

Untersuchungen zur Kalibrierfähigkeit eines Fisheyeobjektives mit Photomodeler

Bachelorarbeit

im Studiengang
Geodäsie und Geoinformatik

vorgelegt von:

Carolin Böhme

Matrikelnummer: 2793000

am 22. Januar 2015

Erstprüfer/-in: Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen

Zweitprüfer/-in: Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe.

Hannover, den 22.01.2015

Carolin Böhme



Bachelorarbeit

Thema: Untersuchungen zur Kalibrierfähigkeit eines Fisheyeobjektives mit Photomodeler

Aufgabenstellung für Frau Carolin Böhme

Um z.B. Innenräume von Gebäuden wirtschaftlich dreidimensional erfassen zu können, werden oftmals Fisheyeobjektive eingesetzt. Die extremen optischen Verzeichnungen dieser Objektive müssen zur späteren Nutzung innerhalb der optischen Messtechnik erfasst und mathematisch modelliert werden. Die Parameter der inneren Orientierung sind hierzu um geeignete Verzeichnungsparameter zu erweitern und innerhalb einer Kamerakalibrierung zu ermitteln.

Im Rahmen dieser Arbeit ist festzustellen, ob die Verzeichnungsparameter des zur Verfügung stehenden Fisheyeobjektives mit der Kalibrierfunktion des Programmes Photomodeler bestimmt werden können. Es ist zu untersuchen, welche Unterschiede sich bei der Kalibrierung mittels ebenem Testfeld und 3D-Kalibriertafel ergeben. Um die Funktionsweise der Software zu verifizieren, sind Voruntersuchungen mit einem Weitwinkelobjektiv (18 mm) anzustellen, die dann auf die Kalibrierung des Fisheyeobjektives zu übertragen sind. Als Ergebnis werden Aussagen erwartet, ob die Kalibrierfähigkeit des Objektives gegeben ist und welcher Aufwand für die Bestimmung der Parameter der Inneren Orientierung erforderlich ist.

Ausgabetermin: 22.07.2014

Abgabetermin: 22.01.2015

Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen

Fakultät für Bauingenieurwesen
und Geodäsie

Institut für Photogrammetrie
und GeoInformation
Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Heipke

Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen
Tel. +49 511 762-3304
Fax +49 511 762-2483
E-Mail: wiggenhagen
@ipi.uni-hannover.de

22.07.2014

Besucheradresse:
Nienburger Straße 1
30167 Hannover
www.ipi.uni-hannover.de

Zentrale:
Tel. +49 511 762 0

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen	2
2.1 Optische Abbildung	2
2.1.1 Modell der Zentralperspektive.....	2
2.1.2 Parameter der innere Orientierung	4
2.1.3 Abbildungsfehler	4
2.1.3.1 Radial-symmetrische Verzeichnung.....	4
2.1.3.2 Radial-asymmetrische / tangentielle Verzeichnung	5
2.1.3.3 Korrektur der Bildkoordinaten	6
2.1.3.4 Chromatische Aberration.....	6
2.2 Kalibrierung	7
2.2.1 Kalibrierverfahren.....	7
2.2.2 Aufnahmekonfiguration	8
2.2.3 Bündelausgleichung.....	9
2.3 Fisheyeobjektive	10
3 PhotoModeler	12
3.1 Modellierung der optischen Verzeichnungen	12
3.2 Vorgehensweise bei der Kalibrierung.....	13
3.2.1 Kalibrierung innerhalb eines „Calibration Project“	13
3.2.2 Kalibrierung innerhalb eines „Automated Coded Targets Project“	14
3.3 Ergebnisbetrachtung	16
3.3.1 Project Status Report.....	16
3.3.2 Tabellen (Point Table, Photo Table)	16
3.3.3 Visualisierung	17
4 Untersuchungen zur Kamerakalibrierung	18
4.1 Voruntersuchung mittels 18mm-Objektiv.....	18
4.1.1 Ebenes Testfeld	18
4.1.2 Räumliches Testfeld.....	22
4.2 Untersuchungen zum Fisheyeobjektiv	25
4.2.1 Ebenes Testfeld	25
4.2.2 Räumliches Testfeld.....	27

4.3	Vergleich zwischen 18mm- und Fisheyeobjektiv.....	31
4.3.1	Ebenes Testfeld	31
4.3.2	Räumliches Punktfeld.....	35
5	Zusammenfassung.....	40
	Literaturverzeichnis	42
	Anhang.....	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Idealfall der optischen Abbildung [nach Luhmann, 2010a, S. 108 & S. 110].....	2
Abbildung 2-2: Radial-symmetrische Verzeichnung [nach Luhmann, 2010a, S. 141]	5
Abbildung 2-3: Mögliche Aufnahmekonfigurationen für ebene Testfelder	9
Abbildung 2-4: Mögliche Aufnahmekonfigurationen für räumliche Testfelder [Luhmann, 2010a, S. 561].....	9
Abbildung 4-1: Aufnahmekonfiguration Kalibrierung 18mm-Objektiv mit ebenem Testfeld	18
Abbildung 4-2: Darstellung der Residuen der ersten Aufnahme mit 1000-facher Überhöhung (18mm-Objektiv, ebenes Testfeld)	20
Abbildung 4-3: Aufnahmekonfiguration Kalibrierung 18mm-Objektiv mit räumlichen Testfeld.....	22
Abbildung 4-4: Darstellung der Residuen der ersten Aufnahme mit 1000-facher Überhöhung (18mm-Objektiv, räumliches Testfeld)	24
Abbildung 4-5: Darstellung der Residuen der ersten Aufnahme mit 1000-facher Überhöhung (Fisheyeobjektiv, ebenes Testfeld)	26
Abbildung 4-6: Ergebnis der automatischen Markierung nach Projektstart (Aufnahme 8)	28
Abbildung 4-7: Darstellung der Residuen der ersten Aufnahme mit 500-facher Überhöhung (Fisheyeobjektiv, räumliches Testfeld)	30
Abbildung 4-8: Ausschnitt einer Aufnahme des ebenen Testfelds mit Fisheyeobjektiv (links) und 18mm-Objektiv (rechts) bei gleicher Orientierung der Kamera	31
Abbildung 4-9: Verzeichnungskurve des 18mm-Objektivs (rot) und des Fisheyeobjektivs (blau) (ebenes Testfeld)	32
Abbildung 4-10: Verwendetes Koordinatensystem des ebenen Testfeld	34
Abbildung 4-11: Verzeichnungskurve des 18mm-Objektivs und des Fisheyeobjektivs (räumliches Testfeld).....	37
Abbildung 4-12: Verwendetes Koordinatensystem des räumlichen Testfeldes und die für den Streckenvergleich verwendeten Punkte (grün)	38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Parameter der inneren Orientierung des 18mm-Objektivs (ebenes Testfeld, erste Kalibrierung).....	19
Tabelle 4-2: Parameter der inneren Orientierung des 18mm-Objektivs (ebenes Testfeld, alle Punkte referenziert)	20
Tabelle 4-3: Korrelationsmatrix der Parameter der inneren Orientierung des 18mm-Objektivs in Prozent (ebenes Testfeld)	21
Tabelle 4-4: Korrelationsmatrix der Parameter der inneren Orientierung des 18mm-Objektivs unter Einbeziehung von K_3 in Prozent (ebenes Testfeld).....	21
Tabelle 4-5: Parameter der inneren Orientierung des 18mm-Objektivs (räumliches Testfeld).....	23
Tabelle 4-6: Korrelationsmatrix der Parameter der inneren Orientierung des 18mm-Objektivs in Prozent (räumliches Testfeld)	24
Tabelle 4-7: Parameter der inneren Orientierung des Fisheyeobjektivs (ebenes Testfeld)	26
Tabelle 4-8: Korrelationsmatrix der Parameter der inneren Orientierung des Fisheyeobjektivs in Prozent (ebenes Testfeld).....	27
Tabelle 4-9: Parameter der inneren Orientierung des Fisheyeobjektivs (räumliches Testfeld, erste Kalibrierung).....	28
Tabelle 4-10: Parameter der inneren Orientierung des Fisheyeobjektivs (räumliches Testfeld, letzte Kalibrierung).....	30
Tabelle 4-11: Korrelationsmatrix der Parameter der inneren Orientierung des Fisheyeobjektivs in Prozent (räumliches Testfeld, letzte Kalibrierung).....	30
Tabelle 4-12: Ergebnisse der Kalibrierung des 18mm- und des Fisheyeobjektivs (ebenes Testfeld).....	32
Tabelle 4-13: Ergebnisse der Kalibrierung des 18mm-Objektivs mit ebenem Testfeld ohne Frontalaufnahmen.....	33
Tabelle 4-14: Streckenvergleich zwischen 18mm- und Fisheyeobjektiv (ebenes Testfeld).....	35
Tabelle 4-15: Ergebnisse der Kalibrierung des 18mm- und des Fisheyeobjektivs (räumliches Testfeld).....	36
Tabelle 4-16: Streckenvergleich zwischen 18mm- und Fisheyeobjektiv (räumliches Testfeld).....	39

1 Einleitung

In der Nahbereichsphotogrammetrie werden zunehmend Fisheyeobjektive für die Aufnahme von Objekten eingesetzt, z. B. bei der Modellierung von Innenräumen. Sie weisen eine kurze Brennweite auf, sodass ein geringerer Abstand zum Messobjekt möglich ist, und eignen sich somit nicht nur für die photogrammetrische Aufnahme in Räumen, sondern auch in engen Straßen. Der große Öffnungswinkel bietet zudem den Vorteil einer wirtschaftlicheren Durchführung der Messung. Da mehr Umgebung auf den Sensor abgebildet wird, reichen wenige Aufnahmen zur Erfassung des Objekts. Die starken Verzeichnungen dieser Objektive müssen jedoch bei der Bestimmung von Objektkoordinaten aus Bildpunktmessungen entsprechend berücksichtigt und vor oder besser zeitgleich mit der Aufnahme des Objekts bestimmt werden. Zusätzlich müssen die Parameter der inneren Orientierung des Kamerasystems zur Modellierung des Abbildungsvorgangs bekannt sein. Beides gelingt durch eine Kalibrierung des Kamerasystems.

In dieser Arbeit soll untersucht werden, ob die Software PhotoModeler, die für die Auswertung von photogrammetrischen Aufnahmen auch eine Funktion zur Bestimmung der Kameraparameter enthält, zur Kalibrierung eines bereitgestellten Fisheyeobjektives geeignet ist. Für die Untersuchungen stehen ein Weitwinkelobjektiv (18 mm) sowie ein Fisheye-Konverter zur Verfügung. Die Kalibrierung erfolgt für beide Objektivtypen jeweils mit einem durch die Software bereitgestellten ebenen Testfeld und einem räumlichen Testfeld bestehend aus codierten Punktmarken. Durch einen anschließenden Vergleich der Ergebnisse der Kalibrierungen wird eine Aussage über die Bestimmbarkeit der Parameter der inneren Orientierung des Fisheye-Konverters getroffen. Hierfür werden neben den durch die Software bereitgestellten Daten zu Standardabweichungen und Residuen auch ausgewählte Strecken zwischen den Testfeldpunkten genutzt. Zum Schluss wird zusätzliche noch eine Aussage über den Arbeitsaufwand der Kalibrierung des Fisheyeobjektives getroffen.

2 Grundlagen

2.1 Optische Abbildung

In der Photogrammetrie sollen anhand von Bildpunktmessungen in mehreren Bildern die Lage und Form der aufgenommenen Objekte rekonstruiert werden. Hierfür sind Kenntnisse über den Strahlenverlauf innerhalb des Aufnahmesystems erforderlich, um den Zusammenhang zwischen Objekt- und Abbildungsraum herzustellen.

2.1.1 Modell der Zentralperspektive

Zur Beschreibung des Abbildungsprozesses wird in der Photogrammetrie das Prinzip der Lochkamera verwendet, welches auch als zentralperspektivische Abbildung bezeichnet wird. Abbildung 2-1 veranschaulicht diesen Prozess und alle relevanten Größen.

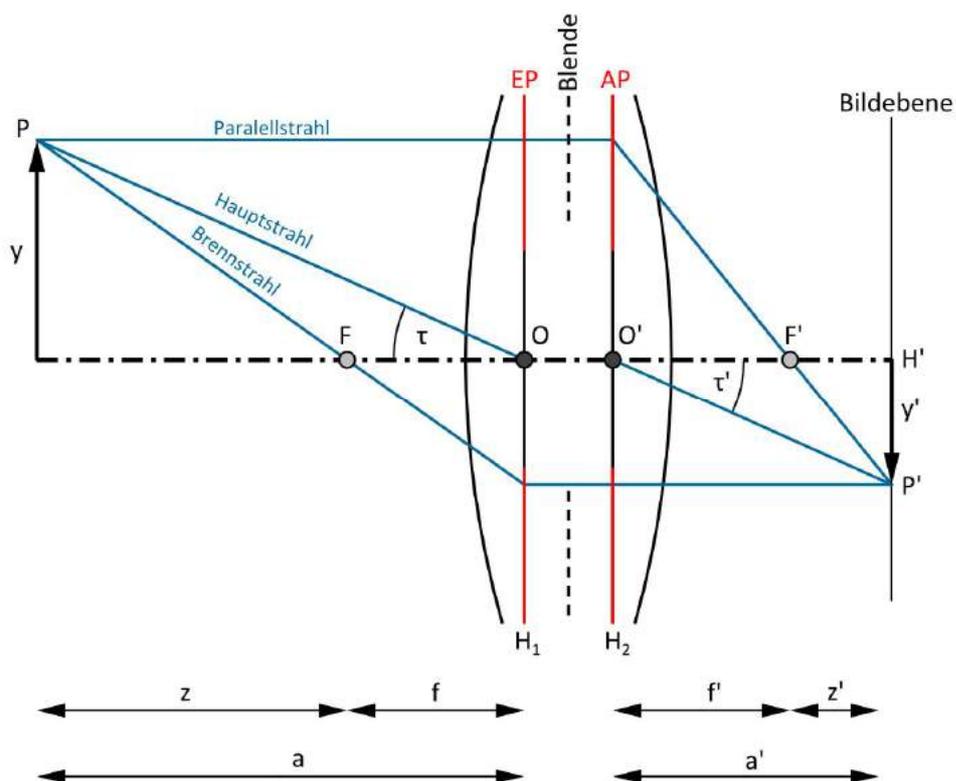


Abbildung 2-1: Idealfall der optischen Abbildung [nach Luhmann, 2010a, S. 108 & S. 110]

Die beiden optischen Hauptpunkte O und O' definieren die optische Achse als Gerade und bilden die Mittelpunkte der beiden Hauptebenen H_1 und H_2 . Unter der Voraussetzung eines linsenzentrierten Systems, d.h. alle Linsen des optischen Systems haben eine gemeinsame

optische Achse [Reiner, 2002, S. 26], verlaufen H_1 und H_2 parallel zueinander und stehen senkrecht auf der optischen Achse. Als Autokollimationspunkt H' wird der Punkt in der Bildebene bezeichnet, in dem die optische Achse auftrifft. Bei zentrierten Linsen und senkrechter Bildebene entspricht H' dem Bildhauptpunkt und dem Symmetriepunkt der Verzeichnungen [Luhmann, 2010a, S. 109 ff.].

In Abbildung 2-1 ist der Aufbau eines symmetrischen Objektivs dargestellt, bei dem die Blende mittig angebracht ist. In diesem Fall fallen die Eintrittspupille EP und die Austrittspupille AP mit den beiden Hauptebenen zusammen und der Eintrittswinkel τ der Abbildungsstrahlen stimmt mit dem Austrittswinkel τ' überein. Bei asymmetrisch aufgebauten Objektiven oder einer Verschiebung der Blende aus der Mitte kommt es zu radial-symmetrischen Verzeichnungen, die in Kapitel 2.1.3.1 näher beschrieben werden [Luhmann, 2010a, S.109 ff.].

Der Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten erfolgt über die Kollinearitätsgleichungen [Luhmann, 2010a, S. 239 f.]:

$$\begin{aligned} x' &= x'_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x' \\ y' &= y'_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y' \end{aligned} \quad (2.1)$$

mit:

- x', y' - Bildkoordinaten des Objektpunkts
- X, Y, Z - Koordinaten des Objektpunkts
- x'_0, y'_0 - Bildkoordinaten des Bildhauptpunkts H'
- X_0, Y_0, Z_0 - Koordinaten des Projektionszentrums O
- c - Kamerakonstante
- $\Delta x', \Delta y'$ - Korrekturwerte der Abbildungsfehler

und der Rotationsmatrix R mit den Drehwinkeln ω, φ, κ der äußeren Orientierung:

$$\begin{aligned} R &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa - \sin \varphi \sin \omega \sin \kappa & -\sin \varphi \cos \omega & \cos \varphi \sin \kappa + \sin \varphi \sin \omega \cos \kappa \\ \sin \varphi \cos \kappa + \cos \varphi \sin \omega \sin \kappa & \cos \varphi \cos \omega & \sin \varphi \sin \kappa - \cos \varphi \sin \omega \cos \kappa \\ -\cos \omega \sin \kappa & \sin \omega & \cos \omega \cos \kappa \end{bmatrix} \end{aligned}$$

2.1.2 Parameter der innere Orientierung

Für die Rekonstruktion des Strahlenbündels im Objektraum aus den gemessenen Bildkoordinaten muss die innere Orientierung bekannt sein. Die beschreibenden Parameter sind die Lage des Bildhauptpunkts H' mit den Bildkoordinaten x'_o und y'_o und die Kamerakonstante c sowie die Abweichungen vom idealen Abbildungsmodell in Form von Verzeichnungen oder anderen Abbildungsfehlern [Luhmann, 2010a, S. 143 ff.].

