zu den bekannten idealen Orten der Beugungspunkte errechnet wird.

Im vierten Schritt erfolgt nach [21] eine Korrektur der radialen Verzeichnungen aller Beugungspunkte, auf der Grundlage der im dritten Schritt ermittelten Abweichungen der Ortskoordinaten der realen Punkte zu den Idealen. Mit der Wahl einer neuen Umgebung  $R_2$  mit  $R_2 > R_1$  geht man zu Schritt drei zurück und verfährt so lange, bis jeder Beugungspunkt identifiziert ist. Ein Polynomialfit<sup>7</sup> liefert die Transformation vom Originalbild in das kalibrierte Bild. Abbildung (3.8) veranschaulicht den Ablauf der Kalibration.

---

<sup>7</sup>Polynomialfit - Fehlerkorrekturmethode basierend auf polynomialer Approximation [19]

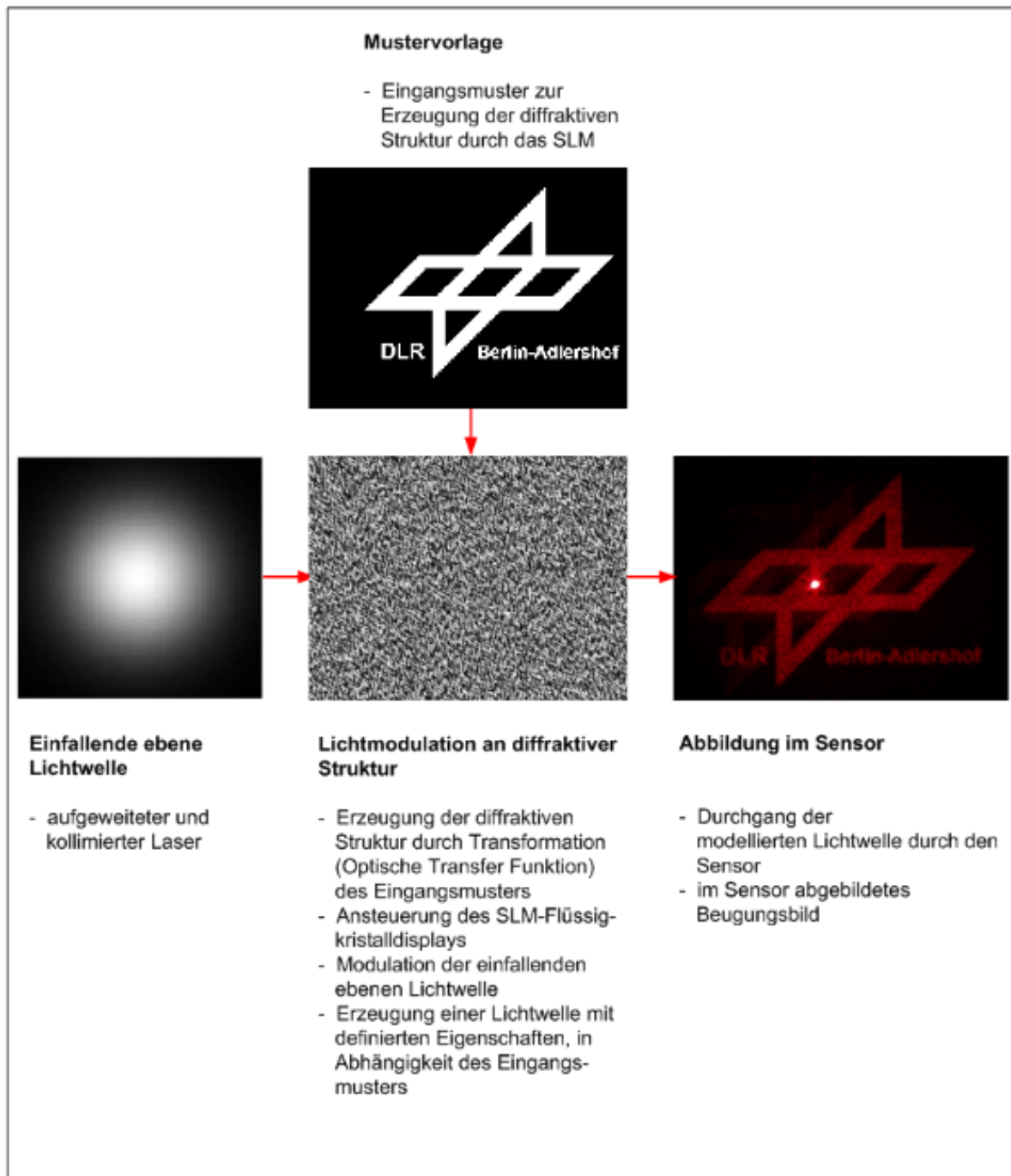


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der Erzeugung von Beugungsmustern [3]

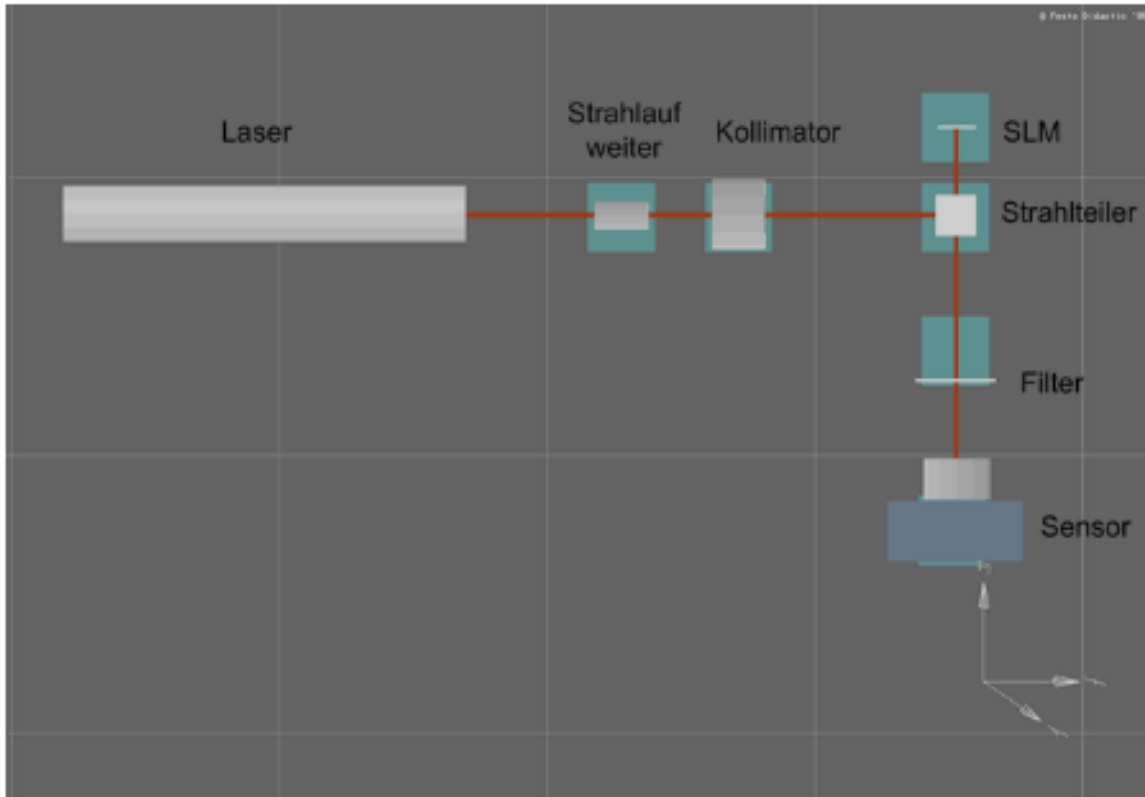


Abbildung 3.6: Schematischer Versuchsaufbau [3]

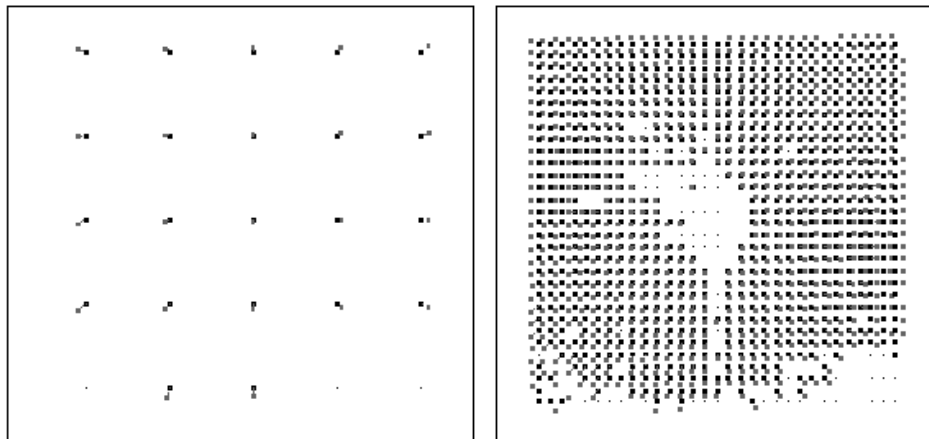


Abbildung 3.7: Zuordnung von extrahierten (Hell) und idealen (Dunkel) Koordinaten; links: Passpunktfeld  $5 \times 5$ , rechts: Passpunktfeld  $31 \times 31$  [3]