Die Bestimmung der inneren Orientierung erfolgt durch eine Kalibrierung des Kamerasystems.

2.1.3 Abbildungsfehler

Im folgenden Abschnitt werden die in dieser Arbeit relevanten Abbildungsfehler von optischen Systemen erläutert. Dabei wird auf die Verzeichnungen von Objektiven näher eingegangen, da diese für die Kalibrierung von Kamerasystemen eine große Rolle spielen.

2.1.3.1 Radial-symmetrische Verzeichnung

In der Praxis stimmen Ein- und Austrittspupille nicht mit den beiden Hauptebenen überein, sodass sich auch der Ein- und Ausfallswinkel unterscheidet. Grund hierfür sind die Brechungsänderungen an den Linsen des Objektivs oder ein asymmetrischer Aufbau des Objektivs bzw. eine asymmetrische Lage der Blende. Es kommt zu einer Verschiebung des abzubildenden Punktes um den Betrag $\Delta r'$. Dieser Effekt ist abhängig von der Wellenlänge des Lichts, der Blendeneinstellung und Fokussierung sowie der Objektentfernung und ist radial-symmetrisch zum Symmetriepunkt S' . Das Vorzeichen von $\Delta r'$ hängt von der Lage der Blende im System und der Konstruktion des Objektivs ab. Ist die Blende objektseitig verschoben kommt es zu tonnenförmigen Verzeichnungen im Bild. Ist die Blende bildseitig verschoben entstehen, kissenförmige Verzeichnungen [Luhmann, 2010a, S. 141 ff.].

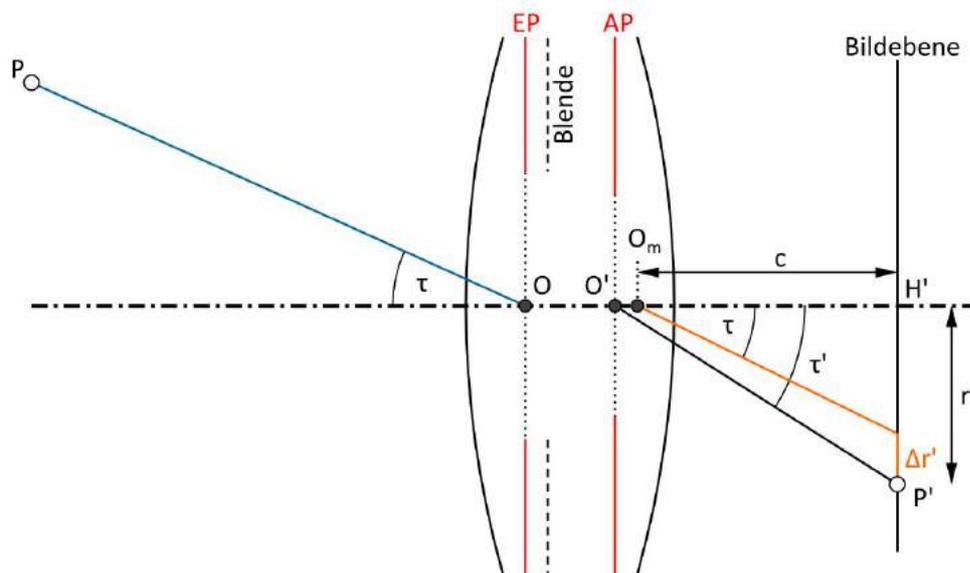


Abbildung 2-2: Radial-symmetrische Verzeichnung [nach Luhmann, 2010a, S. 141]

In der Photogrammetrie wird ein mathematisches Projektionszentrum O_m so gewählt, dass eine größtmögliche Symmetrie der Verzeichnung erreicht wird. Die Kamerakonstante c wird so gewählt, dass die Verzeichnungen minimal werden. Es bleiben jedoch noch Restfehler der radial-symmetrischen Verzeichnung $\Delta r'$ über, die auf den Hauptpunkt bezogen werden und sich als Reihenentwicklung mit Verzeichnungsparametern, als sog. Verzeichnungskurve, beschreiben lassen. Diese Reihenentwicklung kann meist nach dem zweiten oder dritten Term abgebrochen werden [Luhmann, 2010a, S. 142 & S. 148 ff.].

$$\Delta r'_{rad} = A_1 r'^3 + A_2 r'^5 + A_3 r'^7 + \dots \quad (2.2)$$

Der Einfluss der radial-symmetrischen Verzeichnung in x- und y-Richtung berechnet sich proportional nach:

$$\Delta x'_{rad} = x' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'} \quad \Delta y'_{rad} = y' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'} \quad (2.3)$$

Von allen möglichen auftretenden Abbildungsfehlern hat die radial-symmetrische Verzeichnung den größten Einfluss [Luhmann, 2010a, S. 148].

2.1.3.2 Radial-asyymetrische / tangentielle Verzeichnung

Die radial-asyymetrische / tangentielle Verzeichnung wird durch die Dezentrierung der Linsen im Objektiv hervorgerufen und ist für Qualitätsobjektive deutlich geringer als die radial-symmetrische Verzeichnung. Bei hohen Genauigkeitsanforderungen sollte sie jedoch innerhalb

einer Kalibrierung ebenfalls mitbestimmt werden. Formel 2.4 und 2.5 zeigen einen Ansatz zur Erfassung der auftretenden Abweichung in x- und y-Richtung [Luhmann, 2010a, S. 153].

$$\Delta x'_{tan} = B_1(r'^2 + 2x'^2) + 2B_2x'y' \quad (2.4)$$

$$\Delta y'_{tan} = B_2(r'^2 + 2y'^2) + 2B_1x'y' \quad (2.5)$$

2.1.3.3 Korrektur der Bildkoordinaten

Für die Berechnung der verzeichnungsfreien Bildkoordinaten müssen die gemessenen Bildkoordinaten (x'_p, y'_p) zunächst um die Koordinaten des Bildhauptpunkts (x'_0, y'_0) korrigiert werden.

$$x^\circ = x'_p - x'_0 \quad y^\circ = y'_p - y'_0 \quad (2.6)$$

Der Bildradius r' wird als euklidische Distanz zwischen Bildhauptpunkt und gemessener Bildordinate gebildet.

$$r' = \sqrt{x^{\circ 2} + y^{\circ 2}} \quad (2.7)$$

Die endgültigen Bildkoordinaten ergeben sich zu:

$$x' = x^\circ - \Delta x' \quad y' = y^\circ - \Delta y' \quad (2.8)$$

Mit:

$$\Delta x' = \Delta x'_{rad} + \Delta x'_{tan} \quad \Delta y' = \Delta y'_{rad} + \Delta y'_{tan} \quad (2.9)$$

Diese Berechnung muss iterativ erfolgen, da die Berechnung der Gesamtkorrektur $\Delta x'$ und $\Delta y'$ mit den endgültigen Bildkoordinaten x' und y' durchgeführt werden muss. Somit stellen die auf den Hauptpunkt bezogenen Bildkoordinaten x°, y° ebenfalls nur Näherungswerte dar [Luhmann, 2010a, S. 148 ff.].

2.1.3.4 Chromatische Aberration

Dieser Abbildungsfehler entsteht durch die wellenlängenabhängige Dispersion des Lichts und lässt sich in zwei Arten unterteilen.

Der Farblängsfehler (longitudale chromatische Aberration) führt zu einer wellenlängenabhängigen Brennweite, sodass ein Objektpunkt in unterschiedlichen Bildweiten abgebildet wird. Daraus resultiert eine verminderte Schärfeleistung.

Der Farbquerfehler (transversale chromatische Aberration) führt zu unterschiedlichen vom Bildradius abhängigen Abbildungsmaßstäben. Bei polychromatischem Licht kommt es zu einer Farbverschiebung, wohingegen bei monochromatischem Licht der Effekt der radial-symmetrischen Verzeichnung entspricht.

Bei Farbaufnahmen treten im Kantenbereich zudem Farbsäume auf. Die Bildvorverarbeitung und die Art der Farbtrennung innerhalb von Digitalkameras haben eine große Auswirkung auf diesen Effekt [Luhmann, 2010a, S.117 ff.).

2.2 Kalibrierung

Mit Kalibrierung ist in der Photogrammetrie die Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung der Kamera gemeint. Es werden ausgleichende Verfahren angesetzt um aus photogrammetrischen Beobachtungen die Parameter der inneren Orientierung zu bestimmen (siehe 2.2.4). Dabei ist auf eine geeignete Aufnahmekonfiguration zu achten (siehe 2.2.2) um ein qualitativ gutes Ergebnis zu erzielen.

2.2.1 Kalibrierverfahren

[Luhmann, 2010a, S. 555 ff.] beschreibt mehrere Kalibrierverfahren, wobei in dieser Arbeit nur die Testfeld- und Simultankalibrierung von Interesse sind.

Testfeldkalibrierung

Hierfür wird ein Feld mit signalisierten Punkten verwendet, welches aus Passpunkten aber auch aus unbekanntem Punkten bestehen kann. Mit Hilfe einer Bündelausgleichung werden die Parameter der inneren Orientierung geschätzt. Hierbei werden auch die Parameter der äußeren Orientierung und die 3D-Objektkoordinaten mit berechnet. Die Datumsfestlegung erfolgt dabei als zwangsfreie Einpassung, z.B. durch eine freie Netzausgleichung oder der 3-2-1-Methode¹, sodass sich Spannungen, die zwischen Objektpunkten bestehen, nicht auf die berechneten Kameraparameter auswirken.

¹ Bei der Drei-Zwei-Eins-Methode werden die Koordinatenachsen nach einem bestimmten Schema durch drei Passpunkte festgelegt. Punkt 1 legt durch X_1 , Y_1 und Z_1 den Bezugspunkt des Objektkoordinatensystems fest. Punkt 2 legt durch Y_1 und Z_1 die Richtung der X-Achse fest. Zur eindeutigen Festlegung des Koordinatensystems definiert Punkt 3 mit Y_3 die XZ-Ebene. Eine bekannte Strecke dient der Festlegung des Maßstabs (z. B. Abstand zwischen zwei Passpunkten) [Luhmann, 2010a, S. 322 f.].

Testfelder können sowohl eben als auch räumlich angeordnet sein. Letztere bieten den Vorteil einer besseren räumlichen Tiefe und somit eine bessere Bestimmbarkeit der Parameter. Des Weiteren führt eine Verwendung eines dreidimensionalen Testfeldes zu weniger Korrelation zwischen den Parametern.

Die Testfeldkalibrierung kann im Vorfeld einer Objektaufnahme zur Genauigkeitsuntersuchung der Kamera dienen. Dabei sollten jedoch Veränderungen der Kamerageometrie durch Umfokussierung oder Objektivwechsel zwischen Kalibrierung und späterer Objektaufnahme unterlassen werden. Die Größe des Testfeldes sollte möglichst der Größe des aufzunehmenden Objekts entsprechen.

Simultankalibrierung

Die Simultankalibrierung stellt eine Erweiterung der Testfeldkalibrierung dar. Hierbei erfolgt die Bestimmung der inneren Orientierung zeitgleich mit der Objektaufnahme. Passpunkte sind dabei nur für die Transformation in ein übergeordnetes Koordinatensystem und die Berechnung der äußeren Orientierung notwendig. Die Bestimmung erfolgt innerhalb der Bündelausgleichung durch Einführung zusätzlicher Parameter für die innere Orientierung. Als Maßstabsinformation genügt eine bekannte Strecke im Objektraum.

Die Simultankalibrierung bietet den Vorteil, dass die Kameraparameter exakt zum Zeitpunkt der Objektaufnahme bestimmt werden, sodass höhere Genauigkeiten bei der Objektauswertung erzielt werden können.

Selbstkalibrierung bezeichnet eine Simultankalibrierung, die nur mit photogrammetrischen Beobachtungen durchgeführt wird.

2.2.2 Aufnahmekonfiguration

Beispielhaft werden hier einige mögliche Aufnahmekonfigurationen nach [Luhmann, 2010a, S. 560 ff.] beschrieben, die für die Simultankalibrierung mit Bündelausgleichung optimiert sind.

Für ebene Testfelder sind mehrere Schrägaufnahmen notwendig, unabhängig davon, ob das Testfeld aus koordinatenmäßig bekannten oder unbekanntem Punkten besteht. Im Fall eines aus Passpunkten (Objektpunkte mit bekannten Koordinaten) bestehenden Feldes sind zwei zueinander gekantete Schrägaufnahmen wie in Abbildung 2-3a angeordnet ausreichend. Abbildung 2-3b zeigt eine Aufnahmekonfiguration bei Verwendung eines Testfeldes ohne Passpunkte. Die abgebildete Anordnung der acht Kamerastandpunkte führt zu günstigen Strahlenschnitten, einer hohen Redundanz und einer guten Ausnutzung des Bildformats, welches eine zuverlässigere Bestimmung der Verzeichnungen ermöglicht.

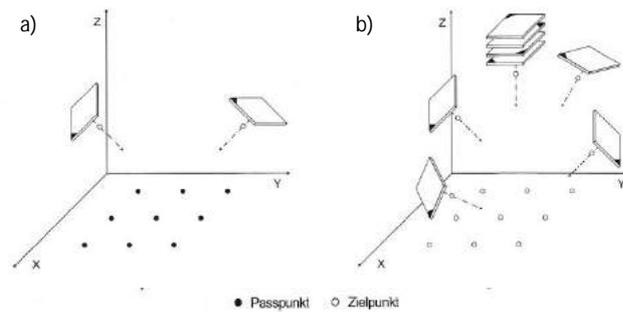


Abbildung 2-3: Mögliche Aufnahmekonfigurationen für ebene Testfelder
[Luhmann, 2010a, S. 560]

Für räumliche Testfelder bestehend aus Passpunkten kann auf Schrägaufnahmen verzichtet werden. Die innere Orientierung kann mit einer Einzelaufnahme und anschließendem räumlichen Rückwärtsschnitt bestimmt werden (Abbildung 2-4a). Liegen keine Passpunktinformationen vor, reichen vier Schrägaufnahmen in beliebiger Kantung zur Kamerakalibrierung (Abbildung 2-4b). Zuverlässiger ist jedoch die von Luhmann vorgeschlagene Konfiguration mit acht jeweils gegenseitig gekanteten Aufnahmen und drei Maßstabsinformationen aus bekannten Strecken (Abbildung 2-4c).

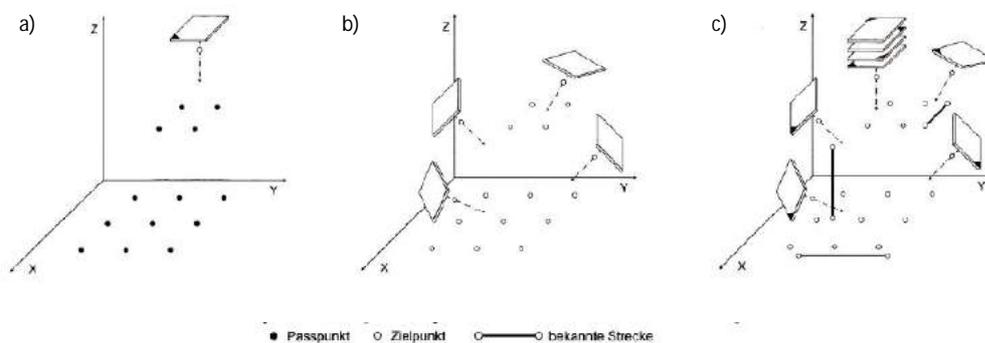


Abbildung 2-4: Mögliche Aufnahmekonfigurationen für räumliche Testfelder [Luhmann, 2010a, S. 561]

2.2.3 Bündelausgleichung

Die Bündelausgleichung dient der simultanen Einpassung beliebig vieler Bilder. In der Photogrammetrie hat sich dieses Verfahren als Standardverfahren aufgrund seiner Leistungsfähigkeit und Genauigkeit durchgesetzt.

Anhand der gemessenen Bildkoordinaten werden die 3D-Objektkoordinaten sowie die Orientierungsparameter der Bilder (äußere Orientierung) in der Bündelausgleichung geschätzt. In einem erweiterten Ansatz können auch zusätzlich Beobachtungen zu den Bildkoordinaten in

die Ausgleichung eingehen, z. B. geodätische Beobachtungen und bekannte Strecken. Als Unbekannte können ebenso weitere Parameter zum Beispiel für die innere Orientierung eingeführt werden [Luhmann, 2010a, S. 302 & S. 312-319].

Werden die Parameter der inneren Orientierung mit geschätzt, ergibt sich der Vorteil, dass Objektaufnahme und Kalibrierung zum selben Zeitpunkt und somit unter denselben Umständen und Einflüssen erfolgen. In der Nahbereichsphotogrammetrie ist man zudem unabhängiger in der Wahl des Aufnahmesystems.