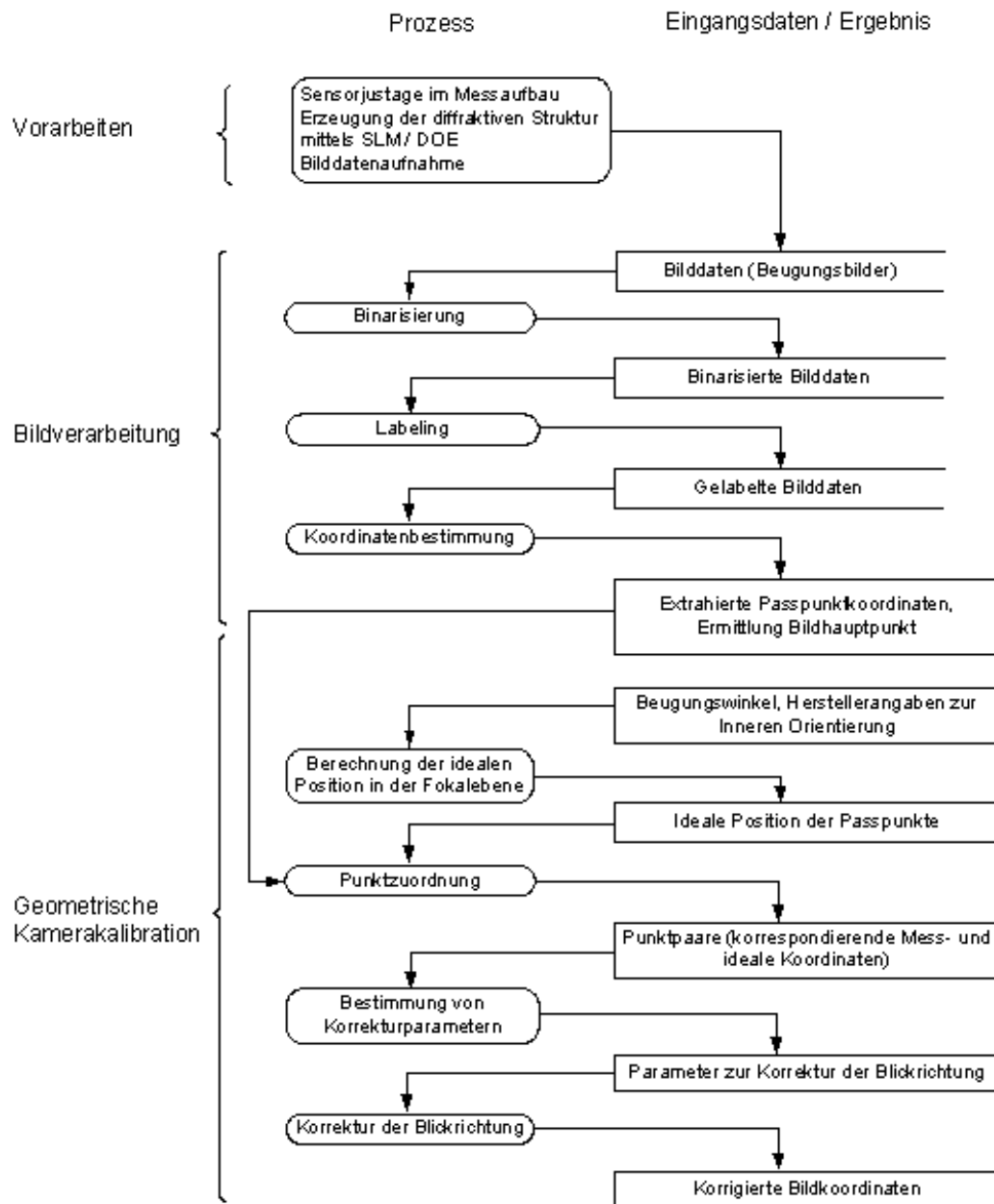


Abbildung 3.8: Ablaufschema der Kalibration mit DOE [3]

## 4 Auswertung

Der am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt zu kalibrierende Bildsensor ist eine Stereoanordnung zweier DALSA Kameras vom Typ 1M28-SA. Diese Kameras kommen im Zuge des DLR-internen Projektes IPS zum Einsatz, in dem ein Robotersystem innerhalb geschlossener Räume autonom navigieren soll. Diese Bildsensoren sind ausgewählt worden, da sie durch ihre Fisheyeobjektive<sup>1</sup> dazu geeignet sind, auch mit kurzer Distanz zu Objekten bzw. Wänden genügend Umgebungsinformationen aufnehmen zu können. Die wichtigsten Spezifikationen sind:

- Brennweite 4.8 mm
- Auflösung  $1024 \times 1024$  Pixel
- Pixelgröße  $10.6\mu\text{m} \times 10.6\mu\text{m}$
- Öffnungswinkel  $97^\circ$

Weitere Informationen können dem Datenblatt [5] entnommen werden.

### 4.1 Bewertung des implementierten, photogrammetrischen Algorithmus

Der im Rahmen dieser Arbeit implementierte Algorithmus aus Kapitel (2) wurde mit simulierten Bilddatensätzen getestet. Dieser im DLR entwickelte Simulator bietet die

---

<sup>1</sup>Fisheyeobjektiv - Ein Fisheyeobjektiv hat eine sehr kurze Brennweite im Vergleich zur Größe des Bildformates, und im Gegensatz zu normalen Objektiven ist seine Verzeichnung nicht korrigiert. Es verzeichnet stark tonnenförmig. Es besitzt einen sehr großen Bildwinkel (meist  $180^\circ$  in der Bilddiagonale) [7]

Möglichkeit einen erzeugten Raum mit Texturen zu belegen. Ein fiktiver Bildsensor (Mono-, Stereo-, Trifokal, usw.) kann durch Angabe von Position und Blickrichtung generiert und positioniert werden. Diese Szenen werden dann direkt in OpenGL umgesetzt und können als Bitmap entnommen werden. Dadurch ist es möglich eine komplette Kalibrationsszene [siehe Abbildung (4.1)] zu simulieren und implementierte Algorithmen darauf anzuwenden.