Die Bündelausgleichung erfolgt nach der Methode der kleinsten Quadrate, bei der die Forderung besteht, dass die Quadratsumme der Verbesserungen minimal wird. Als Beobachtungsgleichung dienen die Kollinearitätsgleichungen (Formel 2.1). Da diese nicht linear sind, erfolgt zunächst eine Linearisierung nach Taylor, für die Näherungswerte bekannt sein müssen. Diese können je nach Aufgabe aus den Planungsdaten, einer vorherigen Kalibrierung etc. bestimmt werden. Die weitere Berechnung erfolgt nach den bekannten Formeln der vermittelnden Ausgleichung. [Luhmann, 2010a, S. 307 f. & S. 327]

Werden für die Bündelausgleichung rein photogrammetrische Aufnahmen verwendet, wird das Normalgleichungssystem singular. Ursache dieses Rangdefekts ist ein Datumsdefekt, der aufgrund fehlender Informationen über die Lage und Orientierung entsteht. Durch 3 Translationen, 3 Rotationen und einer Maßstabsinformation kann dieser Defekt behoben werden. Eine Möglichkeit besteht in der Beobachtung von Passpunkten, aber auch zusätzliche Strecken als Bedingung zwischen zwei Objektpunkten können genutzt werden. Vorhandene Spannungen im Netz können das Ergebnis negativ beeinflussen. Um dies zu umgehen, kann die Datumsfestlegung durch eine freie Netzausgleichung oder nach der 3-2-1-Methode erfolgen. Bei einer Testfeldkalibrierung sollten diese Methoden zur Datumsfestlegung genutzt werden, damit vorhandene Netzspannungen sich nicht auf die berechneten Kameraparameter auswirken [Luhmann, 2010a, S. 319 f. & S. 557].

2.3 Fisheyeobjektive

Fisheyeobjektive stellen einen Sonderfall der Kameraobjektive dar. Die Unterteilung kann nach der Größe des Kreisdurchmessers im Vergleich zum Sensor erfolgen. Zirkuläre Fisheyeobjektive bilden den Bildkreis komplett auf den Sensor ab, sodass dieser nicht komplett gefüllt ist. Diagonale Fisheyeobjektive hingegen bilden den Bildkreis so ab, dass der Sensor komplett abgedeckt wird. Jedoch wird dabei nur in der Bilddiagonalen der volle Öffnungswinkel ausgenutzt. Zusätzlich existieren Konverter-Vorsätze, die vor Normalobjektiven angebracht werden können [Schneider, 2009].

Fisheyeobjektive folgen nicht dem Modell der Zentralperspektive, bei dem Einfalls- und Ausfallswinkel gleich sind. Durch die starke Brechung der Lichtstrahlen unterscheiden sich Einfalls- und Ausfallswinkel stark voneinander. Je nach Aufbau des Objektivs kann der Abbildungsvorgang durch verschiedene Modelle beschrieben werden, wobei jedoch die meisten Objektive der äquidistanten oder der flächentreuen (raumwinkelgleichen) Abbildung folgen [Schneider, 2009].

Durch die starke Brechung der Lichtstrahlen werden bei Fisheyeobjektiven einige Abbildungsfehler verstärkt. Dies betrifft vor allem die radial-symmetrische Verzeichnung, die sich mit zunehmendem Öffnungswinkel verstärkt (tonnenförmige Verzeichnung) [Luhmann, 2010b, S. 94]. Die Differenz des Bildradius zwischen Zentralperspektive und des Modells des Fisheyeobjektivs nimmt zum Bildrand hin größere Werte an. Somit steigt auch die Unsicherheit der radiusabhängigen Verzeichniskorrektur (Formel 2.2) [Luhmann, 2010b, S.96]. [Luhmann, 2010b, S.96] schlägt zur besseren Formulierung eine winkelabhängige Verzeichniskorrektur vor. Hierbei wird statt des Bildradius der Abbildungswinkel (Winkel zwischen optischer Achse und Objektpunkt) verwendet.

Die geometrische Auflösung von Fisheyeobjektiven ist geringer als bei der Verwendung von Normalobjektiven, da mehr Umgebungsdetails auf dieselbe Sensorgröße abgebildet werden. Hinzu kommen die Auswirkungen der chromatischen Aberration, die bei Fisheyeobjektiven verstärkt ist [Schneider, 2009], und somit zusätzlich eine Verringerung der Schärfeleistung nach sich ziehen. Für die Korrektur der chromatischen Aberration bei Fisheyeobjektiven existieren bereits verschiedene Ansätze [Schwalbe & Maas, 2006; van den Heuvel et. al., 2007].

3 PhotoModeler

PhotoModeler (PM) ist ein von der Firma Eos Systems Inc. entwickeltes Bündelausgleichsprogramm zur Erzeugung von 3D-Modellen und Vermessung von Objekten anhand von Fotografien. Verschiedene Tools ermöglichen dem Nutzer Merkmale, wie Punkte oder Linien, in den Bildaufnahmen zu markieren, die PhotoModeler anhand der verschiedenen Aufnahmen photogrammetrisch auswertet und zu einem 3D-Modell verrechnet. Die weitere Verarbeitung kann in einem beliebigen CAD-Programm erfolgen.

PhotoModeler bietet die Möglichkeit zusätzliche Module zu installieren. In der genutzten Version 5.2.3 sind die Module „PhotoModeler Video“ zur Verarbeitung von Videoaufnahmen und „Coded Targets“ zur automatischen Erkennung von codierten Punkten installiert.

Die folgenden Informationen entstammen dem Benutzerhandbuch zur Software: [PM User Manual, 2003].

3.1 Modellierung der optischen Verzeichnungen

PhotoModeler verwendet das in 2.1.3.1 vorgestellte Modell zur Beschreibung der radial-symmetrischen Verzeichnung mit dem einzigen Unterschied, dass dieses durch den Bildradius r dividiert wurde. Somit ergibt sich auch eine Veränderung in den Formeln zur Berechnung der, um die radial-symmetrische Verzeichnung korrigierten, Bildkoordinaten.

$$dr = K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 \quad (3.1)$$

$$dr_x = x \cdot dr \quad dr_y = y \cdot dr \quad (3.2)$$

Für die Beschreibung der tangentialen Verzeichnung verwendet die Software das in Kapitel 2.1.3.2 vorgestellte Modell mit lediglich anderen Bezeichnungen für die Parameter.

$$dp_x = P_1 (r^2 + 2x^2) + 2P_2 xy \quad (3.3)$$

$$dp_y = P_2 (r^2 + 2y^2) + 2P_1 xy \quad (3.4)$$

Die, um beide Verzeichnungen korrigierten, Bildkoordinaten berechnen sich somit nach:

$$x_c = x + dr_x + dp_x \qquad y_c = y + dr_y + dp_y \qquad (3.5)$$

Für die Einheitlichkeit der Arbeit wird in den folgenden Kapiteln die Bezeichnung, wie sie in PhotoModeler verwendet wird, benutzt.

3.2 Vorgehensweise bei der Kalibrierung

Beim Anlegen eines neuen Projekts bietet PhotoModeler verschiedene Projektarten zur Auswahl an. Nachfolgend wird auf die Möglichkeit der Kamerakalibrierung in den relevanten Projektarten eingegangen.

3.2.1 Kalibrierung innerhalb eines „Calibration Project“

Diese Projektart ist ausschließlich für die Kamerakalibrierung vorgesehen. Es werden mindestens sechs Fotos eines Testfeldes aus verschiedenen Winkeln benötigt. PhotoModeler schreibt hierbei ein spezielles Testfeld bestehend aus 100 Punkten, die gitterförmig angeordnet sind, vor. Vier dieser 100 Punkte sind codierte Punkte, welche das Programm eindeutig in jedem Bild zuordnen kann. Dieses Testfeld liegt dem Programm als PDF-Datei bei und kann in beliebiger Größe gedruckt werden. Als Aufnahmekonfiguration werden 8 Aufnahmen von 4 verschiedenen Positionen empfohlen. Pro Standpunkt soll eine Aufnahme in Normalstellung der Kamera und eine Aufnahme, bei der die Kamera um 90° gedreht wird, getätigt werden. Die Drehung der Kamera erfolgt dabei auf den ersten beiden Standpunkten im Uhrzeigersinn, auf den letzten beiden Standpunkten gegen den Uhrzeigersinn. Ziel ist es bei jeder Aufnahme das Testfeld möglichst formatfüllend abzubilden, was bei einer Drehung der Kamera aufgrund des Formats des Bildsensors zu Problemen führen kann. Um eine optimale Abdeckung des Sensors zu gewährleisten wird auf den Positionen 1 und 2 das Testfeld in der Aufnahme an den rechten Rand des Bildes verschoben. Auf den Positionen 3 und 4 wird das Testfeld an den linken Bildrand verschoben. Wichtig ist, dass jede Aufnahme die vier codierten Punkte enthält. Innerhalb eines „Calibration Projects“ können bis zu 12 Aufnahmen ausgewertet werden.

Nach der Aufnahme der Bilder, werden diese in das Projekt geladen und es erscheint der sogenannte „Camera Calibration Dialog“. Beim Ausführen der Kalibrierung durchläuft das Programm automatisch die folgenden Schritte:

1. Automatic Marking
Markierung der Testfeldpunkte und Identifizierung der vier codierten Punkte
2. Focal Length Estimation

- Grobe Ermittlung der Brennweite der Kamera anhand der EXIF-Daten der Aufnahmen
- 3. Orientation
 - Grobe Orientierung der Aufnahmen anhand der codierten Punkte
- 4. Automatic Referencing Stage 1
 - Zuordnung der nicht-codierten Testfeldpunkte in allen Aufnahmen
- 5. Processing Stage 1
 - Erste Ausgleichung der Kameraparameter
- 6. Automatic Referencing Stage 2
 - Zuordnung der übrigen Testfeldpunkte, die im ersten Zuordnungsschritt aufgrund der genäherten Orientierung nicht referenziert werden konnten
- 7. Processing Stage 2
 - Zweite und endgültige Ausgleichung der Kameraparameter
- 8. Deviation and Correlation Check
 - Überprüfung der Standardabweichungen und Korrelationen zwischen den gelösten Parametern

Zusätzlich öffnet sich ein weiteres Fenster, anhand dessen der Nutzer die Schritte während des Kalibriervorgangs betrachten kann. Während der Ausgleichung erscheint der „Total Error Dialog“, welcher für jeden Iterationsschritt die Standardabweichung der Gewichtseinheit $\hat{\sigma}_0$ in einem Balkendiagramm darstellt. Angaben über die letztendlich in der Ausgleichung erreichte Standardabweichung der Gewichtseinheit und die benötigte Anzahl an Iterationen können dem „Project Status Report“ entnommen werden.

Zum Abschluss erfolgt eine Ausgabe der quadratisch gemittelten Residuen über das gesamte Projekt und der bei der Kalibrierung gelösten und nicht gelösten Parameter.

Weitere Ergebnisse der Ausgleichung sind im „Project Status Report“ (3.3.1) sowie der „Photo Table“ und „Point Table“ (3.3.2) zu finden.

Sollte die Kalibrierung aus Sicht des Nutzers nicht zufriedenstellend sein, kann nach Änderung der Einstellungen, dem Weglassen von Kalibrierungsschritten oder der Änderung der Anzahl der zu lösenden Parameter die Kalibrierung erneut berechnet werden.

3.2.2 Kalibrierung innerhalb eines „Automated Coded Targets Project“

Diese Projektart ist für die Auswertung von Einzelbildern oder Mehrbildverbänden vorgesehen. Dabei erfolgen aufgrund der Verwendung von codierten Punkten die Auswertungsschritte automatisiert ab.

Diese Projektart sieht die Verwendung einer bereits kalibrierten Kamera vor. Beim Anlegen des Projekts wird der Nutzer gefragt, in welchem Projekt die Kamera bereits verwendet wurde. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung der CAM-Datei, die aus jedem PM-Projekt exportiert werden kann.

Nach der Angabe des Bildverzeichnisses, werden die einzelnen Schritte abgefragt, die automatisch ausgeführt werden sollen.

1. Automatic Marking Stage 1

In diesem Schritt wird angegeben welche Punktarten in „Stage 1“ markiert werden sollen. Neben den codierten Punkten können auch nicht-codierte Punkte in dieser Projektart markiert werden.

2. Processing Stage 1

Es erfolgt eine erste Ausgleichung unter ausschließlicher Verwendung der codierten Punkte. Bei Verwendung ausschließlich codierter Marken ist dies auch zugleich die einzige Ausgleichung.

3. Automatic Marking Stage 2

Sollen für die automatische Markierung der nicht-codierten Punkte andere Einstellungen verwendet werden, kann ein zweiter Markierungsschritt erfolgen.

4. Automatic Referencing

Zuordnung der nichtcodierten Punkte in allen Bildern anhand der berechneten Orientierung aus „Processing Stage 1“.

5. Processing Stage 2

Erneute Ausgleichung unter Einbeziehung aller markierten und referenzierten Punkte

6. Setting Translate / Scale / Rotate

Ist dieser Punkt aktiviert, erscheint ein Fenster für die Eingabe der Parameter für eine affine Transformation des Koordinatensystems. Ist dieser Punkt deaktiviert verwendet PhotoModeler ein willkürlich gelegtes Koordinatensystem

7. Setting Distance Constraints

Bei Aktivierung dieses Punktes erscheint ein Fenster zur Eingabe von geometrischen Zwängen, z. B. bei der Verwendung von Maßstäben.

Nach dem Anlegen des Projekts erfolgen automatisch die Markierung der Punkte und die Orientierung der Aufnahmen. Über die „Process“-Funktion kann anschließend eine neue Ausgleichung unter Einbeziehung der Parameter der inneren Orientierung gestartet werden.

3.3 Ergebnisbetrachtung

3.3.1 Project Status Report

Nach jeder Kalibrierung wird ein „Project Status Report“ generiert, der die Ergebnisse der letzten Kalibrierung enthält. Er ist in drei Kategorien unterteilt. Im ersten Abschnitt werden Probleme, wie zum Beispiel das Auftreten großer Korrelationen, und Vorschläge zur Behebung dieser angezeigt. Der zweite Abschnitt enthält Informationen der zuletzt durchgeführten Bündelgleichung. Hier werden neben der Anzahl der benötigten Iterationen und der als „Last Error“ bezeichnenden Standardabweichung der Gewichtseinheit $\hat{\sigma}_0$ auch die Werte der gelösten Parameter und ihre Standardabweichungen angegeben. Der letzte Abschnitt gibt eine Aussage über die Qualität der verwendeten Aufnahmen. Es wird angezeigt, wie viele Fotos im Projekt vorhanden sind und welche für die Kalibrierung geeignet waren. Weiterhin werden Minimum und Maximum-Werte für die Residuen der Punktmarkierung und der Präzision der Punkte angegeben.

Der „Project Status Report“ kann als Textdatei aus PhotoModeler exportiert werden. Für die Auswertung wurde eine Funktion in Matlab erstellt, die diese Datei einliest und die Werte für die gelösten Parameter und deren Standardabweichungen sowie weitere relevante Werte für die Qualitätsangabe ausgibt.

3.3.2 Tabellen (Point Table, Photo Table)

Neben dem „Project Status Report“ stellt PhotoModeler Tabellen zur Verfügung, die detailliertere Informationen über die Punkte und Aufnahmen enthalten.

Die „PointTable“ führt alle in den Aufnahmen markierten Punkte unter ihrer jeweiligen Nummer auf. Bei nicht-codierten Marken wird diese fortlaufend vergeben. Des Weiteren enthält sie die in der Ausgleichung berechneten Koordinaten und in welchen Aufnahmen diese Punkte gefunden wurden. Außerdem ist eine Vielzahl von Qualitätsangaben aufgelistet, von denen die wichtigsten nachfolgend kurz erläutert werden.

Precision	Gibt die Präzision (maximale Abweichung der Punktlage zwischen den einzelnen Aufnahmen) der ermittelten Punktkoordinaten aus allen Aufnahmen an und wird getrennt für die X-, Y- und Z-Koordinate aufgeführt
Tightness	Gibt das Maximum der kleinsten Abstände zwischen zwei Strahlenbündeln für einen Objektpunkt aus allen Kombinationen als

	metrisches und prozentuales Maß an
Angle	Gibt analog zu Tightness den maximalen Schnittwinkel in Grad an
RMS Residual	Quadratisches Mittel der Verbesserung der Bildkoordinaten (Residuen) aus allen Aufnahmen
Largest residual	Größtes Residuum, welches für den Punkt in einer Aufnahme erzielt wurde

Die „PhotoTable“ enthält Angaben für die einzelnen Aufnahmen im Projekt. Ähnlich der „PointTable“ werden hier Qualitätsangaben aufgeführt, die sich jedoch nicht auf einzelne Punkte sondern auf die einzelnen Bilder beziehen. Des Weiteren wird die Orientierung der Bilder durch die Winkel ω , ϕ und κ und die Anzahl der markierten und referenzierten Punkte pro Aufnahme angegeben.

Die Daten beider Tabellen können ebenso wie der „Project Status Report“ als Textdatei exportiert werden und stehen somit auch für eine Weiterverarbeitung in anderen Programmen (z. B. Matlab) zur Verfügung. Auch hier wurde eine Matlab-Funktion erstellt, die die relevanten Daten aus beiden Tabellen einliest.

3.3.3 Visualisierung

PhotoModeler stellt einige Visualisierungsmöglichkeiten für die erste schnelle Beurteilung des Ergebnisses bereit. Alle Punkte, für die eine 3D-Position vorliegt, können in einem Viewer angezeigt werden. Zusätzlich ist das Einblenden der Kamerastandpunkte möglich. Hiermit ist eine erste visuelle Beurteilung des Ergebnisses möglich. Da die Testfeldpunkte komplett (ebenes Testfeld) bzw. teilweise (räumliches Testfeld) in einer Ebene angeordnet sind, sollte diese Ansicht dies ebenso widerspiegeln. Des Weiteren sollte die Lage der Kamerastandpunkte zum Testfeld in dieser Darstellung der Lage zum Aufnahmezeitpunkt entsprechen. Eine Abweichung bei den eben genannten Punkten weist auf Fehler in der Kalibrierung hin und kann anhand der Möglichkeiten aus 3.3.1 und 3.3.2 näher überprüft werden. Die bereits erwähnten Residuen lassen sich grafisch für jede Aufnahme mit einer vom Nutzer bestimmten Überhöhung anzeigen.

4 Untersuchungen zur Kamerakalibrierung

Für die Untersuchung der Kalibrierfähigkeit von Fisheyeobjektiven soll die Kalibrierung eines 18mm-Objektivs als Vergleichsgrundlage dienen. Dabei wurden sowohl ein ebenes als auch ein räumliches Testfeld verwendet, welche ebenso für die Fisheyeobjektiv-Kalibrierung genutzt wurden. Im Anschluss folgt ein Vergleich der Kalibrierungen beider Objektive.

4.1 Voruntersuchung mittels 18mm-Objektiv

4.1.1 Ebenes Testfeld

Als Testfeld wurde das durch die Software bereitgestellte ebene Punktfeld verwendet. Die Aufnahmekonfiguration wurde wie von PM vorgeschlagen gewählt. Zusätzlich wurden noch zwei Frontalaufnahmen des Testfeldes getätigt, die jeweils um 90° gekantet sind. Somit standen für die Kalibrierung 10 Aufnahmen zur Verfügung. Abbildung 4-1 zeigt diese Aufnahmekonfiguration.

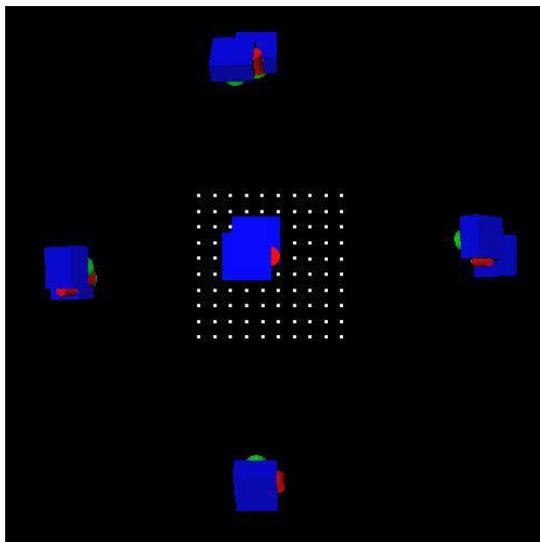


Abbildung 4-1: Aufnahmekonfiguration Kalibrierung 18mm-Objektiv mit ebenem Testfeld

Die Auswertung erfolgte wie von PM vorgesehen innerhalb eines „Calibration Projects“. Hierfür wurden zunächst keine Veränderungen an den vorgegebenen Einstellungen vorgenommen. Alle Schritte, wie sie unter 3.2.1 beschrieben werden, wurden ausgeführt.

Laut „Camera Calibration Dialog“ wurden alle 100 Punkte inklusive der 4 codierten Punkte erkannt. Im ersten Referenzierungsschritt konnten 94 Punkte zugeordnet werden. Die nachfolgende erste Ausgleichung erfolgte unter Einbeziehung der Parameter für die Kamerakonstan-

te, dem Bildhauptpunkt, der Sensorhöhe und einem Parameter für das radial-symmetrische Verzeichnungsmodell. Im nachfolgenden zweiten Referenzierungsschritt wurde für 100 Punkte eine ausreichende Anzahl an Zuordnungen in den Aufnahmen erreicht. Die zweite Kalibrierung erfolgte unter der zusätzlichen Einbeziehung der Parameter für die radial-asymmetrische / tangentielle Verzerrung und dem zweiten Parameter für die radial-symmetrische Verzerrung. Der erscheinende „Total Error Dialog“ zeigte eine Reduzierung der Standardabweichung der Gewichtseinheit mit jedem Iterationsschritt. Der anschließende Schritt zur Überprüfung der Standardabweichungen und Korrelationen fand keine ungewöhnlich hohen Werte, sodass keine Parameter automatisch durch die Software entfernt werden mussten. Die Parameter F_h und K_3 wurden nicht gelöst, da in den Standardeinstellungen von PhotoModeler dies zunächst auch nicht vorgesehen ist. Die Ergebnisse der Kalibrierung sind in Tabelle 4-1 aufgelistet. Es ist zu beachten, dass der Wert für die Formathöhe F_h von PhotoModeler aus den EXIF-Daten der Aufnahmen entnommen wird und nicht aus der Ausgleichung stammt.

Tabelle 4-1: Parameter der inneren Orientierung des 18mm-Objektivs (ebenes Testfeld, erste Kalibrierung)

			Standardabweichung	
Focal Length	18,518	mm	0,003	mm
Xp - principal point x	11,508	mm	0,003	mm
Yp - principal point y	7,770	mm	0,004	mm
Fw - format width	22,6798	mm	6,30E-04	mm
Fh - format height	15,113	mm	-	
K1 - radial distortion 1	5,60E-04		1,70E-06	
K2 - radial distortion 2	-9,65E-07		1,40E-08	
K3 - radial distortion 3	0,00E+00		-	
P1 - decentering distortion 1	3,12E-06		2,00E-06	
P2 - decentering distortion 2	7,10E-05		2,30E-06	

Die visuelle Kontrolle über die Ansicht des Testfeldes im 3D-Viewer zeigte keine erkennbare Abweichung der Punkte aus der Ebene. Eine deutliche Abweichung der Kamerastandpunkte zur gewählten Aufnahmekonfiguration ist nicht zu erkennen. Grobe Fehler bei der Kalibrierung können somit ausgeschlossen werden.

Bei Betrachtung der „Photo Table“ ist zu sehen, dass wie bereits erwähnt 100 Punkte markiert wurden, jedoch konnten in 4 Aufnahmen nicht alle Punkte zugeordnet werden. Dies betrifft lediglich 6 markierte Punkte und sollte somit keinen großen Einfluss auf das Ergebnis haben. Diese Punkte wurden nachträglich noch zugeordnet und die Ausgleichung erneut gestartet. Es zeigten sich wie erwartet nur minimale Veränderungen in den Ergebnissen (Tabelle 4-2). Auch in den nachfolgend besprochenen Werten konnten nur geringfügige Änderungen festgestellt werden.

Tabelle 4-2: Parameter der inneren Orientierung des 18mm-Objektivs (ebenes Testfeld, alle Punkte referenziert)

			Standardabweichung	
Focal Length	18,518	mm	0,003	mm
Xp - principal point x	11,508	mm	0,003	mm
Yp - principal point y	7,775	mm	0,004	mm
Fw - format width	22,6805	mm	6,50E-04	mm
Fh - format height	15,113	mm	-	
K1 - radial distortion 1	5,64E-04		1,70E-06	
K2 - radial distortion 2	-1,01E-06		1,30E-08	
K3 - radial distortion 3	0,00E+00		-	
P1 - decentering distortion 1	3,14E-06		2,10E-06	
P2 - decentering distortion 2	7,31E-05		2,40E-06	

Die Residuen der Punkte lassen sich wie bereits erwähnt für alle Aufnahmen in PM visualisieren. Abbildung 4-2 zeigt beispielhaft die Residuen der ersten Aufnahme. Alle weiteren Aufnahmen unterscheiden sich nur geringfügig von dieser Abbildung und können dem Anhang 1 entnommen werden. Die Residuen zeigen keine Systematik in der Richtung.

Das quadratische Mittel der Residuen lag in diesem Projekt bei 0,198 Pixeln, wobei die quadratischen Mittel der Residuen eines Einzelpunktes über alle Aufnahmen Werte zwischen 0,097 Pixel und 0,552 Pixel annahmen.

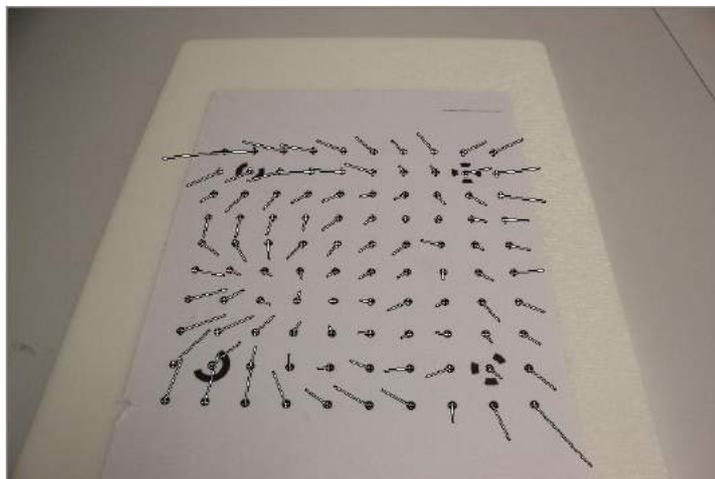


Abbildung 4-2: Darstellung der Residuen der ersten Aufnahme mit 1000-facher Überhöhung (18mm-Objektiv, ebenes Testfeld)

PhotoModeler sieht die generelle Ausgabe der Korrelationen nicht vor, sondern nur falls der Wert eine gewisse Grenze (Standard 90%) überschritten hat. Um dies zu umgehen wurde dieser Schwellwert auf null gesetzt, sodass alle Korrelationen ungleich null im „Project Status Report“ angezeigt werden. Die Korrelationen werden unter dem jeweiligen Parameter fortlaufend aufgelistet, sodass diese innerhalb der Einlesefunktion in Matlab in eine übersichtlichere

Darstellung überführt werden mussten. Tabelle 4-3 zeigt die Korrelationsmatrix der Ausglei-
chung mit allen referenzierten Punkten.

Tabelle 4-3: Korrelationsmatrix der Parameter der inneren Orientierung des 18mm-Objektivs in
Prozent (ebenes Testfeld)

	Focal	Xp	Yp	Fw	Fh	K1	K2	K3	P1	P2
Focal	100	3,2	-18,3	36,4	-	-63,1	12,3	-	-4,6	7,0
Xp	3,2	100	2,8	5,0	-	-3,1	0,0	-	-88,4	1,6
Yp	-18,3	2,8	100	19,7	-	-1	-0,2	-	-1,3	85,0
Fw	36,4	5,0	19,7	100	-	-32	2,0	-	3,1	10,2
Fh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K1	-63,1	-3,1	-1,0	-32,0	-	100	-77,1	-	5,0	-11,2
K2	12,3	0,0	-0,2	2,0	-	-77,1	100	-	-1,9	-3,1
K3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P1	-4,6	-88,4	-1,3	3,1	-	5,0	-1,9	-	100	-2,3
P2	7,0	1,6	85,0	10,2	-	-11,2	-3,1	-	-2,3	100

Höhere Korrelationen treten zwischen den Parametern zur Beschreibung der radial-
asymmetrischen / tangentialen Verzeichnung (P_1 , P_2) und den Koordinaten des Bildhauptpunk-
tes (X_p , Y_p) sowie zwischen den Parametern der radial-symmetrischen Verzeichnung (K_1 , K_2)
auf. Dies ist jedoch nicht ungewöhnlich und tritt bei Kalibrierungen anhand einer Bündelaus-
gleichung häufig auf [Luhmann, 2010a, S. 563]. Die Korrelationen zwischen den Parametern
der inneren Orientierung und der, in der Ausgleichung ebenso berechneten, äußeren Orientie-
rung ist nicht möglich, da PhotoModeler hierzu keine Informationen bereitstellt.

Zur Untersuchung welche Auswirkung die Hinzunahme des Parameter K_3 auf das Ergebnis hat,
wurde die Kalibrierung erneut unter Einbeziehung dieses Parameters durchgeführt. Bei Aus-
führung des Schrittes „Deviation and Correlation Check“ wurde eine hohe Korrelation des Pa-
rameters K_3 mit K_2 ermittelt, sodass K_3 automatisch aus der Ausgleichung entfernt wurde. Wird
dieser letzte Schritt deaktiviert, werden die in Tabelle 4-4 aufgelisteten Korrelationen erreicht.
Es ist zu sehen, dass nicht nur die Korrelation zwischen K_3 und K_2 mit 97,8 % sehr hoch ist, son-
dern auch die Korrelation zwischen den ersten beiden Parametern der radial-symmetrischen
Verzeichnung zunimmt.

Tabelle 4-4: Korrelationsmatrix der Parameter der inneren Orientierung des 18mm-Objektivs
unter Einbeziehung von K_3 in Prozent (ebenes Testfeld)

	Focal	Xp	Yp	Fw	Fh	K1	K2	K3	P1	P2
Focal	100	3,0	-17,8	36,7	-	-24,4	-14,7	17,7	-4,4	7,1
Xp	3,0	100	2,8	5,1	-	-2,6	0,8	-0,8	-88,4	1,4
Yp	-17,8	2,8	100	19,6	-	-0,5	-0,2	0,1	-1,4	85,0
Fw	36,7	5,1	19,6	100	-	-16,2	-3,9	4,5	3,0	10,2
Fh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

K1	-24,4	-2,6	-0,5	-16,2	-	100	-87,0	78,7	3,8	-6,6
K2	-14,7	0,8	-0,2	-3,9	-	-87,0	100	-97,8	-1,2	-1,0
K3	17,7	-0,8	0,1	4,5	-	78,7	-97,8	100	0,8	0,4
P1	-4,4	-88,4	-1,4	3,0	-	3,8	-1,2	0,8	100	-2,1
P2	7,1	1,4	85,0	10,2	-	-6,6	-1,0	0,4	-2,1	100

4.1.2 Räumliches Testfeld

Als nächstes wurde das 18mm-Objektiv mit Hilfe eines räumlichen Testfeldes kalibriert, welches aus 77 codierten Punkten besteht, von denen vier erhöht liegen. Für die Kalibrierung standen 12 Aufnahmen von 4 Standpunkten zur Verfügung. Auf jedem Standpunkt wurde jeweils eine Aufnahme in Normalstellung, eine Aufnahme gekantet um 90° im Uhrzeigersinn und eine Aufnahme gekantet um 90° gegen den Uhrzeigersinn getätigt.

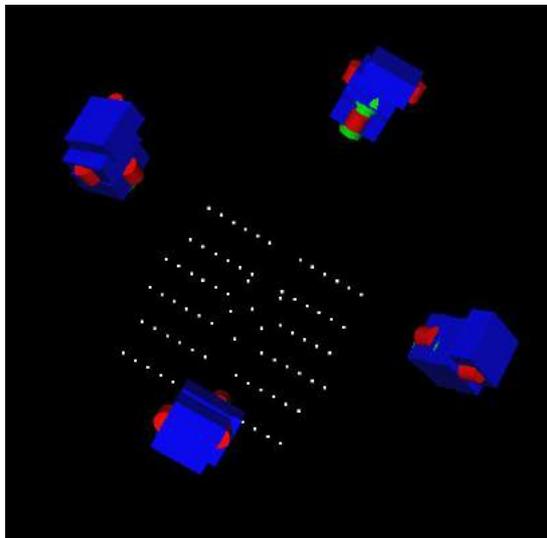


Abbildung 4-3: Aufnahmekonfiguration Kalibrierung 18mm-Objektiv mit räumlichen Testfeld

Die Kalibrierung erfolgte innerhalb eines „Automated Coded Targets Project“. Da diese Projektart eine bereits kalibrierte Kamera voraussetzt, wurde die Kalibrierung aus 4.1.1 verwendet. Wie bereits erwähnt, werden die Schritte zur Markierung in dieser Projektart automatisch nach dem Start des Projekts durchgeführt, gefolgt von einer Ausgleichung zur Orientierung der Aufnahmen.

Das Ergebnis der Markierung lieferte noch kein zufriedenstellendes Ergebnis, da viele Punkte vom Programm als unreferenziert markiert wurden. Der Grund hierfür liegt in der Ausführung des „Reference Checkers“ nach jeder Ausgleichung. Dabei überprüft die Software die Residuen der Punkte und markiert Punkte mit zu großen Verbesserungen als unreferenziert, sodass diese bei späteren Ausgleichungen nicht berücksichtigt werden. Als Vergleich dient dabei ein in

den Projektinformationen angegebener Wert, welcher standardmäßig auf 1 Pixel gesetzt ist und erst nach dieser ersten Ausgleichung geändert werden kann. Die gefundenen hohen Residuen resultieren hier aus der Verwendung der Kalibrierung aus 4.1.1, die anscheinend nicht ausreichend für die Modellierung des räumlichen Testfeldes ist. Der „Reference Checker“ wurde deaktiviert und eine erneute Markierung über „Automatic Target Marking“ durchgeführt, wobei alle sichtbaren Punkte markiert werden konnten. Da es aufgrund des Aufbaus des Testfeldes zu Überdeckungen kommt, können nicht in jeder Aufnahme alle 77 Punkte markiert werden.

Die erste Kalibrierung wurde unter Einbeziehung aller Parameter durchgeführt. Auch hier zeigten sich wie unter 4.1.1 hohe Korrelationen zwischen K_3 und K_2 , sodass eine erneute Kalibrierung ohne den letzten Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung ausgeführt werden musste. Die Ergebnisse dieser Kalibrierung können der Tabelle 4-5 entnommen werden.

Beim Vergleich dieser Kalibrierung mit den Ergebnissen aus Tabelle 4-2 lässt sich eine Veränderung in den Kameraparametern erkennen, wobei die Standardabweichungen niedriger sind. Die Bestimmung der Kamerakonstante und der Koordinaten des Bildhauptpunkts sind um 0,001 mm bis 0,002 mm besser als bei Verwendung des ebenen Testfeldes. Die Verzeichnungen weisen ebenso eine bessere Standardabweichung auf, wobei die Parameter der radial-asymmetrischen / tangentialen Verzeichnung eine deutliche Steigerung von bis zu $1,0 \cdot 10^{-6}$ erfahren. Beim Vergleich der Werte fällt jedoch auf, dass diese Parameter sich deutlich von der Kalibrierung mit dem ebenen Testfeld unterscheiden, wohingegen die restlichen Parameter sich nur leicht ändern.