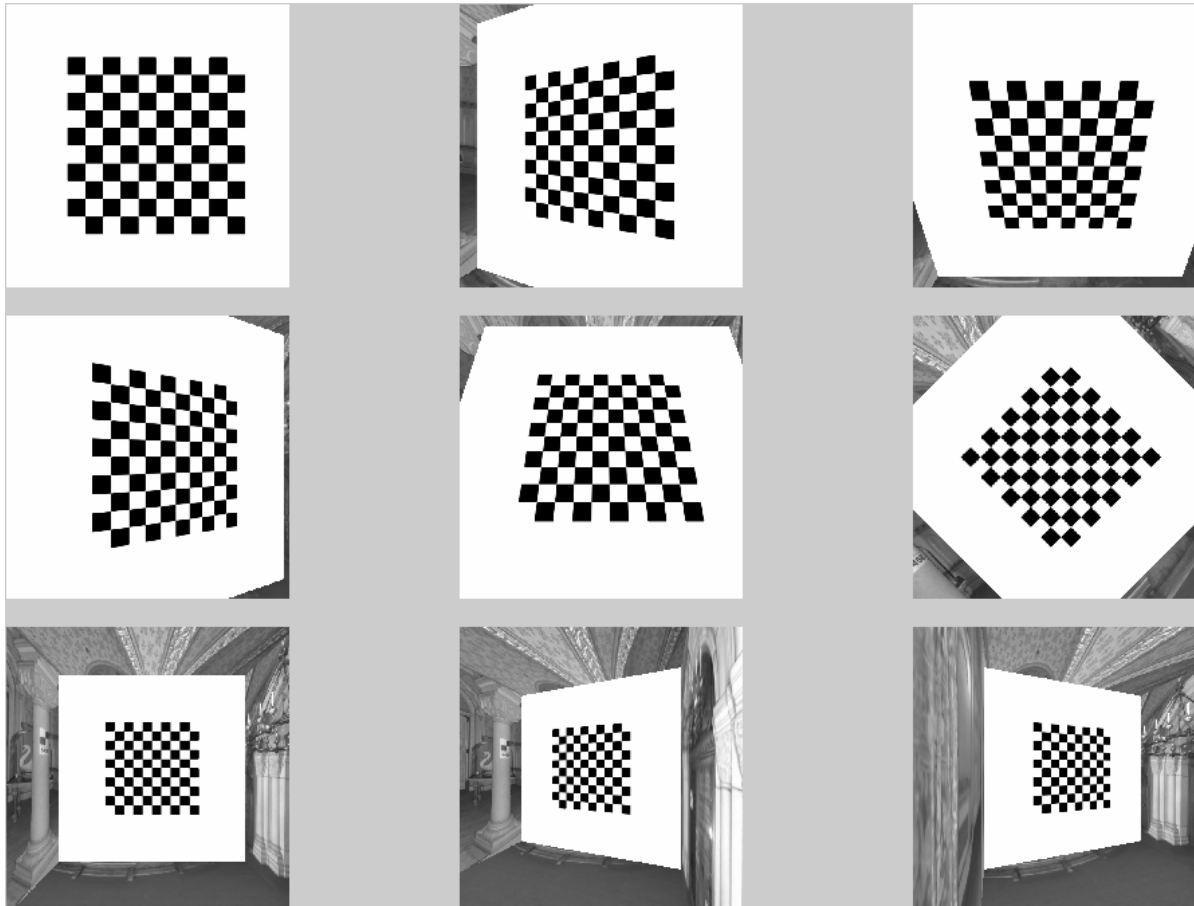


Abbildung 4.1: Kalibrationsszene, erzeugt mit dem Simulator [Matlab]

### 4.1.1 Genauigkeit der Punktdetektion

Um grundlegende Aussagen über die Genauigkeit des Algorithmus treffen zu können, muss zunächst die Genauigkeit der Punktdetektion bestimmt werden. Dazu wurden

stichpunktartig Punkte extrahiert und die subpixelgenaue Position mit der im Bild ersichtlichen Kreuzungsposition verglichen [siehe Abbildung (4.2)]. Die „aus dem Bild ersichtliche Kreuzungsposition“ wird durch eine Bild-Auge-Zuordnung bei höchster Zoomstufe angegeben. Nach Auswertung der Stichprobe der simulierten Daten ergeben sich

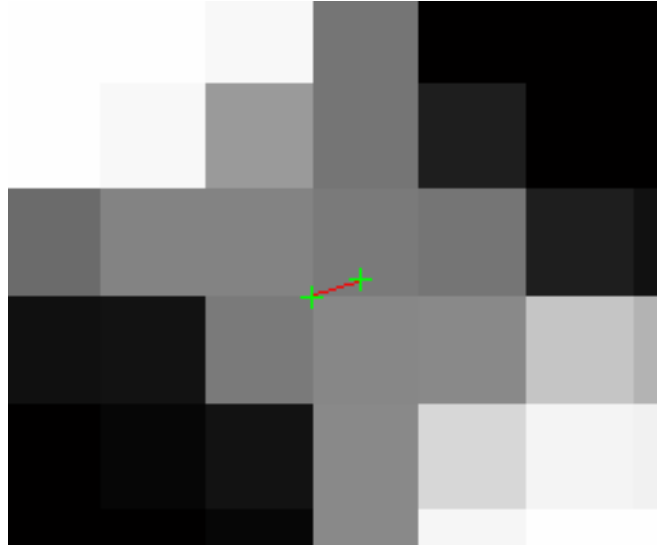


Abbildung 4.2: Bewertung der Punktdetektion durch Abstand der errechneten zur tatsächlichen Position [Matlab]

die in Tabelle (4.1) dargestellten, statistischen Größen. Der Nachweis über die Genauig-

Mittelwert	0.39	Pixel
Standardabweichung	0.12	Pixel

Tabelle 4.1: Genauigkeit der Punktdetektion der simulierten Bilder

keit der Punktzuordnung wurde anschließend in realen Bildern mit der gleichen Methode überprüft. Dabei haben sich die in Tabelle (4.2) gezeigten statistischen Größen ergeben.

Mittelwert	0.55	Pixel
Standardabweichung	0.15	Pixel

Tabelle 4.2: Genauigkeit der Punktdetektion der realen Bilder

### 4.1.2 Innere, äußere und relative Orientierung, Verzeichnungsparameter

Die Tabellen (4.3) und (4.4) geben Aufschluß über die Genauigkeit, die Parameter der inneren Orientierung mit dem entwickelten Algorithmus berechnen zu können. Um ei-

Parameter	Simulator	Programm
$\alpha$	452.83	453.63
$\beta$	452.83	453.60
$\gamma$	0	0.015
$u_0$	512.5	512.52
$v_0$	512.5	512.41

Tabelle 4.3: Parameter Kamera 1

Parameter	Simulator	Programm
$\alpha$	452.83	453.63
$\beta$	452.83	453.63
$\gamma$	0	0.008
$u_0$	512.50	512.48
$v_0$	512.50	512.40

Tabelle 4.4: Parameter Kamera 2

ne Aussage über die Genauigkeit der Berechnung der äußeren Orientierung machen zu können, werden im weiteren die Eulerwinkel (berechnet aus den Rotationsmatrizen von Kamera zu Objekt) für alle in Abbildung (4.1) dargestellten Szenen verglichen und den berechneten Eulerwinkeln gegenübergestellt. Dies geschieht für beide fiktiven Kameras des Simulators. Tabelle (4.5) und (4.6) zeigen die Ergebnisse. Die Bilder des Simulators sind frei von radialsymmetrischer Verzeichnung. Aus diesem Grund ist es möglich zu überprüfen, ob auch der entwickelte Algorithmus die Verzeichnungsparameter zu null berechnet. In Tabelle (4.7) werden die Ergebnisse präsentiert.

Das Stereokamerapaar wurde bei den Versuchen in einem fiktiven Abstand von 200mm in Richtung der X-Achse generiert. In Richtung der Y- bzw. Z-Achse wurde kein Versatz generiert und auch die relative Rotation um alle Achsen ist mit 0 initialisiert worden.

Szene	Winkel	Simulator	Programm
1	Roll	0	-0.0158
	Pitch	0	-0.0064
	Yaw	180	179.9999
2	Roll	0	-0.0057
	Pitch	20	20.0123
	Yaw	180	179.9985
3	Roll	20	20.0050
	Pitch	0	-0.0014
	Yaw	180	179.9995
4	Roll	0	0.0003
	Pitch	-20	-20.0155
	Yaw	180	179.9956
5	Roll	-20	-20.0052
	Pitch	0	-0.0004
	Yaw	180	179.9973
6	Roll	0	-0.0016
	Pitch	0	0.0334
	Yaw	135	134.9996
7	Roll	0	-0.0115
	Pitch	0	-0.0186
	Yaw	180	179.9993
8	Roll	0	0.0021
	Pitch	20	19.9375
	Yaw	180	179.9963
9	Roll	0	0.0134
	Pitch	-20	-19.9651
	Yaw	180	179.9917

Tabelle 4.5: Rotationswinkel Kamera 1

Tabelle (4.8) stellt den angegebenen Stereoparametern die berechneten Ergebnisse gegenüber. Aus den Gegenüberstellungen in Tabelle (4.3) und (4.4) lässt sich ableiten, dass die Brennweite (bei bekannter Pixelgröße von  $10.6\mu\text{m}$ ) auf durchschnittlich  $8\mu\text{m}$  genau bestimmt wird. Der auf den Wert 0 gesetzte Scherungsfaktor  $\gamma$  wird mit einer Abweichung von 0.0115 berechnet. Der Bildhauptpunkt kann bis auf eine Abweichung von 0.0575 Pixel bestimmt werden.