Tabelle 4-5: Parameter der inneren Orientierung des 18mm-Objektivs (räumliches Testfeld)

		Standardabweichung
Focal Length	18,753 mm	0,001 mm
Xp - principal point x	11,596 mm	0,002 mm
Yp - principal point y	7,859 mm	0,002 mm
Fw - format width	22,6768 mm	3,30E-04 mm
Fh - format height	15,113 mm	-
K1 - radial distortion 1	5,33E-04	1,20E-06
K2 - radial distortion 2	-1,21E-06	1,10E-08
K3 - radial distortion 3	0,00E+00	-
P1 - decentering distortion 1	-7,45E-06	1,30E-06
P2 - decentering distortion 2	1,23E-04	1,40E-06

Tabelle 4-6: Korrelationsmatrix der Parameter der inneren Orientierung des 18mm-Objektivs in Prozent (räumliches Testfeld)

	Focal	Xp	Yp	Fw	Fh	K1	K2	K3	P1	P2
Focal	100	1,0	-20,2	22,3	-	-8,9	-29,6	-	-17,6	-3,2
Xp	1,0	100	0,1	4,0	-	-8,1	7,1	-	-79,0	0,3
Yp	-20,2	0,1	100	4,4	-	9,1	-6,4	-	0,8	86,7
Fw	22,3	4,0	4,4	100	-	-26,1	1,6	-	-3,2	9,8
Fh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K1	-8,9	-8,1	9,1	-26,1	-	100	-81,5	-	11,3	-1,9
K2	-29,6	7,1	-6,4	1,6	-	-81,5	100	-	6,2	-6,5
K3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P1	-17,6	-79,0	0,8	-3,2	-	11,3	6,2	-	100	-4,8
P2	-3,2	0,3	86,7	9,8	-	-1,9	-6,5	-	-4,8	100

Die Korrelationsmatrix (Tabelle 4-6) zeigt wie zuvor hohe Korrelationen zwischen den Parametern zur Beschreibung der radial-asymmetrischen / tangentialen Verzeichnung (P_1 , P_2) und den Koordinaten des Bildhauptpunktes (X_p , Y_p) sowie zwischen den Parametern der radial-symmetrischen Verzeichnung (K_1 , K_2). Eine generelle Minimierung der Korrelationen durch die Verwendung eines räumlichen Testfeldes wie durch [Luhmann, 2010a, S. 563] beschrieben konnte nicht festgestellt werden. Nur zwischen der Kamerakonstanten („Focal Length“) und K_1 sowie zwischen der Y-Koordinate des Hauptpunktes und der Formatbreite konnte eine Verbesserung von 54 % und 15 % festgestellt werden. Die restlichen Werte weisen Differenzen von weniger als 10 % auf.

Das quadratische Mittel aller Residuen beträgt 0,104 Pixel, wobei die quadratischen Mittel der Residuen eines Einzelpunktes über allen Aufnahmen zwischen 0,038 Pixel und 0,221 Pixel liegen. Abbildung 4-4 zeigt beispielhaft die Residuen der ersten Aufnahme. Die Darstellung der Residuen der restlichen Aufnahmen ist in Anhang 2 zu finden.

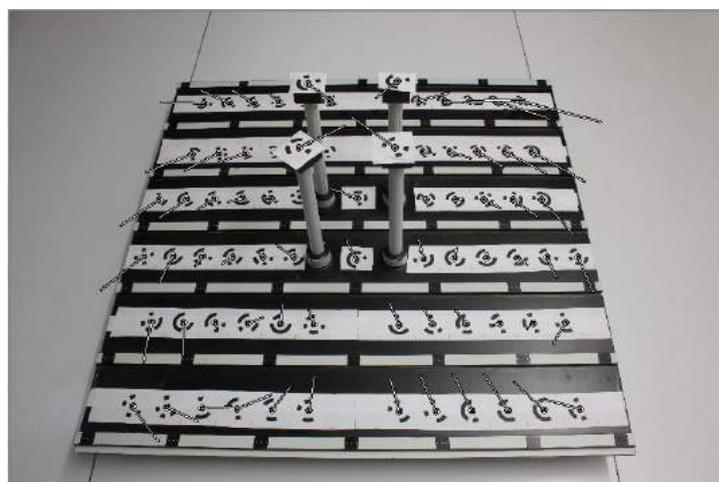


Abbildung 4-4: Darstellung der Residuen der ersten Aufnahme mit 1000-facher Überhöhung (18mm-Objektiv, räumliches Testfeld)

4.2 Untersuchungen zum Fisheyeobjektiv

4.2.1 Ebenes Testfeld

Die Aufnahmekonfiguration entspricht der unter 4.1.1 beschriebenen Anordnung mit dem Unterschied, dass auf die beiden Frontalaufnahmen verzichtet wurde. Als Testfeld wurde auch hier das bereitgestellte Punktfeld verwendet. Die Auswertung erfolgte erneut in einem „Calibration Project“.

Die Kalibrierung schlug zunächst fehl, da in keiner Aufnahme eine ausreichende Anzahl an codierten Punkten erkannt werden konnten, sodass mit Hilfe der Funktion „Automatic Target Marking“ zunächst alle codierten Punkte markiert werden mussten. Dabei wurden die Standardeinstellungen leicht abgeändert. Da die im Bild dargestellten Punkte stark als Ellipsen erscheinen, wurde der „Target Shape“, der die Kreisförmigkeit der Punkte angibt, von 0,7 auf 0,5 herabgesetzt. Das Programm erkannte nun bis auf zwei Ausnahmen die codierten Punkte. Diese zwei Punkte konnten jedoch manuell mit dem „Sub-pixel Target Mode“ markiert und anschließend referenziert werden. Für die verbleibenden Punkte wurde erneut die automatische Markierung verwendet. Coderingsegmente werden hier teilweise als Punkte identifiziert. Durch den großen Öffnungswinkel von Fisheyeobjektiven wird zudem mehr Umgebung abgebildet, sodass auf fälschlicherweise markierte Punkte außerhalb des Testfeldes geachtet werden muss. Nach dem Löschen dieser Punkte wurde ein erneuter Kalibrierversuch gestartet.

Durch die Verwendung eines Fisheye-Konverters ist in den EXIF-Daten der Bilder die Brennweite des 18mm-Objektivs gespeichert. PM erkennt, dass dies nicht korrekt ist und schlägt vor statt der fehlerhaften Daten eine bestmögliche Schätzung zu verwenden. Beide Möglichkeiten führten jedoch nicht zum Erfolg. Die Eingabe von Näherungswerten vor der Kalibrierung blieb ebenso erfolglos.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung der „Process“-Funktion statt der „Camera Calibrator“-Funktion zur Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung der Kamera. Hierfür sind jedoch weitere referenzierte Punkte für die Orientierung der Aufnahmen notwendig. Die Zuordnung erfolgte manuell zunächst nur für die äußeren Punkte des Testfeldes. Die anschließende Orientierung und Kalibrierung zeigte bereits gute Ergebnisse, sodass die übrigen Punkte automatisch zugeordnet werden konnten. Für diese erste Kalibrierung wurden folgende Näherungswerte verwendet:

Focal Length	12 mm
Fw - format width	24 mm
Fh - format height	15,113 mm

Xp - principal point x	12 mm
Yp - principal point y	7 mm

Die Formathöhe wurde mit 15,113 mm gewählt, da diese wie bei der Kalibrierung des 18mm-Objektivs nicht in die Ausgleichung eingeht und durch die Verwendung derselben Kamera wie unter 4.1 keine Änderung erfährt. Die Wahl einer anderen Formathöhe würde sich auf die Bestimmung der weiteren Parameter auswirken.

Die anschließende zweite Kalibrierung unter Einbeziehung aller Testfeldpunkte ergab die in Tabelle 4-7 gezeigten Ergebnisse.

Tabelle 4-7: Parameter der inneren Orientierung des Fisheyeobjektives (ebenes Testfeld)

		Standardabweichung
Focal Length	9,248 mm	0,002 mm
Xp - principal point x	11,503 mm	0,003 mm
Yp - principal point y	7,832 mm	0,004 mm
Fw - format width	22,678 mm	0,002 mm
Fh - format height	15,113 mm	-
K1 - radial distortion 1	4,07E-03	2,20E-05
K2 - radial distortion 2	2,41E-05	1,30E-06
K3 - radial distortion 3	0,00E+00	-
P1 - decentering distortion 1	1,29E-04	4,30E-06
P2 - decentering distortion 2	1,82E-04	6,00E-06

Die visuelle Betrachtung des Punktfeldes zeigt augenscheinlich keine Abweichungen aus der Ebene. Die angezeigten Kamerastandpunkte spiegeln die Aufnahmesituation wieder. Somit können grobe Fehler bei der Kalibrierung, z. B. durch falsch zugeordnete Punkte, ausgeschlossen werden.

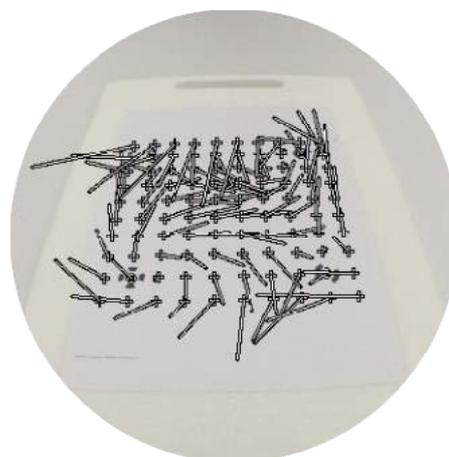


Abbildung 4-5: Darstellung der Residuen der ersten Aufnahme mit 1000-facher Überhöhung (Fisheyeobjektiv, ebenes Testfeld)

Das quadratische Mittel der Residuen lag bei 0,168 Pixeln, wobei die quadratischen Mittel der Residuen eines Einzelpunktes über alle Aufnahmen zwischen 0,046 Pixel und 0,427 Pixel liegen. Abbildung 4-5 zeigt beispielhaft die Residuen der ersten Aufnahme (weitere: Anlage 3)

Die Korrelationen zwischen den bestimmten Parametern wurden auch hier ausgelesen und sind in Tabelle 4-8 dargestellt. Eine erhöhte Korrelation ist zwischen den Parametern der radial-symmetrischen Verzeichnung zu sehen, die wie bereits erwähnt nicht unüblich für eine Kalibrierung unter Verwendung einer Bündelausgleichung ist. Die restlichen Korrelationen übersteigen einen Wert von 50 % nicht.

Tabelle 4-8: Korrelationsmatrix der Parameter der inneren Orientierung des Fisheyeobjektives in Prozent (ebenes Testfeld)

	Focal	Xp	Yp	Fw	Fh	K1	K2	K3	P1	P2
Focal	100	0,7	-37,2	0,9	-	9,6	-35,6	-	-3,5	37,6
Xp	0,7	100	16,8	37,6	-	-12,8	5,3	-	-2,9	-12,7
Yp	-37,2	16,8	100	42,9	-	-11,6	4,5	-	-3,7	-10,3
Fw	0,9	37,6	42,9	100	-	-43,8	14,2	-	-4,6	-23,1
Fh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K1	9,6	-12,8	-11,6	-43,8	-	100	-81,6	-	9,8	-1,4
K2	-35,6	5,3	4,5	14,2	-	-81,6	100	-	-2,5	-19,6
K3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P1	-3,5	-2,9	-3,7	-4,6	-	9,8	-2,5	-	100	-5,4
P2	37,6	-12,7	-10,3	-23,1	-	-1,4	-19,6	-	-5,4	100

Da Fisheyeobjektive stärker verzeichnen, wurde die Ausgleichung unter Einbeziehung des Parameters K_3 erneut durchgeführt, um eine bessere Modellierung der radial-symmetrischen Verzeichnung zu erzielen [Luhmann, 2010a, S. 151]. Es zeigten sich starke Korrelationen zwischen K_3 und K_2 von 98 % und eine Standardabweichung von K_2 , die den Wert des Parameters übersteigt, sodass auf den dritten Parameter zur Beschreibung der radial-symmetrischen Verzeichnung verzichtet wurde.

4.2.2 Räumliches Testfeld

Für das räumliche Testfeld wurde eine Aufnahmekonfiguration wie unter 4.2.1 beschrieben verwendet. Die Auswertung erfolgte innerhalb eines „Automated Coded Targets Project“. Da PM bereits eine kalibrierte Kamera vorsieht, wurde die Kalibrierung aus 4.2.2 (Tabelle 4-7) verwendet, die durch Angabe des Dateipfades des Projekts geladen wurde. Da bereits bei der Kalibrierung mittels ebenen Testfelds festgestellt wurde, dass die Testfeldpunkte zu Ellipsen verzerrt werden, wurde bereits beim Anlegen des Projekts der „Circle Shape“ für die Punktmarkierung auf 0,5 gesetzt. Die anschließende automatische Markierung fand eine stark unterschiedliche Anzahl an Punkten zwischen den Aufnahmen. Der nachgeschaltete „Reference

Checker“ entfernte jedoch wie unter 4.1.2 einige Zuordnungen wieder. Bei Betrachtung der Ergebnisse fiel auf, dass Probleme bei der Markierung der weiter entfernten Punkte auftraten. Besonders in Aufnahme 8 konnte nur ungefähr die Hälfte der sichtbaren Punkte erkannt werden (Abbildung 4-6).

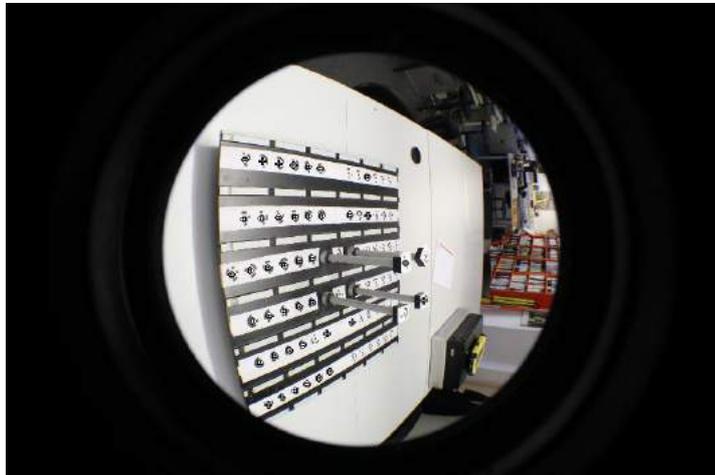


Abbildung 4-6: Ergebnis der automatischen Markierung nach Projektstart (Aufnahme 8)

Nach Deaktivierung des „Reference Checker“ wurde eine erste Kalibrierung vorgenommen, die mit einer Standardabweichung der Gewichtseinheit von 1,584 und einem Gesamtresiduum von 0,162 Pixeln ein gutes Ergebnis lieferte. Die gelösten Parameter sind in Tabelle 4-9 aufgeführt.

Tabelle 4-9: Parameter der inneren Orientierung des Fisheyeobjektives (räumliches Testfeld, erste Kalibrierung)

			Standardabweichung
Focal Length	9,242	mm	0,003 mm
Xp - principal point x	11,513	mm	0,005 mm
Yp - principal point y	7,794	mm	0,005 mm
Fw - format width	22,660	mm	0,002 mm
Fh - format height	15,113	mm	-
K1 - radial distortion 1	4,26E-03		3,00E-05
K2 - radial distortion 2	3,53E-05		8,70E-07
K3 - radial distortion 3	0,00E+00		-
P1 - decentering distortion 1	1,99E-04		7,30E-06
P2 - decentering distortion 2	2,48E-04		1,10E-05

Die unreferenzierten Punkte wurden entfernt und eine Markierung mittels „Automatic Target Marking“ gestartet. Hierbei wurde wieder ein „Circle Shape“ von 0,5 gewählt. Es konnten wieder weiter entfernte Punkte nicht markiert werden. Eine weitere Verringerung des „Circle Shape“ und eine Erhöhung des „Fit Errors“, der die Güte der Markierung angibt, führten zu keiner Verbesserung der Markierung. Besonders in Aufnahme 8 blieb eine große Anzahl an Punkten

unmarkiert. Ein Grund könnte in der Verzerrung der Coderinge liegen. Da durch die verwendeten Einstellungen nur nach codierten Punkten gesucht wurde, markiert die Software Punkte nicht, falls der Codering nicht erkannt werden kann. Es erfolgte eine erneute Markierung, bei der nur nach nicht-codierten Punkten gesucht wurde. Durch den verringerten „Circle Shape“ besteht jedoch das Problem, dass Coderingsegmente als Punkte erkannt werden. Um diese Anzahl zu Verringern wurde der Wert für die Kreisförmigkeit wieder auf 0,7 erhöht. Die so entstandenen falschen Markierungen müssen vor einer erneuten Ausgleichung in allen Aufnahmen manuell gelöscht. Dies gilt ebenso für Punkte, die außerhalb des Testfeldes gefunden wurden. Durch weitere Veränderungen in den Einstellungen (Erhöhung des „Fit Errors“, Eingrenzung des Suchbereichs, Variation der maximalen und minimalen Punktgröße) konnten fast alle Punkte markiert werden. In den insgesamt 8 Aufnahmen blieben nur 4 Punkte unmarkiert. Eine Referenzierung erfolgte zunächst noch nicht, sodass eine erneute Ausgleichung nur unter Einbeziehung der als codiert erkannten Punkte erfolgte. Der „Total Error Dialog“ zeigte dabei eine hohe Standardabweichung der Gewichtseinheit von 114,17. Folglich konnten grobe Fehler bei der Markierung, z. B. durch Punktverwechslungen, nicht ausgeschlossen werden. Bei Betrachtung der Spalte „Largest Residual“ in der „Point Table“ zeigten sich besonders in Aufnahme 8 große Residuen von bis zu 185 Pixeln. Beim Vergleich der Markierung dieser Punkte zwischen den Aufnahmen, wurde festgestellt, dass die Zuordnung aufgrund der fehlerhaften Erkennung des Coderings falsch ist. Diese falsch markierten Punkte wurden anschließend manuell richtig zugeordnet. Ebenso wurde mit den bereits markierten, jedoch noch unreferenzierten Punkten verfahren, sodass fast alle sichtbaren Punkte für die folgende Kalibrierung genutzt werden konnten.