Bei der Auswertung der berechneten äußeren Orientierung (speziell die Rotationen) aus

Szene	Winkel	Simulator	Programm
1	Roll	0	-0.0127
	Pitch	0	-0.0103
	Yaw	180	179.9988
2	Roll	0	-0.0031
	Pitch	20	20.0084
	Yaw	180	179.9999
3	Roll	20	20.0080
	Pitch	0	-0.0046
	Yaw	180	179.9969
4	Roll	0	0.0038
	Pitch	-20	-20.0194
	Yaw	180	179.9943
5	Roll	-20	-20.0022
	Pitch	0	-0.0045
	Yaw	180	179.9974
6	Roll	0	0.0014
	Pitch	0	0.0295
	Yaw	135	135.0009
7	Roll	0	-0.0085
	Pitch	0	-0.0225
	Yaw	180	179.9980
8	Roll	0	0.0046
	Pitch	20	19.9337
	Yaw	180	179.9949
9	Roll	0	0.0169
	Pitch	-20	-19.9689
	Yaw	180	179.9903

Tabelle 4.6: Rotationswinkel Kamera 2

Parameter	Simulator	Kamera 1	Kamera 2
$k_1$	0	-0.0018	0.0075
$k_2$	0	0.0024	-0.0421

Tabelle 4.7: Verzeichnungsparameter beider Kameras

Tabelle (4.5) und (4.6) ist festzustellen, dass die aus den Rotationsmatrizen berechneten Winkel auf durchschnittlich  $0.090^\circ$  genau bestimmt werden, bei einer Standardabweichung von  $0.048^\circ$ .

Parameter	Simulator	Programm	Parameter	Simulator	Programm
Roll	0	-0.0030	$t_x$	200	200.15
Pitch	0	0.0039	$t_y$	0	-0.0449
Yaw	0	-0.0013	$t_z$	0	0.7693

Tabelle 4.8: Werte der relativen Orientierung

Die Verzeichnungsparameter  $k_1$  und  $k_2$  werden so bestimmt, dass sie gegen den zu erwartenden Wert 0 streben. Da sich jedoch die Werte für  $k_1$  und  $k_2$  auch bei starken Verzeichnungen häufig lediglich um Werte zwischen 0.1 und 0.3 bewegen, ist dieses Ergebnis nur bedingt zufriedenstellend.

Die Rotationswinkel der relativen Orientierung werden bis auf eine durchschnittliche Abweichung von  $0.2733^\circ$  genau bestimmt. Die Translation weicht um durchschnittlich 0.32 mm vom Idealwert ab.

Nach Extraktion von 81 Kreuzungspunkten mit beiden Kameras, also 162 Beobachtungen, und anschließender, finalen Maximum-Likelihood-Schätzung, wurden alle Punkte durch den Algorithmus bis auf einen Gesamtfehler von 53.42 Pixel approximiert. Das bedeutet, dass jeder extrahierte Kreuzungspunkt durch die Modellparameter bis auf einen durchschnittlichen Fehler von 0.33 Pixel bestimmt wird.

Anhand des Vergleichs mit den Simulatordaten lässt sich abschließend feststellen, dass der entwickelte Algorithmus in den angegebenen Grenzen hinreichend gute Ergebnisse liefert.

## 4.2 Vergleich der Kalibrationsverfahren

Um die vorgestellten Kalibrationsverfahren vergleichen zu können, müssen folgende Überlegungen berücksichtigt werden. Während die photogrammetrische Methode eine Kameramatrix bestimmt, aus der Bildhauptpunkt, Brennweite und Scherung der Bildachsen hervorgeht, liefert sowohl das Verfahren der diffraktiv, optischen Elemente als auch das Manipulator-Goniometer-Verfahren keine äquivalenten Werte. Hier wird jedem Pixel ein Raumstrahl und dessen Winkel zugeordnet. Eine Betrachtung der Brennweite findet ge-

nauso wenig statt, wie eine Betrachtung der Scherung der Bildachsen. Auf der anderen Seite ist es ebenso wenig möglich aus dem photogrammetrischen Verfahren heraus, die Winkel der Raumstrahlen jedes Pixels zu bestimmen. Somit ist der Bildhauptpunkt der einzige, gemeinsam bestimmte Parameter und wird im folgenden Abschnitt auf Übereinstimmung untersucht.

Um die Methoden zu vergleichen, wird mit den bestimmten Werten der verschiedenen Verfahren ein Bild der kalibrierten Kamera so prozessiert, dass es unter Berücksichtigung des Bildhauptpunktes, verzeichnungsfrei ist. Linien entlang des Schachbrettmusters des Kalibrationsobjektes müssen auch in der Abbildung des Bildsensors wieder eine Linie bilden. Mit diesem Wissen lässt sich die Basis des Vergleichs finden. An dieser Stelle sei erwähnt, dass zur Erweiterung des Vergleichs ein kommerzielles Produkt mit dem Namen „Australis<sup>2</sup>“ einbezogen wurde, um eine weitere, jedoch externe, Referenz zu erhalten. Australis bestimmt auf photogrammetrische Weise, d.h. aus einer Kalibrationsszene, genau wie der entwickelte Algorithmus aus Kapitel (2) die Kameraparameter. Im konkreten Fall liefert Australis die Brennweite, den Bildhauptpunkt und die radialsymmetrischen Verzeichnungsparameter. Die Verzeichnungsparameter werden jedoch durch ein Polynom 7-ter Ordnung modelliert und es existiert keine Option dies zu ändern, um es direkt mit dem in dieser Arbeit entwickelten Algorithmus zu vergleichen. Aus diesem Grund wurde ebenfalls ein „entzerrtes“ Bild errechnet.

### 4.2.1 Bildhauptpunkt

Der Bildhauptpunkt, welcher bei der photogrammetrischen Methode und Australis aus der Schätzung hervorgeht, wird bei den beiden alternativen Verfahren gemessen. Mit Hilfe der Interferenzmuster und anschließender Auswertung sollte er subpixelgenau gefunden werden. Im Verlauf der verschiedenen Kalibrationsaufnahmen ist eine der beiden Kameras durch Defekt nicht mehr ansteuerbar gewesen, sodass die Arbeit und der Vergleich mit nur einer Kamera als Referenz fortgeführt wurde. Tabelle (4.9) ordnet die

---

<sup>2</sup>Australis - kommerzielles Produkt zur Kamerakalibration und „on-the-job“ Selbstkalibration [13]

gefunden Hauptpunkte der beiden Kameras dem jeweiligen Verfahren zu.

Eine Aussage über die Genauigkeit lässt sich hierbei nicht exakt treffen, da im Daten-

	Newtonsche Ringe	Photogrammetrisch	Australis
$u_0$	511.99	513.79	511.48
$v_0$	493.00	496.15	493.14

Tabelle 4.9: Werte der relativen Orientierung

blatt der Kameras keine Angaben über den Bildhauptpunkt enthalten sind. Sobald die Fokalebene von der Sensorebene getrennt (Entfernen des Objektivs) und später wieder zusammengeführt wird, so verschiebt sich u.U. der Bildhauptpunkt. Somit ist es lediglich möglich, festzustellen, dass die physikalische Methode der Newtonschen Ringe ein sehr ähnliches Ergebnis wie das kommerzielle Produkt (Australis) liefert. Der Bildhauptpunkt des implementierten Algorithmus weicht dazu um 2 bis 3 Pixel ab. Dies kann als signifikante Abweichung gewertet werden, soll aber im abschließenden Vergleich aller Methoden in die Bewertung eingehen.

## 4.2.2 Ergebnisse

Wie einleitend in diesem Kapitel beschrieben, wurden, für alle vorgestellten Methoden und zusätzlich mit Australis, verzeichnungsfreie Bilder berechnet. Um die Linien (Kanten der Schachbrettmuster), welche in dem entzerrten Bild zwingend gerade sein müssen, zu extrahieren, wurde zwischen zwei Kreuzungspunkten eine Geradengleichung berechnet. Dazu diente der Punktextraktor des entwickelten Algorithmus als subpixelgenaue Näherung des Kreuzungspunktes. Anschließend sind, wie in Abschnitt (4.1.1), mittels Bild-Auge-Zuordnung die als exakt erkannten Kreuzungsstellen als Stützvektoren für die Geradengleichung aufgenommen worden. Danach wurden alle Punkte mit der gleichen Methode aufgenommen, die kollinear zu dieser Geraden sein müssen [siehe Abbildung(4.3)]. Zu jedem extrahiertem Kreuzungspunkt ist der euklidische Abstand zur Geraden bestimmt worden. Aufgrund der unsymmetrischen Lage des Bildhauptpunktes und zum konsistenten Nachweis über die Güte sind sowohl die Waagerechten als auch die