Diese Ausgleichung ergab eine Standardabweichung der Gewichtseinheit von 2,428 und ein Gesamtresiduum von 0,270 Pixeln, wobei die Gesamtresiduen für einen einzelnen Punkt zwischen 0,107 Pixeln und 0,549 Pixeln lagen. Abbildung 4-7 zeigt die Residuen der ersten Aufnahme. Im Vergleich zur Kalibrierung mittels ebenem Testfeld zeigt sich somit eine ungefähre Erhöhung der Residuen um den Faktor 2. Die größten Verbesserungen weisen die höher gelegenen Punkte des Testfeldes auf. Grund hierfür ist die starke Verzerrung zu Ellipsen, die je nach Aufnahmeorientierung zu einer unterschiedlichen Markierung in den Aufnahmen führt. Dies trifft ebenso auf die Testfeldpunkte, die sich im hinteren Bereich der Aufnahme befinden zu. Die schlechte Markierung der Punkte führt zu höheren Standardabweichungen der gelösten Parameter. Tabelle 4-10 führt die Parameter der inneren Orientierung auf, Tabelle 4-11 die zugehörige Korrelationsmatrix. Die Korrelationen übersteigen mit Ausnahme zwischen K_1 und K_2 einen Wert von 50 % nicht. Eine Einbeziehung des Parameters K_3 in die Ausgleichung führte

erneut zu großen Korrelationen zwischen den Parametern der radial-symmetrischen Verzeichnung (bis zu 97,7 %).

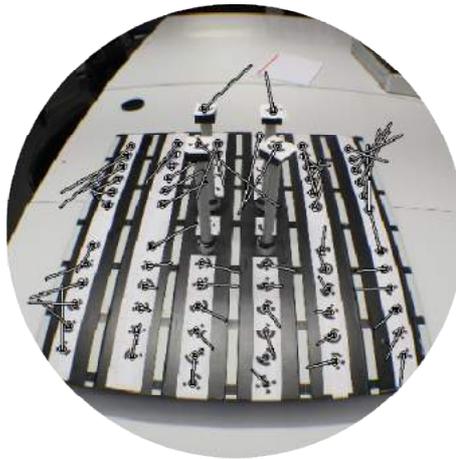


Abbildung 4-7: Darstellung der Residuen der ersten Aufnahme mit 500-facher Überhöhung (Fisheyeobjektiv, räumliches Testfeld)

Tabelle 4-10: Parameter der inneren Orientierung des Fisheyeobjektives (räumliches Testfeld, letzte Kalibrierung)

		Standardabweichung
Focal Length	9,229 mm	0,003 mm
Xp - principal point x	11,488 mm	0,006 mm
Yp - principal point y	7,807 mm	0,005 mm
Fw - format width	22,655 mm	0,002 mm
Fh - format height	15,113 mm	-
K1 - radial distortion 1	4,23E-03	2,50E-05
K2 - radial distortion 2	4,04E-05	6,80E-07
K3 - radial distortion 3	0,00E+00	-
P1 - decentering distortion 1	2,20E-04	8,60E-06
P2 - decentering distortion 2	2,72E-04	9,90E-06

Tabelle 4-11: Korrelationsmatrix der Parameter der inneren Orientierung des Fisheyeobjektives in Prozent (räumliches Testfeld, letzte Kalibrierung)

	Focal	Xp	Yp	Fw	Fh	K1	K2	K3	P1	P2
Focal	100	47,5	-45,9	29,4	-	16,8	-42,4	-	36,7	2,7
Xp	47,5	100	-46,2	11,4	-	-5,7	-11,3	-	40,8	13,6
Yp	-45,9	-46,2	100	-9,7	-	6,8	5,6	-	-12,8	-35,0
Fw	29,4	11,4	-9,7	100	-	-17,4	-6,5	-	8,3	-33,0
Fh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K1	16,8	-5,7	6,8	-17,4	-	100	-82,6	-	8,0	1,3
K2	-42,4	-11,3	5,6	-6,5	-	-82,6	100	-	-14,7	27,6
K3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P1	36,7	40,8	-12,8	8,3	-	8,0	-14,7	-	100	2,6
P2	2,7	13,6	-35,0	-33,0	-	1,3	27,6	-	2,6	100

Für dieses Projekt wurden die Ergebnisse aus der vorherigen Kalibrierung mittels ebenem Testfeld genutzt. Ist eine solche Kalibrierung nicht möglich, kann durch Eingabe von Näherungswerten wie unter 4.2.1 eine Kalibrierung ermöglicht werden. Die somit erzielten Ergebnisse weichen nicht nennenswert von den eben beschriebenen ab.

4.3 Vergleich zwischen 18mm- und Fisheyeobjektiv

4.3.1 Ebenes Testfeld

Bei der Durchführung der Kalibrierung des 18mm-Objektivs traten wie bereits erwähnt keine Probleme auf. Die Kalibrierung des Fisheyeobjektives erwies sich als schwerer, da die „Camera Calibrator“-Funktion in PhotoModeler keine Ergebnisse liefern konnte und auf die „Process“-Funktion ausgewichen werden musste. Die schlechte Erkennung der Punkte ist zum einen auf die Verzerrung der Punktkreise zu Ellipsen zurückzuführen, zum anderen weisen Fisheyeobjektive eine starke chromatische Aberration auf, die die Schärfelistung mindert und zu Farbsäumen führt. Abbildung 4-5 zeigt eine vergrößerte Aufnahme des Testfeldes mit dem unter 4.1 und dem unter 4.2 verwendeten Objektiv. Durch die Verwendung eines Fisheye-Konverters wird die Abbildungsleistung zusätzlich vermindert. Da solche Konverterlinsen vor einem Normalobjektiv oder, wie in diesem Fall, einem Weitwinkelobjektiv angebracht werden, kommt es zudem zu Abschattungen, sodass das Punktfeld auf einen noch geringen Bereich des Sensors abgebildet wird.

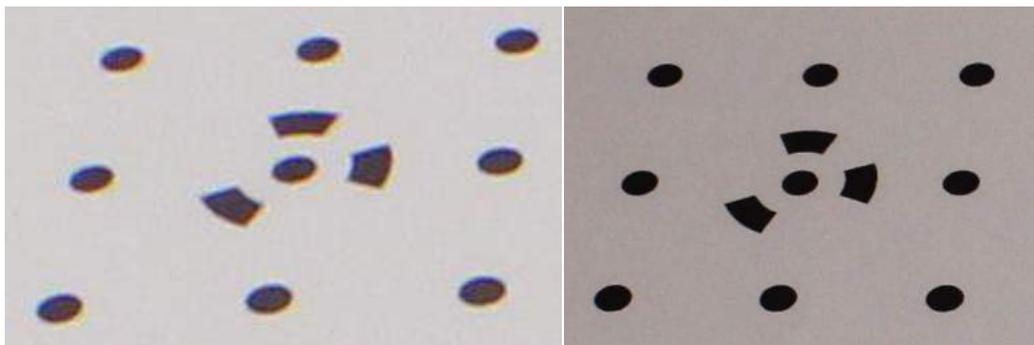


Abbildung 4-8: Ausschnitt einer Aufnahme des ebenen Testfeldes mit Fisheyeobjektiv (links) und 18mm-Objektiv (rechts) bei gleicher Orientierung der Kamera

Die berechneten Werte für die gelösten Parameter und deren Standardabweichung sowie weitere Werte, die für den nachfolgenden Vergleich verwendet werden, sind für beide Objektive in Tabelle 4-12 zusammengefasst. Abbildung 4-9 zeigt zusätzlich die Verzeichnungskurve nach Formel (3.1).

Tabelle 4-12: Ergebnisse der Kalibrierung des 18mm- und des Fisheyeobjektives (ebenes Testfeld)

	18mm-Objektiv	Fisheyeobjektiv
Standardabweichung der Gewichtseinheit	1,591	1,390
Overall RMS	0,198 Pixel	0,168 Pixel
Maximum RMS	0,552 Pixel	0,427 Pixel
Minimum RMS	0,097 Pixel	0,046 Pixel
Parameter der inneren Orientierung		
Focal Length	18,518 mm ± 0,003	9,248 mm ± 0,002
Xp - principal point x	11,508 mm ± 0,003	11,503 mm ± 0,003
Yp - principal point y	7,775 mm ± 0,004	7,832 mm ± 0,004
Fw - format width	22,6805 mm ± 0,00065	22,678 mm ± 0,002
Fh - format height	15,113 mm	15,113 mm
K1 - radial distortion 1	5,64E-04 ± 1,70E-06	4,07E-03 ± 2,20E-05
K2 - radial distortion 2	-1,01E-06 ± 1,30E-08	2,41E-05 ± 1,30E-06
K3 - radial distortion 3	0,00E+00	0,00E+00
P1 - decentering distortion 1	3,14E-06 ± 2,10E-06	1,29E-04 ± 4,30E-06
P2 - decentering distortion 2	7,31E-05 ± 2,40E-06	1,82E-04 ± 6,00E-06

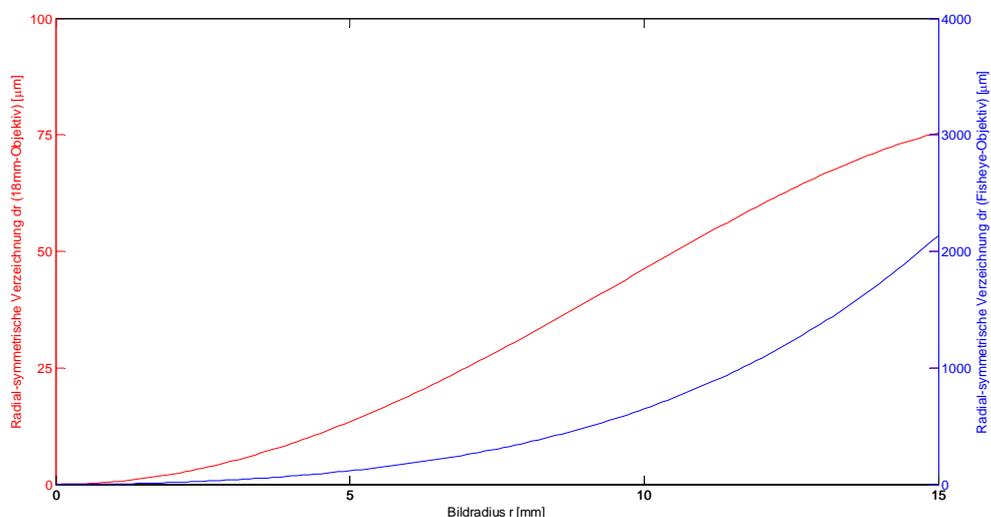


Abbildung 4-9: Verzeichnungskurve des 18mm-Objektivs (rot) und des Fisheyeobjektivs (blau) (ebenes Testfeld)

Es ist zu sehen, dass bei der Kalibrierung des Fisheyeobjektives die Standardabweichung der Kamerakonstanten sich nur um 0,001 mm von der des Weitwinkelobjektivs unterscheidet. Die Standardabweichungen der Koordinaten des Bildhauptpunktes sind identisch. Die Formathöhe des Sensors wurde für das Normalobjektiv deutlich besser bestimmt. Da dieselbe Kamera ge-

nutzt wurde, dürfte sich die Sensorhöhe nicht unterscheiden. Im Rahmen der hier angegebenen Standardabweichungen ist eine Differenz von bis zu 0,00115 mm möglich.

Die Verzeichnungskurve der radial-symmetrischen Verzeichnung des Fisheyeobjektives steigt wie zu erwarten sehr stark an, sodass bei einer vollen Ausnutzung des Sensors eine Korrektur der Bildkoordinaten um bis zu 2 mm in den Bildecken möglich ist. Die Verzeichnung des 18mm-Objektivs beträgt in den Bildecken hingegen nur 75 μm . Bei Betrachtung der Standardabweichungen der Parameter fällt auf, dass deren Bestimmung beim Fisheyeobjektiv um mindestens eine Zehnerpotenz schlechter ist als beim 18mm-Objektiv. Die Parameter der radial-asymmetrischen / tangentialen Verzeichnung wurden beim Fisheyeobjektiv um den Faktor 2 bis 3 schlechter bestimmt. Durch den großen Öffnungswinkel kann das Testfeld zudem nicht formatfüllend abgebildet werden, sodass die Verzeichnungen am Bildrand schlechter durch die bestimmten Parameter beschrieben werden.

Beim Vergleich der Korrelationsmatrizen (Tabelle 4-3 und Tabelle 4-8) treten bei der Fisheyeobjektiv-Kalibrierung kaum Korrelationen zwischen den Parametern der radial-asymmetrischen / tangentialen Verzeichnung und den Bildkoordinaten des Hauptpunktes auf, obwohl diese laut [Luhmann, 2010a, S. 151] typisch sind bei der Nutzung einer Bündelausgleichung. Die Korrelationen zwischen K_1 und K_2 hingegen sind bei beiden Kalibrierungen deutlich höher als die restlichen Werte.

Die Ausgleichung wurde mit einer besseren Standardabweichung der Gewichtseinheit als beim Weitwinkelobjektiv beendet. Dies spiegelt sich auch in den Residuen wieder. Der Grund hierfür liegt in der unterschiedlichen Aufnahmekonfiguration. Wenn bei der Kalibrierung des 18mm-Objektivs auf die beiden Frontalaufnahmen verzichtet wird, werden die in Tabelle 4-13 dargestellten Werte erreicht. Dabei werden jedoch im Vergleich zur Nutzung aller 10 Aufnahmen deutlich andere Parameter für die radial-asymmetrische / tangential Verzeichnung erreicht. Die Standardabweichung von P_1 übersteigt zudem den berechneten Wert. Es ist davon auszugehen, dass die Nutzung von zwei zusätzlichen Frontalaufnahmen die Kalibrierung grundsätzlich verbessert, sodass für die nachfolgenden Berechnungen die Kalibrierung unter Einbeziehung aller 10 Aufnahmen verwendet wird.

Tabelle 4-13: Ergebnisse der Kalibrierung des 18mm-Objektivs mit ebenem Testfeld ohne Frontalaufnahmen

	18mm-Objektiv
Letzer Fehler der Ausgleichung	1,335
Overall RMS	0,163 Pixel
Maximum RMS	0,427 Pixel

Minimum RMS	0,068 Pixel	
Parameter der inneren Orientierung		
Focal Length	18,567 mm	± 0,003
Xp - principal point x	11,525 mm	± 0,003
Yp - principal point y	7,810 mm	± 0,004
Fw - format width	22,713 mm	± 0,001
Fh - format height	15,113 mm	
K1 - radial distortion 1	5,43E-04	± 1,70E-06
K2 - radial distortion 2	-1,07E-06	± 1,10E-08
K3 - radial distortion 3	0,00E+00	
P1 - decentering distortion 1	-1,24E-06	± 1,90E-06
P2 - decentering distortion 2	9,13E-05	± 2,40E-06

Ein zusätzlicher Vergleich kann über die berechneten Strecken aus den Objektkoordinaten der Testfeldpunkte erfolgen. Da PhotoModeler ein willkürliches Koordinatensystem verwendet, muss zunächst eine Rotation und Skalierung über die codierten Punkte erfolgen. Punkt 1 bildet dabei den Ursprung des Koordinatensystem, Punkt 1 und Punkt 3 legen die Richtung der X-Achse und Punkt 2 die Richtung der Y-Achse fest. Für die Skalierung wurde die Strecke zwischen Punkt 1 und 3 mit 0,14 m abgegriffen. Diese Vorgehensweise entspricht der 3-2-1-Methode und beeinflusst die berechneten Parameter der inneren Orientierung nicht.

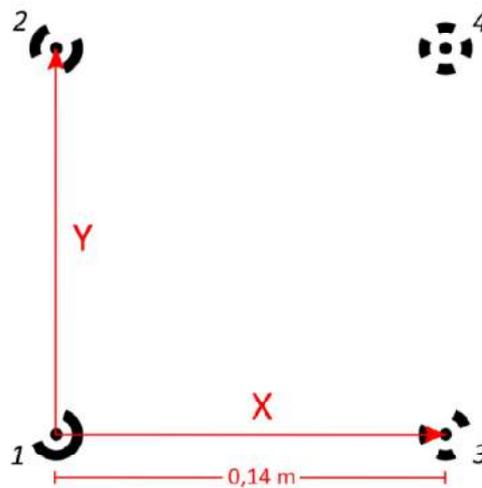


Abbildung 4-10: Verwendetes Koordinatensystem des ebenen Testfeld

Die Koordinaten der Punkte können der jeweiligen „Point Table“ entnommen werden. Tabelle 4-14 zeigt die Strecken zwischen den vier codierten Punkten in allen Kombinationen.

Da die Strecke zwischen Punkt 1 und Punkt 3 als Skalierung des Koordinatensystems bei beiden Aufnahmesystemen verwendet wurde, sind die Strecken identisch. Die Differenzen der weite-

ren 5 Strecken variieren stark. Besonders die beiden diagonal im Punktfeld gelegenen Strecken weisen im Vergleich zu den anderen Strecken größere Abweichungen auf.