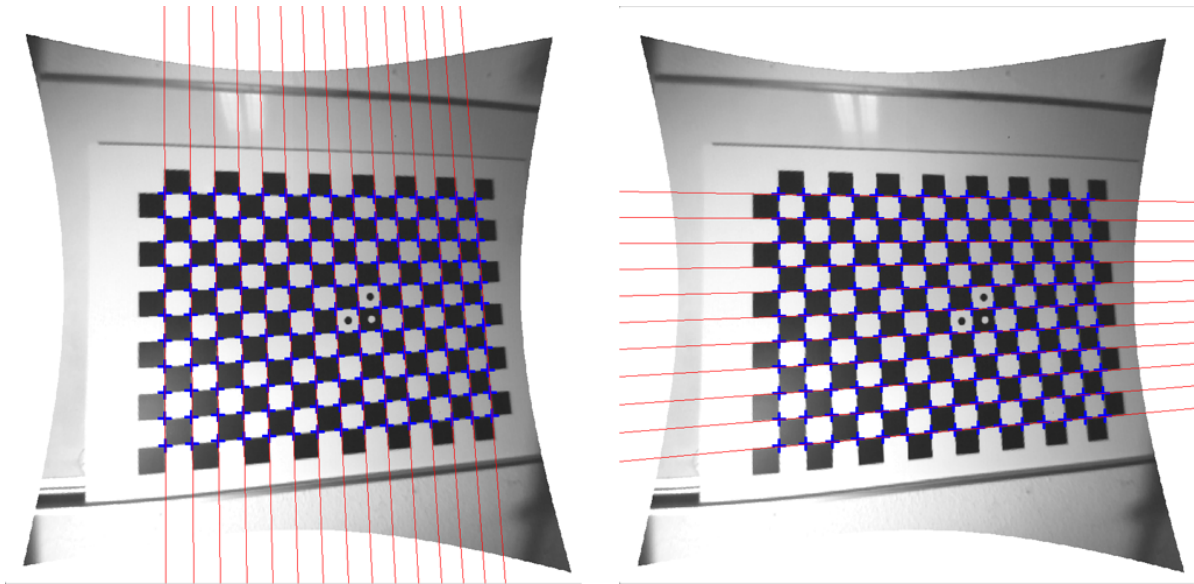


Abbildung 4.3: Bestimmung des euklidischen Abstands zu einer extrahierten Geraden

Senkrechten des Schachbrettmusters in die Auswertung einbezogen worden. Eine Mittelung über alle Abstände liefert das Maß für den Vergleich der vorgestellten Methoden. Tabelle (4.10) stellt dieses Maß und dessen Standardabweichung den eingesetzten Verfahren gegenüber.

Aus der Auswertung der euklidischen Abstände zu den jeweiligen Geraden können fol-

Art der Gerade	Verfahren	Mittlerer Abstand	Standardabweichung
Waagrecht	Entwickelter Algorithmus	0.2438	0.2130
	Manipulator-Goniometer	0.2402	0.1922
	Diffraktive Elemente	0.2982	0.2121
	Australis-Software	0.3156	0.2982
Senkrecht	Entwickelter Algorithmus	0.2565	0.2256
	Manipulator-Goniometer	0.2167	0.1986
	Diffraktive Elemente	0.1919	0.1577
	Australis-Software	0.3137	0.1920

Tabelle 4.10: Mittlerer euklidischer Abstand und Standardabweichung aller Kreuzungspunkte zur jeweils extrahierten Geraden

gende Feststellungen getroffen werden. Der mittlere Abstand ist bei allen Verfahren im

Subpixelbereich. Die Werte der Standardabweichung, die nahe dem Mittelwert liegen, bedeuten, dass die Streuung der euklidischen Distanzen sehr groß ist, wobei auch bei dieser Verteilung Subpixelgenauigkeit (mit hoher Wahrscheinlichkeit) eingestellt bleibt. Weiterhin ist zu sehen, dass alle vier untersuchten Verfahren sehr ähnliche Ergebnisse liefern. Mit anderen Worten; es konnte sich keine Methode als „die Beste“ oder „die Schlechteste“ herausstellen lassen.

Mit diesen Ergebnissen kann die Teilaufgabe dieser Arbeit, „Entwicklung eines Algorithmus zur Kalibration von Kameras“, als hinreichend genau erfüllt angesehen werden. Der Merkmalsextraktor aus [15] findet „features“ pixelgenau. Somit sind die subpixelgenauen Korrekturparameter der Bildpunkte, die durch die Kalibration bestimmt werden, für die Weiterverarbeitung ausreichend genau klassifiziert.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden verschiedene Methoden der Kalibration von Matrixkameras vorgestellt, untersucht und klassifiziert. Ein photogrammetrischer Algorithmus wurde implementiert und in die weiteren Untersuchungen eingebunden. Es entstand ein Konzept zur Kalibration von Stereokamerapaaren. Dieses Konzept wurde ebenfalls in das photogrammetrische Verfahren eingebunden und getestet. In Kapitel (2.5) wurde eine Möglichkeit vorgestellt, mit der es möglich sein soll, die implementierte Methode mit Hilfe von extern gemessenen Lageparametern zu stützen. Abschließend wurden die untersuchten Verfahren miteinander verglichen. Dazu wurde eine Basis zum Vergleich der unterschiedlichen Kalibrationsprozeduren gefunden und angewendet.

Aus dieser Arbeit geht hervor, dass der entwickelte Algorithmus im Vergleich zu den beiden alternativen Kalibrationsmethoden (Manipulator-Goniometer und diffraktiv, optische Elemente) und auch einem äquivalenten, kommerziellen Produkt (Australis), ähnlich genaue Resultate liefert. Die photogrammetrische Methode besitzt den Vorteil, dass sie sehr flexibel aufgrund ihrer Ortsunabhängigkeit ist. Im betrachteten Fall dieser Arbeit ist dieser Vorteil nicht verbunden mit dem Nachteil, dass es signifikante Einschränkungen in der Genauigkeit gibt.

Die verglichenen Kalibrationsverfahren werden sich, aufgrund des steigenden Bedarfs an optischen Bildsensoren und der damit verbundenen Kalibration, weiterentwickeln. Die Methode mit Manipulator und Goniometer wird bei der Zeilenkamerakalibration weiterhin eingesetzt werden. Im Zuge der dreidimensionalen Kartographie werden diese Zeilenkameras in der Luftbildphotogrammetrie noch stärker an Bedeutung gewinnen

und die geometrische Kalibration kann hier für die komplette(n) Zeile(n) vorgenommen werden.

Der große Vorteil und das größte Potential zur Weiterentwicklung für diffraktiv optische Elemente liegt in der Kalibration mit Lasern verschiedener Wellenlänge, sodass es möglich sein wird Kameras nicht nur geometrisch sondern auch spektral auf einfachere Weise zu kalibrieren.

Das vorgestellte Konzept zur Stützung der Kalibration mit Lagesensoren bietet eine Möglichkeit die photogrammetrische Methode zu verbessern und zu verfeinern. Es ist damit zu rechnen, dass zukünftige Anwendungen noch höhere Erwartungen an die Genauigkeit der Lageparameter stellen werden. Das bedeutet, dass Merkmalsextraktoren in Zukunft in hohem Maße subpixelgenaue Ergebnisse liefern müssen und die damit verbundenen Anforderungen an die Kalibration werden weiter steigen.

# A Das Lochkameramodell

Das Lochkameramodell basiert auf der Definition einer Kamera, die mittels perfekter, perspektivischer Projektion [vgl. Bild (A.1)] einen Objekt- bzw. Weltpunkt  $\mathbf{M}$  durch das optische Zentrum  $\mathbf{c}_f = (x_0, y_0)'$  unverzerrt in der Bildebene abbildet. Man erhält den Bildpunkt  $\mathbf{m}$  eines Weltpunktes als Schnitt einer Geraden mit der Bildebene. Die Gerade wird beschrieben durch den Weltpunkt und das optische Zentrum der Kamera. Die