Tabelle 4-14: Streckenvergleich zwischen 18mm- und Fisheyeobjektiv (ebenes Testfeld)

Strecke zwischen	18mm [cm]	Fisheye [cm]	Differenz [μm]
1 – 2	13,9814	13,9790	24
1 – 3	14,0000	14,0000	0
1 – 4	19,7936	19,7881	54
2 – 3	19,7739	19,7779	-40
2 – 4	13,9974	13,9970	4
3 – 4	13,9780	13,9788	-8

Die Abweichung von 54 μm ist jedoch allgemein als gering einzuschätzen und zeigt somit mit den Standardabweichungen und Residuen aus Tabelle 4-12 eine gute Kalibrierung.

4.3.2 Räumliches Punktfeld

Bei der Kalibrierung des 18mm-Objektivs mit dem räumlichen Testfeld traten keine größeren Probleme auf. Spätestens durch die Ausführung der „Automatic Target Marking“-Funktion konnten alle Punkte markiert werden, dabei traten keine Fehlzuordnungen auf. Anders verlief die Kalibrierung des Fisheyeobjektives. Nach Start des Projekts konnten im Vergleich zur 18mm-Objektiv-Kalibrierung weniger Punkte automatisch erkannt werden, jedoch war die Anzahl ausreichend für eine erste Kalibrierung (nachfolgend als „Fisheyeobjektiv 1“ in Tabellen und Abbildungen bezeichnet). Die Markierung der übrigen Punkte mithilfe der „Automatic Target Marking“-Funktion, erwies sich als schwierig, da weit entfernte Punkte nicht erkannt wurden. Zudem konnte festgestellt werden, dass Fehlzuordnungen durch falsch erkannte Coderinge auftraten. Durch Veränderungen der Einstellungen konnten schließlich alle Punkte zumindest als nicht-codiert markiert werden. Eine anschließende Zuordnung der Punkte in allen Aufnahmen konnte nicht automatisch erfolgen, da dies zu Fehlzuordnungen aufgrund der ungenügenden inneren Orientierung der Kamera führt. Alle markierten Punkte wurden so referenziert, dass sie eine Nummer entsprechend ihres Coderings erhielten. Anschließend wurde eine erneute Kalibrierung unter Einbeziehung aller Punkte durchgeführt (nachfolgend als „Fisheyeobjektiv 2“ in Tabellen und Abbildungen bezeichnet).

Die schlechte Erkennung der Punkte ist auf die starken Verzeichnungen der Punktmarken zu Ellipsen, die verstärkte chromatische Aberration und die verminderte Abbildungsleistung zurückzuführen (siehe 4.3.1).

Für den nun folgenden Vergleich wurden die Ergebnisse aus 4.1.2 und 4.2.2 in Tabelle 4-15 zusammengefasst.

Tabelle 4-15: Ergebnisse der Kalibrierung des 18mm- und des Fisheyeobjektives (räumliches Testfeld)

	18mm-Objektiv	Fisheyeobjektiv	
		1	2
$\hat{\sigma}_0^2$	0,843	1,584	2,428
Overall RMS	0,104 Pixel	0,162 Pixel	0,270 Pixel
Maximum RMS	0,221 Pixel	0,518 Pixel	0,549 Pixel
Minimum RMS	0,038 Pixel	0,018 Pixel	0,107 Pixel
Parameter der inneren Orientierung			
Focal Length	18,753 mm \pm 0,001	9,242 mm \pm 0,003	9,229 mm \pm 0,003
Xp	11,596 mm \pm 0,002	11,513 mm \pm 0,005	11,488 mm \pm 0,006
Yp	7,859 mm \pm 0,002	7,794 mm \pm 0,005	7,807 mm \pm 0,005
Fw	22,6768 mm \pm 3,30E-04	22,660 mm \pm 0,002	22,655 mm \pm 0,002
Fh	15,113 mm	15,113 mm	15,113 mm
K1	5,33E-04 \pm 1,20E-06	4,26E-03 \pm 3,00E-05	4,23E-03 \pm 2,50E-05
K2	-1,21E-06 \pm 1,10E-08	3,53E-05 \pm 8,70E-07	4,04E-05 \pm 6,80E-07
K3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
P1	-7,45E-06 \pm 1,30E-06	1,99E-04 \pm 7,30E-06	2,20E-04 \pm 8,60E-06
P2	1,23E-04 \pm 1,40E-06	2,48E-04 \pm 1,10E-05	2,72E-04 \pm 9,90E-06

Es sind bereits große Unterschiede beim Vergleich der Standardabweichung der Gewichtseinheit nach der Ausgleichung festzustellen. Die erste Kalibrierung des Fisheyeobjektives zeigte bereits eine fast doppelt so hohe Standardabweichung der Gewichtseinheit. Die letzte Kalibrierung unter Verwendung aller möglichen Testfeldpunkte einen dreifach erhöhten Wert für $\hat{\sigma}_0$. Die Residuen der beiden Fisheyeobjektiv-Kalibrierungen unterscheiden sich untereinander um 0,108 Pixel im Gesamtmittel und weisen beide höhere Werte als die Kalibrierung des 18mm-Objektivs auf. Die erhöhten Residuen können auf die schlechtere Markierung der Punkte aufgrund der Verzerrung zu Ellipsen zurückgeführt werden. Dies führt dazu, dass die Markierung der Punkte sich in den einzelnen Bildern je nach Aufnahme unterscheiden kann. Die Unterschiede in den Residuen der beiden Fisheyeobjektiv-Kalibrierungen, könnte auf die Veränderungen der Einstellungen bei der Punktmarkierung zurückgeführt werden.

Die erzielten Standardabweichungen der Kameraparameter der beiden Kalibriervorgänge des Fisheyeobjektives unterschieden sich voneinander nur geringfügig. Nur der Parameter P_2 weist eine bessere Standardabweichung beim letzten Kalibriervorgang auf. Im Vergleich der Kalibrierung der Fisheyeobjektive zur Kalibrierung des 18mm-Objektivs zeigt sich jedoch eine deutliche

² Standardabweichung der Gewichtseinheit

Erhöhung bei der Brennweite und den Koordinaten des Bildhauptpunktes um bis zu 0,004 mm und den Parametern der Verzerrungsfunktionen um eine Zehnerpotenz in der Standardabweichung.

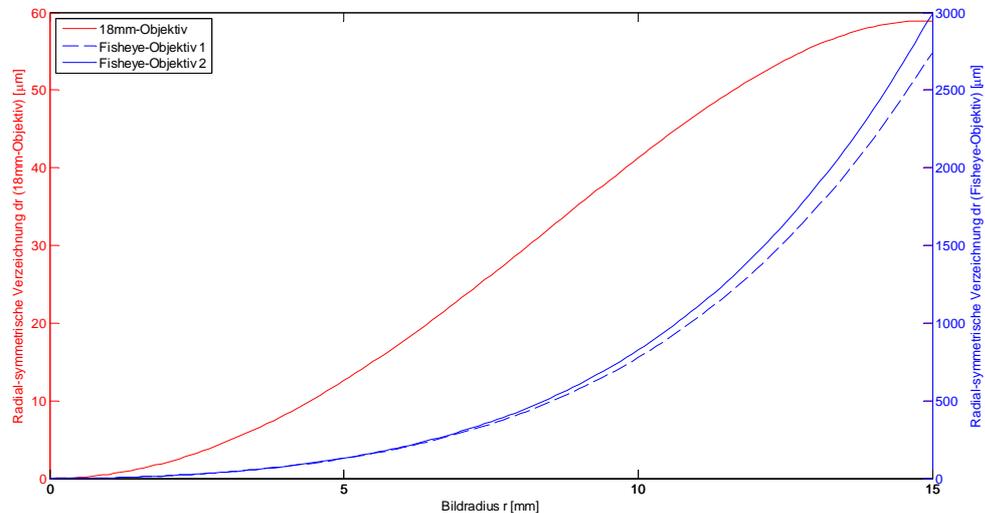


Abbildung 4-11: Verzeichnungskurve des 18mm-Objektivs und des Fisheyeobjektivs (räumliches Testfeld)

In Abbildung 4-11 ist wie erwartet eine stark ansteigende Verzeichnungskurve für die beiden Kalibrierungen der Fisheyeobjektive im Vergleich zum 18mm-Objektiv erkennbar. In den Bildecken kann die Korrektur der Bildkoordinaten aufgrund der radial-symmetrischen Verzeichnung bis zu 3 mm bzw. 2,75 mm betragen, wohingegen das 18mm-Objektiv hier nur eine Korrektur von weniger als 60 μm aufweist. Auch hier füllt das Testfeld abbildungsbedingt nicht den Bildbereich formatfüllend aus, sodass von einer schlechteren Repräsentation der bestimmten Verzeichnungsparameter im Bildrandbereich ausgegangen werden muss.

Bei der Betrachtung beider Korrelationsmatrizen in Tabelle 4-6 und Tabelle 4-11 lässt sich eine generelle Erhöhung der Korrelationen bei der zuletzt durchgeführte Fisheyeobjektiv-Kalibrierung feststellen. Eine Ausnahme zeigen die Korrelationen zwischen den Parametern der radial-asymmetrischen / tangentialen Verzeichnung und den Bildkoordinaten des Hauptpunktes mit 40,8 % und -35,0%, die im Vergleich zum Weitwinkelobjektiv mit -79 % und 86,7 % niedriger ausfallen.

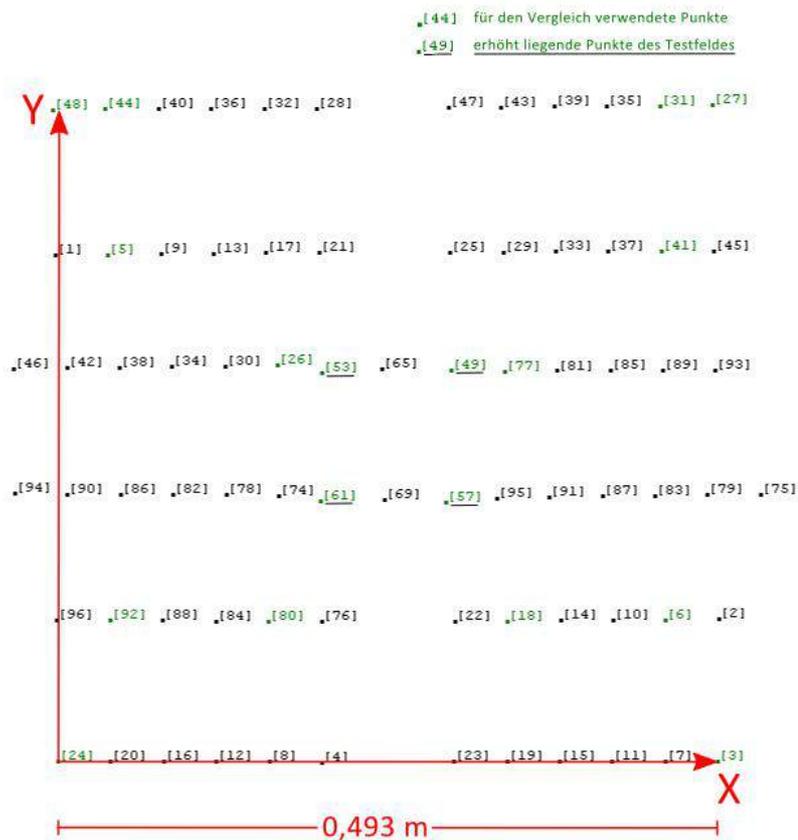


Abbildung 4-12: Verwendetes Koordinatensystem des räumlichen Testfeldes und die für den Streckenvergleich verwendeten Punkte (grün)

Für den Streckenvergleich wurde erneut ein Koordinatensystem nach der 3-2-1-Methode festgelegt. Punkt 24 bildet dabei den Ursprung des Koordinatensystem, Punkt 24 und Punkt 3 legen die Richtung der X-Achse und Punkt 48 die Richtung der Y-Achse fest. Für die Skalierung wurde die Strecke zwischen Punkt 24 und 3 mit 0,493 m abgegriffen. Abbildung 4-12 zeigt die Lage des Koordinatensystems im Punktfeld und die für den Vergleich genutzten Punkte. Da die Punkte 48, 24 und 3 nicht rechtwinklig zueinander liegen, wurde die X-Achse als dominant gesetzt. Abbildung 4-12 zeigt das gewählte Koordinatensystem und die für den Vergleich verwendeten Punkte. Die Berechnung erfolgte im Gegensatz zu 4.3.1 nicht in allen Kombinationen zwischen den Punkten sondern nur für ausgewählte Strecken. Die Ergebnisse der Streckenberechnung und die resultierende Differenz zur Kalibrierung des Weitwinkelobjektivs sind in Tabelle 4-16 aufgelistet.

Tabelle 4-16: Streckenvergleich zwischen 18mm- und Fisheyeobjektiv (räumliches Testfeld)

Strecke zwischen	18mm [cm]	Fisheye 1 [cm]	Differenz [mm]	Fisheye 2 [cm]	Differenz [mm]
Strecken zwischen erhöht liegenden Punkten					
49 – 53	9,6054	9,6036	0,019	9,5815	0,240
49 – 57	9,9206	9,9062	0,143	9,8971	0,234
49 – 61	13,8924	13,9000	-0,076	13,8576	0,348
53 – 57	13,4007	13,4000	0,007	13,3704	0,303
53 – 61	9,6748	9,7007	-0,259	9,6543	0,205
57 – 61	9,4019	9,4014	0,004	9,3775	0,244
Strecken zwischen erhöht liegenden Punkten und darunter liegender Ebene					
49 – 77	20,6590	20,6712	-0,123	20,6362	0,227
53 – 26	20,5347	20,5691	-0,344	20,5165	0,182
57 – 18	22,6524	22,6882	-0,358	22,6522	0,002
61 – 80	22,5026	22,5523	-0,497	22,5029	-0,003
49 – 27	34,5625	34,7130	-1,505	34,6817	-1,192
53 – 48	34,8009	35,0061	-2,052	34,9256	-1,247
57 – 3	34,6921	34,9285	-2,365	34,8147	-1,226
61 – 24	34,2703	34,4510	-1,807	34,3934	-1,231
Strecken zwischen Punkten der tiefer liegenden Ebene					
44 – 31	41,4172	41,4382	-0,210	41,4191	-0,019
31 – 6	38,7272	38,7881	-0,609	38,6995	0,277
6 – 92	41,5155	41,5298	-0,143	41,4606	0,549
92 – 44	38,5115	38,5339	-0,224	38,4924	0,190
41 – 92	49,6859	49,7215	-0,356	49,6353	0,507
5 – 6	49,9105	49,9395	-0,289	49,8498	0,607

Die berechneten Streckendifferenzen liegen für die erste Kalibrierung des Fisheyeobjektives zwischen -2,365 mm und 0,143 mm. Dabei ist zu erwähnen, dass ein Großteil der Strecken unter Verwendung dieser Kameraparameter zu lang gemessenen wurde im Vergleich zur Sollstrecke. Die Strecken zwischen den erhöht liegenden Punkten und den Eckpunkten des Testfeldes weisen dabei die größten Abweichungen auf. Unter Verwendung der endgültigen Kalibrierung des Fisheyeobjektives ergeben sich für die Streckendifferenzen Werte zwischen -1,247 mm und 0,549 mm, wobei nur für die Strecken zwischen den erhöht liegenden Punkten und den Eckpunkten des Testfeldes absolute Differenzen von mehr als 1 mm erreicht werden. Diese Punkte zeigten bei der Kalibrierung des Fisheyeobjektives größere Residuen als die übrigen Testfeldpunkte.

5 Zusammenfassung

Für die Fragestellung der Kalibrierfähigkeit des verwendeten Fisheyeobjektives wurde zunächst als Vergleichsgrundlage ein Weitwinkelobjektiv mithilfe eines ebenen Punktfeldes kalibriert. Die Bestimmung der Kameraparameter konnte wie vorgesehen von der Punktmarkierung bis zur Ausgleichung vollautomatisch ablaufen. Die anschließende Kalibrierung des Fisheyeobjektives unter Verwendung des gleichen Testfeldes war zeitintensiver. Da die automatische Punktmarkierung innerhalb der verwendeten Funktion keine ausreichende Anzahl an Punkten fand, war eine separate Markierung notwendig. Die Zuordnung der Testfeldpunkte in den Aufnahmen musste zunächst manuell erfolgen und konnte erst später durch eine Zwischenkalibrierung automatisiert werden. Dabei wurden Näherungswerte für die Kalibrierung gegeben. Der Vergleich der beiden Parameterbestimmungen zeigte nur geringe Abweichungen in der Standardabweichung und den Residuen. Der Streckenvergleich spiegelte dies mit einer maximalen Differenz von 54 μm ebenso wieder.