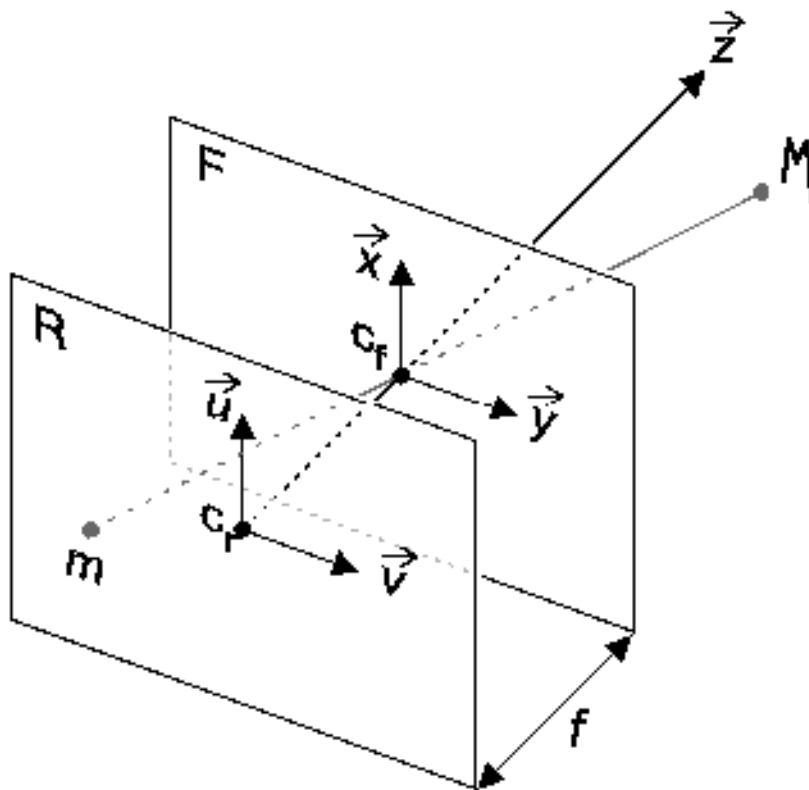


Abbildung A.1: Lochkameramodell [1]

Überführung von Welt- in Bildkoordinaten gestaltet sich dadurch sehr einfach. Ebenso trivial ist die Bestimmung der äußeren Orientierung der Lochkamera aus einer Menge von Welt- und zugehörigen Bildpunkten. Der Zusammenhang zwischen dem Bildpunkt in homogenen Koordinaten  $\mathbf{m} = [u, v, 1]^T$  und dem zugehörigen Objektpunkt in homogenen Koordinaten  $\mathbf{M} = [X, Y, Z, 1]^T$  kann durch die Gleichung

$$s \mathbf{m} = \mathcal{K} [\mathbf{R} \ \mathbf{t}] \mathbf{M} \quad (\text{A.1})$$

beschrieben werden [21]. Wobei im betrachteten Fall einer Lochkamera die intrinsische Matrix

$$\mathcal{K} = \begin{bmatrix} -f & 0 & 0 \\ 0 & -f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

mit  $f$  als Abstand von Bild- und Fokalebene und dem Hauptpunkt im Zentrum des Bildes  $(0, 0)$  ist. Die Rotation  $\mathbf{R}$  und die Translation  $\mathbf{t}$  sind die Parameter der äußeren Orientierung der Kamera.

Es entsteht eine ideale Abbildung des Objektes, welche um  $180^\circ$  gedreht ist. Durch den Vergleich des verzerrten Bildes einer realen Kamera mit dem unverzerrten Bild einer Lochkamera, lässt sich die Verzerrung des Bildes beschreiben. Durch die ideale Projektion eignet sich das Lochkameramodell als Basis für reale Kameramodelle.

# B Initialisierung der photogrammetrischen Parameter

## B.1 Der normierte 4-Punkt-Algorithmus zur Bestimmung der Homographie

In [14] wird gezeigt, wie eine  $3 \times 3$ -Homographie-Matrix  $\mathcal{H}$  mit acht Freiheitsgraden für  $n \geq 4$  homologe Bildpunkte  $x_i \leftrightarrow x'_i$  bestimmt werden kann. Es gilt folgende Beziehung:

$$x'_i = \mathcal{H}x_i \quad (\text{B.1})$$

Um zu einer eindeutigen Lösung zu kommen, dürfen die Punkte nicht kollinear verteilt sein.

Nach Transformation der Bildpunkte in homogene Koordinaten bietet sich eine Normierung an, da dies zu numerisch, stabileren Ergebnissen führt. Alle Punkte  $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i, w_i)^T$  werden dazu so verschoben, dass der Schwerpunkt der Koordinaten im Ursprung  $(0, 0)^T$  liegt. Die Skalierung der Punkte erfolgt derart, dass der mittlere Abstand zum Ursprung  $\sqrt{2}$  beträgt. Folgende Transformationsmatrix fasst sowohl die Verschiebung als auch die Skalierung in einer Matrix zusammen:

$$T = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 & t_x \\ 0 & \lambda_y & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

Die normierten Koordinaten ergeben sich durch entsprechende Multiplikation  $\hat{x}_i = Tx_i$ . Die Normierung muss, unabhängig vom projektiven Bild, auch für das zweite (projektiv entzerrte) Bild berechnet werden um die Punkte  $x'_i$  mit  $T'$  nach  $\hat{x}'_i$  zu transformieren. Für

alle nun normierten Bildpunktpaare  $\hat{x}_i \leftrightarrow \hat{x}'_i$  müssen nun die beiden Zeilen  $\mathcal{L}$  aufgestellt werden.

$$\mathcal{L}_i = \begin{bmatrix} \hat{w}'_i \hat{x}_i^T & \vec{0}^T & -\hat{x}'_i \hat{x}_i^T \\ \vec{0}^T & \hat{w}'_i \hat{x}_i^T & -\hat{y}'_i \hat{x}_i^T \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

Anschließend werden alle Beobachtungen in einer gemeinsamen  $2n \times 9$  großen Matrix  $\mathcal{L}$  zusammengefasst. Ab  $n \geq 4$  homologen Beobachtungen kann das lineare homogene Gleichungssystem

$$\mathcal{L}h = 0 \quad (\text{B.4})$$

mit  $h = [h_1, \dots, h_9]^T$ , durch eine Singulärwertzerlegung (SVD) bestimmt werden. Der Lösungsvektor  $h$  entspricht dabei dem Eigenvektor, der zugehörig zum kleinsten Eigenwert von  $\mathcal{L}$  ist. Wenn die Komponenten des Lösungsvektors  $h$  wieder in Matrixform gebracht werden, erhält man eine Homographiematrix für die normierten Koordinaten.

$$\hat{\mathcal{H}} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

Um die Homographie der ursprünglichen Koordinaten zu erhalten muss die Normierung wieder aufgehoben werden. Dies geschieht durch:

$$\mathcal{H} = T'^{-1} \hat{\mathcal{H}} T \quad (\text{B.6})$$

## B.2 Interne und externe Orientierung aus der projektiven Transformation

Eine Matrix  $\mathbf{B}$  ist nach [21] definiert mit:

$$B = \mathcal{L}^{-T} \mathcal{L}^{-1} \equiv \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{B.7})$$

und

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & -\frac{\gamma}{\alpha^2 \beta} & \frac{v_0 \gamma - u_0 \beta}{\alpha^2 \beta} \\ -\frac{\gamma}{\alpha^2 \beta} & \frac{\gamma^2}{\alpha^2 \beta^2} + \frac{1}{\beta^2} & -\frac{\gamma(v_0 \gamma - u_0 \beta)}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} \\ \frac{v_0 \gamma - u_0 \beta}{\alpha^2 \beta} & -\frac{\gamma(v_0 \gamma - u_0 \beta)}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} & \frac{(v_0 \gamma - u_0 \beta)^2}{\alpha^2 \beta^2} + \frac{v_0^2}{\beta^2} + 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.8})$$

Aufgrund der Symmetrie von  $\mathbf{B}$  ist sie gleichermaßen bestimmt durch den Vektor

$$b = [B_{11} \ B_{12} \ B_{22} \ B_{13} \ B_{23} \ B_{33}]^T \quad (\text{B.9})$$

Der  $i$ -te Spaltenvektor der zuvor berechneten Homographie  $\mathcal{H}$  sei  $h_i = [h_{i1}, h_{i2}, h_{i3}]^T$ . So erhält man

$$h_i^T B h_j = v_{ij}^T b \quad (\text{B.10})$$

mit

$$v_{ij} = [h_{i1}h_{j1}, h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1}, h_{i2}h_{j2}, h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3}, h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3}, h_{i3}h_{j3}]^T$$

Mit dem Wissen über die beiden fundamentalen Zusammenhänge einer Homographie  $\mathcal{H}$  laut [21],

$$\mathbf{h}_1^T \mathcal{K}^{T-1} \mathcal{K}^{-1} \mathbf{h}_2 = 0 \quad (\text{B.11})$$

$$\mathbf{h}_1^T \mathcal{K}^{T-1} \mathcal{K}^{-1} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T \mathcal{K}^{T-1} \mathcal{K}^{-1} \mathbf{h}_2 \quad (\text{B.12})$$

lässt sich zusammenfassen:

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} b = 0 \quad (\text{B.13})$$

Die  $n$  Beobachtungen werden nun zu einer  $2n \times 6$  großen Designmatrix  $V$  zusammengefasst und es entsteht ein homogenes Gleichungssystem der Form:

$$Vb = 0 \quad (\text{B.14})$$

Mit  $n \geq 3$  Beobachtungen besitzt dieses Gleichungssystem eine eindeutige Lösung, die bis auf einen Skalierungsfaktor durch eine Singulärwertzerlegung (SVD) zu bestimmen ist. Der Lösungsvektor  $b$  entspricht dabei dem Rechtseigenvektor, zugehörig zum kleinsten Eigenwert.

Nach Erhalt einer Lösung für  $b$  lassen sich die intrinsischen (Kamera-)Parameter nach-

folgend berechnen:

$$\begin{aligned}v_0 &= \frac{B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2} \\ \lambda &= B_{33} - \frac{B_{13}^2 + v_0(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})}{B_{11}} \\ \alpha &= \sqrt{\frac{\lambda}{B_{11}}} \\ \beta &= \sqrt{\frac{\lambda B_{11}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}} \\ \gamma &= -\frac{B_{12}\alpha^2\beta}{\lambda} \\ u_0 &= \frac{\gamma v_0}{\beta} - \frac{B_{13}\alpha^2}{\lambda}\end{aligned}$$

Mit dem Wissen über die intrinsischen Parameter lässt sich jetzt die äußere Orientierung bestimmen:

$$\begin{aligned}r_1 &= \lambda \mathcal{K}^{-1} h_1 \\ r_2 &= \lambda \mathcal{K}^{-1} h_2 \\ r_3 &= r_1 \times r_2 \\ t &= \lambda \mathcal{K}^{-1} h_3\end{aligned}$$

mit dem Skalierungsfaktor

$$\lambda = \frac{1}{\|\mathcal{K}^{-1}h_1\|} = \frac{1}{\|\mathcal{K}^{-1}h_2\|} .$$

# C Bestimmung der optischen Achse

## C.1 Ansatz

Um die Parameter der Inneren Orientierung separat zu bestimmen, muss die Z-Achse des Kamerakoordinatensystems parallel zur Z-Achse des Laborkoordinatensystem orientiert sein [3]. Bis auf eine Drehung um die optische Achse ist diese Bedingung erfüllt, wenn die optische Achse parallel zur Ausbreitungsrichtung des ungebeugten Laserstrahls ausgerichtet ist. Der Durchstoßpunkt der optischen Achse durch die Sensorebene, der der Koordinatenursprung bzw. Hauptpunkt für alle Bildkoordinatensysteme ist, wird durch den Ort des fokussierten Laserstrahls in der Bildebene fixiert. In [11] wurde erläutert, wie mittels symmetrischer Beugungsbilder der Hauptpunkt gefunden werden kann. Im Vorfeld der Arbeit in [3] wurden experimentelle Untersuchungen und beugungstheoretische Rechnungen durchgeführt.

Deren übereinstimmendes Ergebnis war, dass hinreichend kleine Divergenzwinkel zwischen optischer Achse und Laserausbreitungsrichtung zu einer behebbaren Unsymmetrie des Beugungsbildes führt. Durch eine Translation

$$T = f \otimes \gamma$$

senkrecht zur optischen Achse, kann die Symmetrie des speziellen Beugungsbildes wiederhergestellt werden. Hierbei ist  $f$  die Brennweite und  $\gamma$  der Divergenzwinkel zwischen optischer Achse und Laserausbreitungsrichtung. Das bedeutet mit anderen Worten, die geometrische Kalibration ist in bestimmten Grenzen unabhängig von der Falschausrichtung der optischen Achse zur Laserstrahlrichtung. Diese Näherung der starren Translation

für das gesamte Beugungsbild gilt mit einem Fehler kleiner einem Pixel unter der Bedingung  $\gamma \leq 0.8^\circ$ . Während die Lage des Hauptpunktes dabei im Bereich einiger Pixel unbestimmt bleibt, bleiben solche Kalibrationsparameter, wie die Verzeichnung davon unbeeinflusst. Für eine genauere Fixierung des Hauptpunktes bietet sich eine Methode an, die die Symmetrie der Newtonschen Ringe, entstanden bei der Reflektion des aufgeweiteten Laserstrahls am Objektiv, ausnutzt. Nur wenn der Strahl in sich reflektiert wird, entstehen durch Interferenz kreisförmige Ringe.

## C.2 Fixierung des Hauptpunktes mit Hilfe der Newtonschen Ringe

In [2] wird erläutert, wie sich ein möglicher Aufbau und die Durchführung einer genauen Bestimmung der optischen Achse realisieren lässt (vgl. Abbildung C.1).

Ein unpolarisierter He-Ne Laser<sup>1</sup> mit einer Wellenlänge von 633nm und einer Leistung von 17mW wird durch einen Schirm mit Lochblende begrenzt. Der Strahl wird dann in die zu vermessende Kamera (K2) eingestreuert und die Reflektion von den Linsenoberflächen des Objektivs auf den Schirm mit Lochblende (L3) projiziert und von einer Kontrollkamera (K3), die im Winkel  $\alpha$  zum Schirm steht, aufgenommen. Beide Kameras verfügen über einen Off-Axis Manipulator<sup>2</sup>.

Bei der Messung müssen alle Lichtquellen so reduziert werden, dass die Reflektionen eindeutig auf dem Projektionsschirm (L3) zu sehen sind und von der Kontrollkamera (K3) erfasst werden können. Der Manipulator von (K2) wird erst translativ bewegt, so dass sich die Reflektionspunkte der einzelnen Linsenoberflächen waagrecht aufreihen. Dieser Übergang ist in Bild (C.2) dargestellt. Danach wird (K2) translativ nur noch in X-Richtung bewegt, um die einzelnen Intensitätsverteilungen der Reflektion auf dem Schirm L3 zu vereinen. Die Rotationsachsen des Off-Axis Manipulators von Kamera K2 werden

---

<sup>1</sup>He-Ne Laser - Helium Neon Laser

<sup>2</sup>Off-Axis-Manipulator - ein Manipulator, mit dem sich das optische Zentrum eines Bildsensors unabhängig vom mechanischen Zentrum der Apparatur verschieben und rotieren lässt [10]

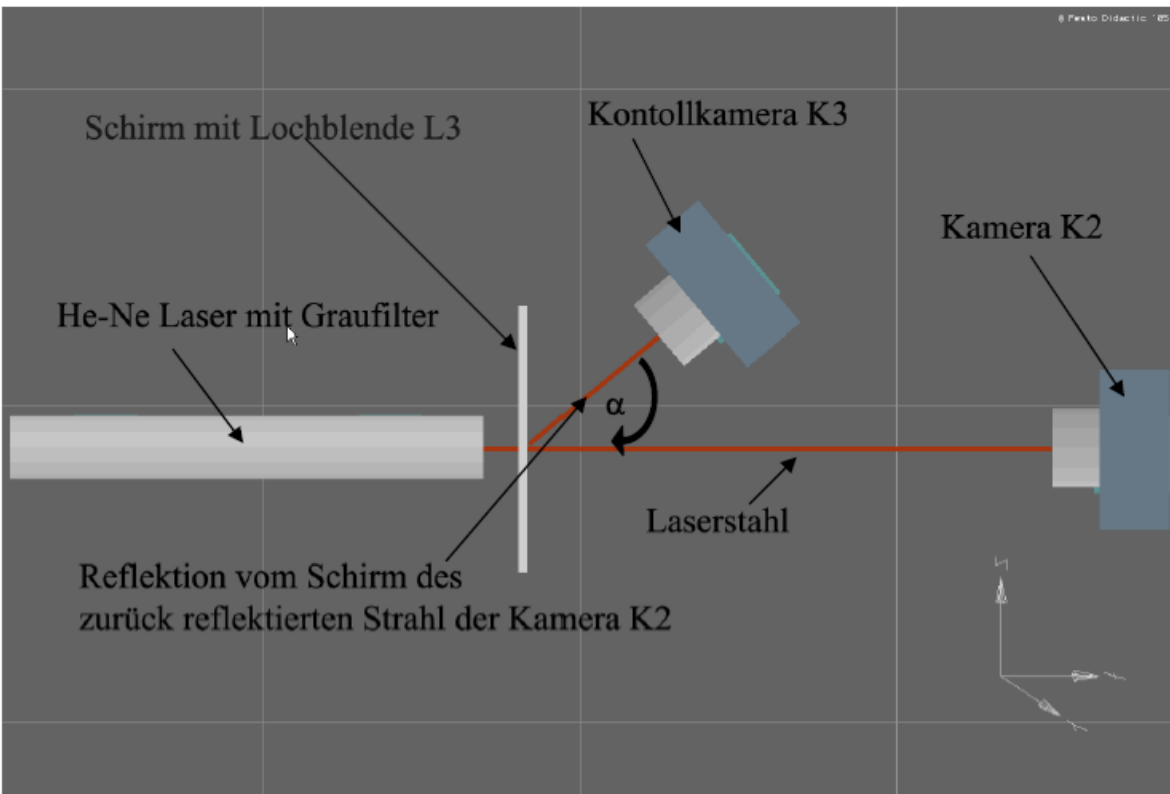


Abbildung C.1: Aufbau zur Detektion der optischen Achse über Reflektion [2]

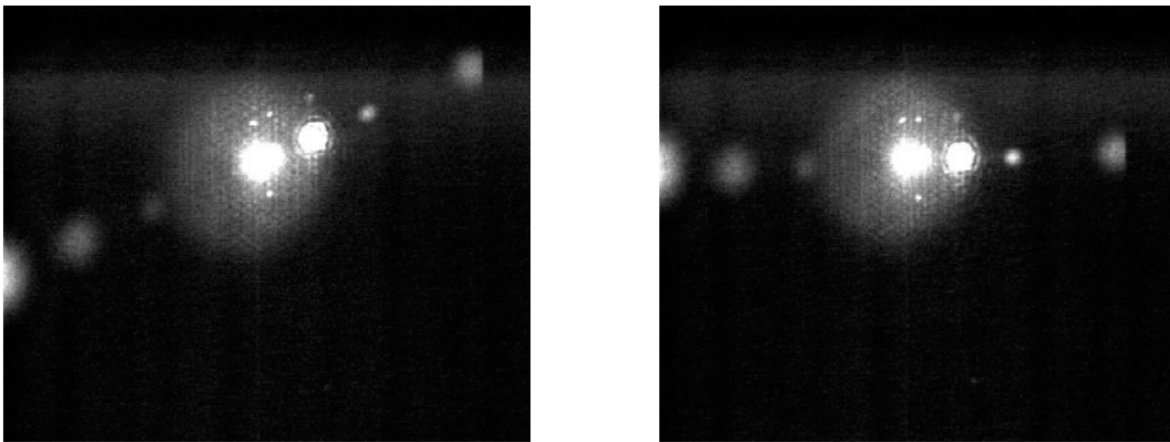


Abbildung C.2: Initiale Justierung (Links) Anfangszustand (Rechts) waagerechtes Reflexionsbild [2]

lediglich zur Feinjustage des Beugungsbildes verwendet, bis eine Symmetrie zwischen der Zentrumstruktur und der entstandenen Ringstruktur entsteht. Der Mittelpunkt der Struktur soll zentrisch zum Ringmuster stehen. Nach Einstellung der Symmetrie fällt die optische Achse der zu vermessenden Kamera mit dem Laserstrahl zusammen. Abbildung (C.3) zeigt den finalen Übergang vom dejustierten Fall zur justierten Kamera.

Die Bildinformation von Kamera (K2), mit der aufgenommenen Intensitätsverteilung

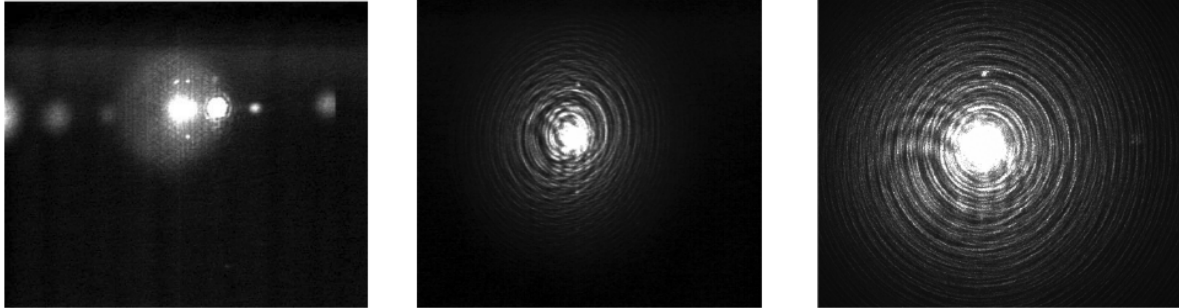


Abbildung C.3: Ausrichtung der optischen Achse; (Links, Mitte) dejustierte Kamera, (Rechts) justierte Kamera [3]

des abgeschwächten Laserstrahles, wird postprozessiv ausgewertet. Ein dafür in [3] entwickeltes Programm berechnet den Häufungsschwerpunkt der Bildebene. Schritt eins ist die Filterung des Hintergrundrauschens. Schritt zwei ist die Detektierung der Häufungsmaxima in den Bilddaten. Zuletzt wird die Bildintensitätsinformation skaliert und mit einem Gaußfit-Algorithmus der Schwerpunkt ermittelt. Somit ist der Durchstoßpunkt der optischen Achse in der Bildebene in Pixel  $(x,y)$  definiert.

# Literaturverzeichnis

- [1] ADHAMI, L.: *Robot-Bone Registration for Orthopedic Surgical Interventions*, American University of Beirut, Beirut, Libanon, Diplomarbeit, 1998
- [2] BAUER, M. *Praktikumsbericht*. 2007
- [3] BAUER, M. ; BÖRNER, A. ; JAHN, H. ; SCHEELE, M. ; SCHISCHMANOW, A. ; SCHUSTER, R. *Dynamische Beugungsmuster als Passpunktfelder für die geometrische Kalibration*. 2006
- [4] CRAIG, John J.: *Introduction to Robotics*. Addison-Wesley Publishing Company, 1989. – ISBN 0–201–09528–9
- [5] DALSA. *Datenblatt der DALSA 1M28-SA*. 2006
- [6] DUDENREDAKTION: *Deutsches Universalwörterbuch*. Dudenverlag, 2003. – ISBN 3–411–05505–7
- [7] FOTOKINOVERLAG, Leipzig: Entwicklungstendenzen der fotografischen Optik. In: *Bild und Ton* 1 (1986)
- [8] GRIESSBACH, D. *Projekt IPS; Zwischenbericht*. 2006
- [9] HALLIDAY, D. ; RESNICK, R.: *Physik*. Walter de Gruyter, 1993. – ISBN 3110138972
- [10] INGRAM, B. *Telecommunications: Glossary of Telecommunication Terms*. 1996
- [11] JAHN, H. ; SCHEELE, M. ; SCHUSTER, R.: Metrische Qualifizierung von Matrix-Kameras. In: *49. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Ilmenau* Vol. 2 (2004), S. 261
- [12] KIDAWA, N. ; SIMON, C. *Wahrnehmung von Rauschen abhängig von Bildfrequenz und Kontrast unter Zuhilfenahme des CIE-Lab Farbraums*. 2003
- [13] PHOTOMETRIX. *User Manual for Australis*. 2007
- [14] RODEHORST, V.: *Photogrammetrische 3D-Rekonstruktion im Nahbereich durch Auto-Kalibrierung mit projektiver Geometrie*. Wissenschaftlicher Verlag Berlin, 2004. – ISBN 3–936846–83–9

- [15] ROSENTHAL, J.C.: *Feature Detection und Matching Verfahren zur Position und Lagebestimmung*, Universität Koblenz, Diplomarbeit, 2006
- [16] SCHEELE, M. ; JAHN, H. ; SCHUSTER, R.: Geometrische Kalibration von CCD Kameras mittels Beugungsbilder. In: *Publikationen der DGPF* Band 13 (2004), S. 513
- [17] SCHOLTEN, F. ; SUJEW, S. ; WEWEL, F. ; FLOHRER, J. ; JAUMANN, R. ; LEHMANN, F. ; PISCHEL, R. ; NEUKUM, G. *The High Resolution Stereo Camera (HRSC) – Digital 3D-Image Acquisition, Photogrammetric Processing and Data Evaluation*. 1999
- [18] SCHUSTER, R. ; BRAUNECKER, B.: Calibration of the LH SYSTEMS ADS40 Airborne Digital Sensor. In: *IAPRS* Vol. XXXIII (2000)
- [19] STEGER, D. *Motion Capture mit optisch-magnetischem Trackingsystemen in VR-Applikationen*. 2004
- [20] WEISSHAAR, E. ; KÜVELER, G. ; BIANDA, M. *Schnelle und genaue Methode zur Schwerpunktfindung in Messreihen*
- [21] ZHANG, Z.: *A Flexible New Technique for Camera Calibration*. Microsoft Research, 1998. – Technical Report MSR-TR-98-71

## **Erklärung**

Hiermit versichere ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und eigenhändig angefertigt habe.

Berlin, im Juni 2007