Für das räumliche Testfeld war eine vollautomatische Kalibrierung softwarebedingt nicht möglich. Die Kalibrierung des Weitwinkelobjektives verlief auch hier problemlos. Die Ergebnisse der Kalibrierung konnten im Vergleich zur Verwendung eines ebenen Testfeldes noch gesteigert werden. Die Kalibrierung des Fisheyeobjektives zeigte hingegen noch größere Probleme bei der Markierung der Punkte im Vergleich zur Kalibrierung mittels ebenem Testfeld. Besonders die in der Aufnahme weiter entfernt liegenden Punkte konnten nur durch Veränderungen in den Einstellungen zur Markierung von Punkte vorgenommen werden. Zudem kam es zu Fehlzuordnung durch eine falsche Erkennung der codierten Marken. Im Vergleich zum Weitwinkelobjektiv lieferte die Fisheyeobjektiv-Kalibrierung deutlich schlechtere Standardabweichungen sowie Residuen. Der Streckenvergleich lieferte Differenzen von bis zu -2 mm.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Kalibrierung des verwendeten Fisheyeobjektives mittels PhotoModeler aufwendiger war, da automatisierte Funktionen der Software nur teilweise genutzt werden konnten. Hinzu kamen die Nachkontrollen aufgrund von auftretenden Fehlzuordnungen durch die starken Abbildungsfehler des Objektivs. Die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Fisheyeobjektiven durch die Einsparung von Aufnahmen wird somit beeinträchtigt. Eine Einführung des dritten Parameters der radial-symmetrischen Verzeichnung führte bei allen Auswertungen zu starken Korrelationen und teilweise auch erhöhten Standardabweichungen. Obwohl die Parameterbestimmung für das Weitwinkelobjektiv besser mit dem Räumlichen Testfeld gelang, scheint dies für das genutzte Fisheye-Objektiv nicht zu gelten. Die guten Ergebnisse der Kalibrierung des Fisheyeobjektives mittels ebenem Testfeld konnten mit

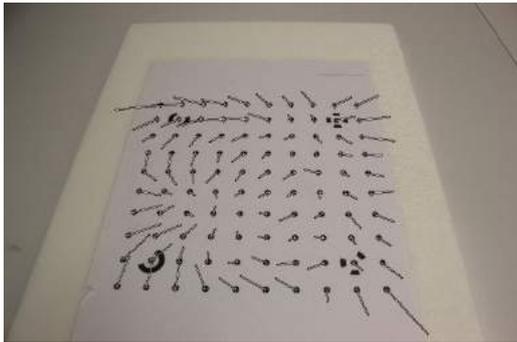
dem räumlichen Testfeld nicht erreicht werden. Die schlechtere Bestimmung zeigte sich auch in den Streckendifferenzen. Eine Abweichung der berechneten Strecken im mm-Bereich im Vergleich zum Weitwinkelobjektiv, lässt auf eine unzureichende Kalibrierung schließen.

Literaturverzeichnis

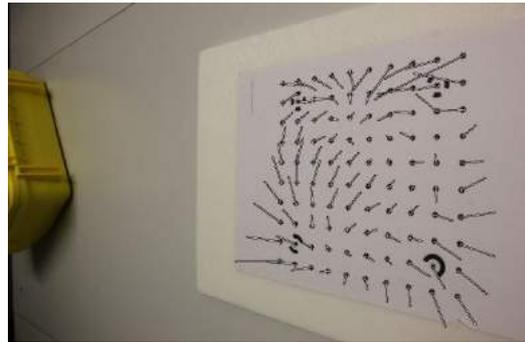
- [Luhmann, 2010a] Luhmann, T.: *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendung*. 3., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann, Berlin, 2010.
- [Luhmann, 2010b] Luhmann, T.: *Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie*. Dissertation, TU Dresden, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 645, 2010.
- [PM User Manual, 2003] PhotoModeler Pro 5 "User Manual", 25th Edition, Eos System Inc., April, 2003.
- [Reiner, 2002] Reiner, J.: *Grundlagen der Ophthalmologischen Optik*. 1. Auflage, Books on Demand, 2002.
- [Schneider, 2009] Schneider, D.: *Geometrische und stochastische Modelle für die integrierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten*. Dissertation, TU Dresden, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 642, 2009.
- [Schwalbe & Maas, 2006] Schwalbe, E.; Maas, H.-G.: *Ein Ansatz zur Elimination der chromatischen Aberration bei der Modellierung und Kalibrierung von Fisheye-Aufnahmesystemen*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006, S. 122-129.
- [van den Heuvel et. al., 2007] Van den Heuvel, F. A.; Verwaal, R.; Beers, B.: *Automated Calibration of Fisheye Camera Systems and the Reduction of Chromatic Aberration*. PFG - Organ der deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF), Heft 3, 2007, S. 157-166.

Anhang

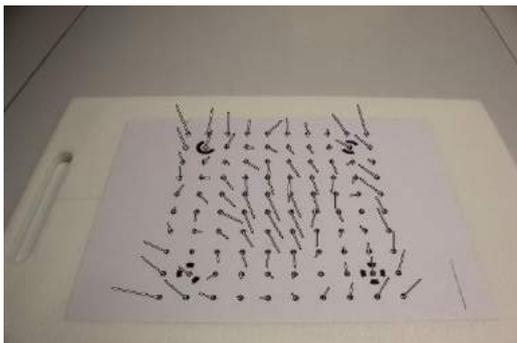
Anhang 1: Darstellung der Residuen aller bei der Kalibrierung des 18mm-Objektivs verwendeten Aufnahmen mit 1000-facher Überhöhung (ebenes Testfeld)



Aufnahme 1



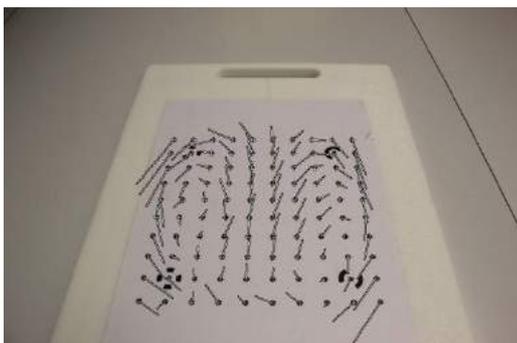
Aufnahme 2



Aufnahme 3



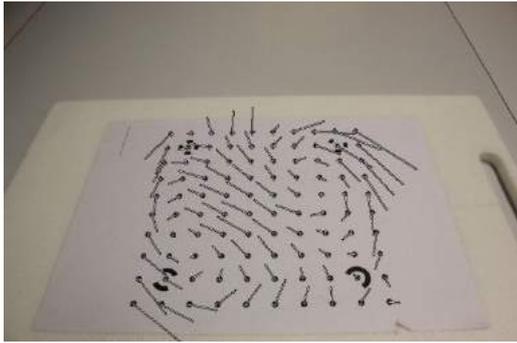
Aufnahme 4



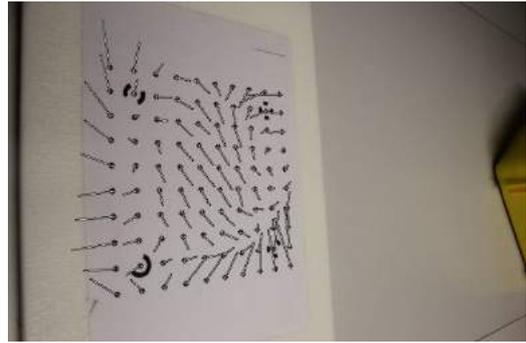
Aufnahme 5



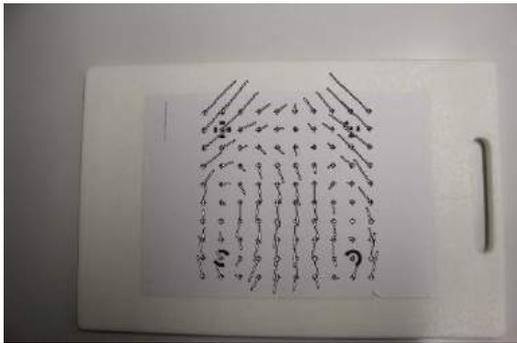
Aufnahme 6



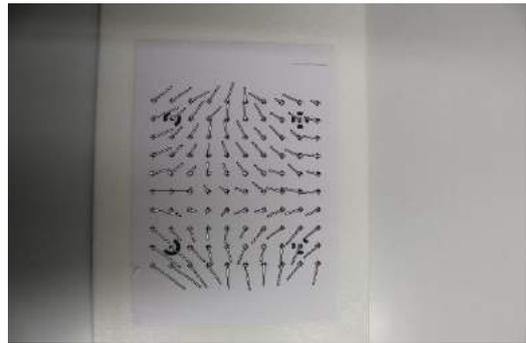
Aufnahme 7



Aufnahme 8



Aufnahme 9



Aufnahme 10

Anhang 2: Darstellung der Residuen aller bei der Kalibrierung des 18mm-Objektivs verwendeten Aufnahmen mit 1000-facher Überhöhung (räumliches Testfeld)



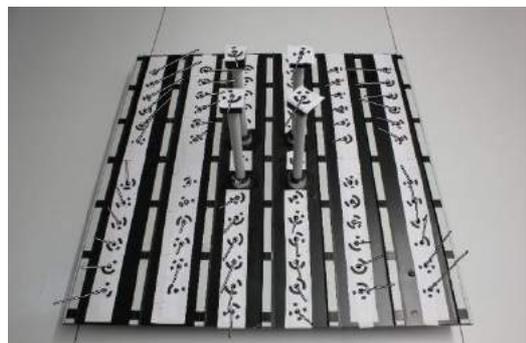
Aufnahme 1



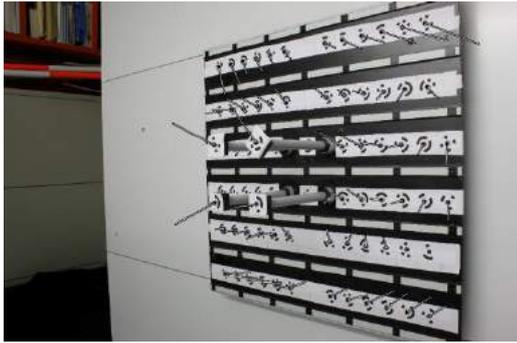
Aufnahme 2



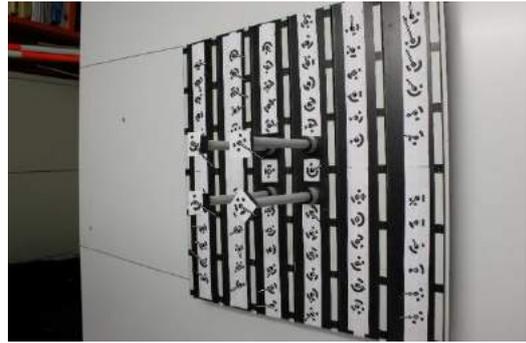
Aufnahme 3



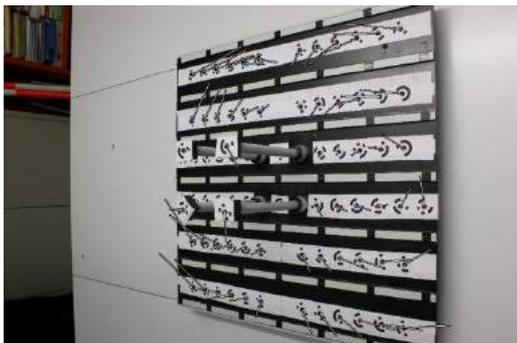
Aufnahme 4



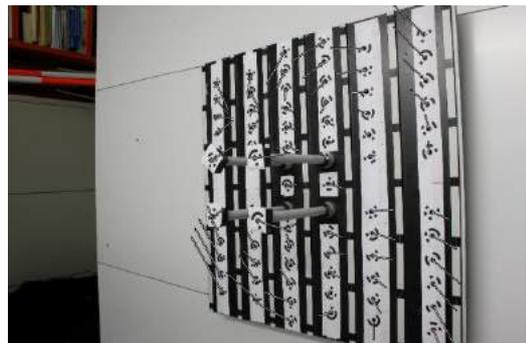
Aufnahme 5



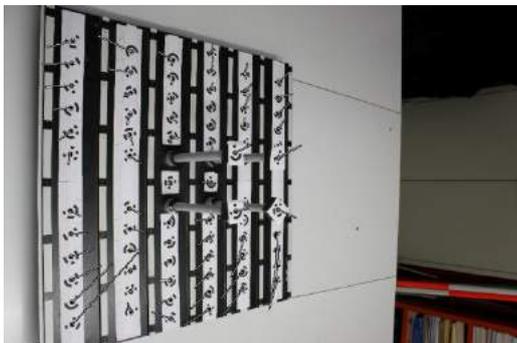
Aufnahme 6



Aufnahme 7



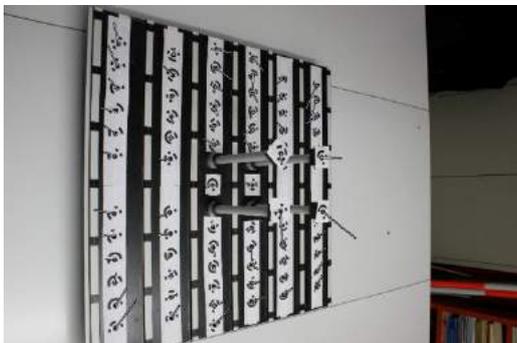
Aufnahme 8



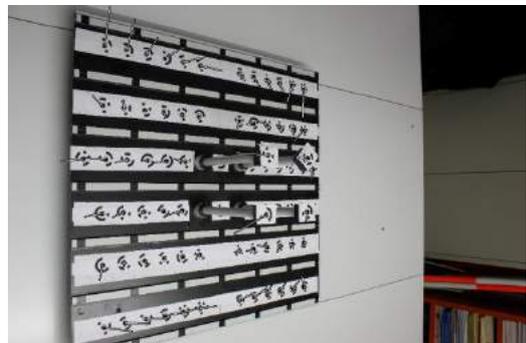
Aufnahme 9



Aufnahme 10

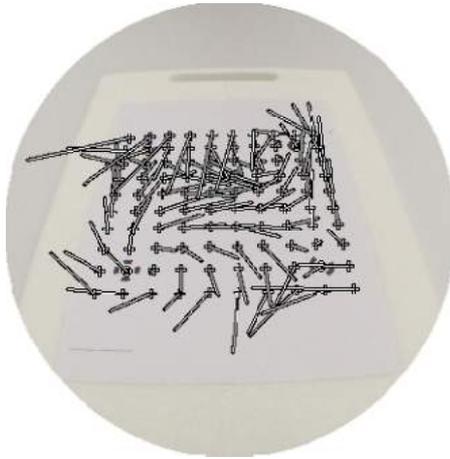


Aufnahme 11



Aufnahme 12

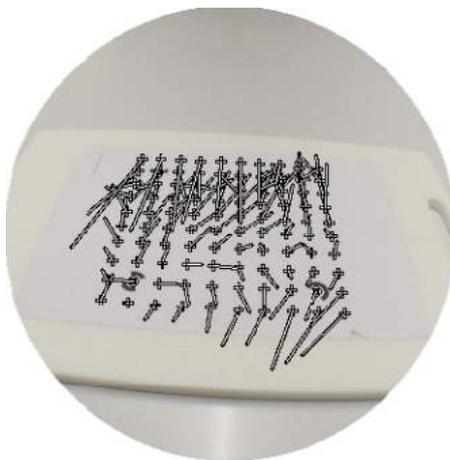
Anhang 3: Darstellung der Residuen aller bei der Kalibrierung des Fisheyeobjektives verwendeten Aufnahmen mit 1000-facher Überhöhung (ebenes Testfeld)



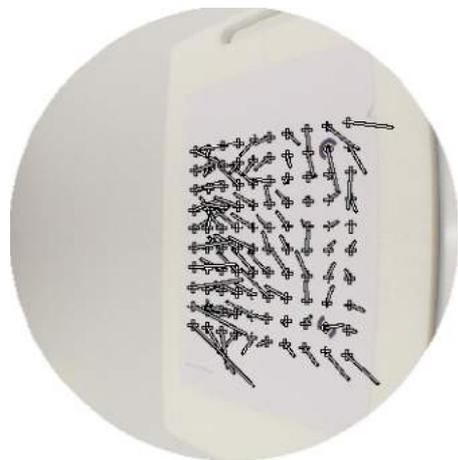
Aufnahme 1



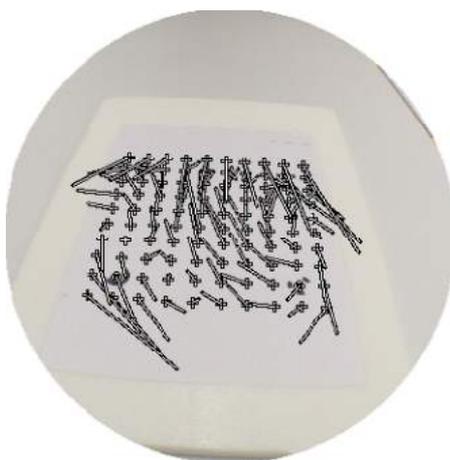
Aufnahme 2



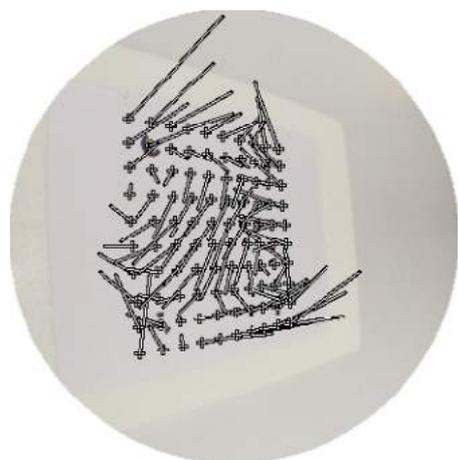
Aufnahme 3



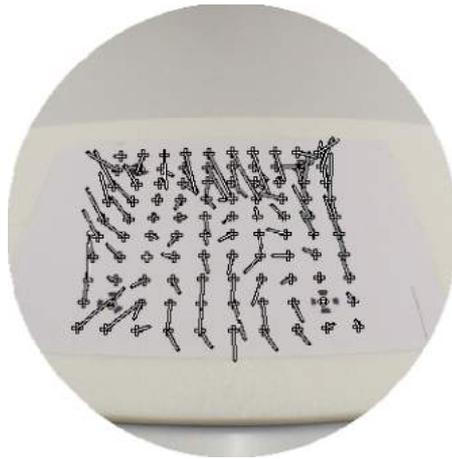
Aufnahme 4



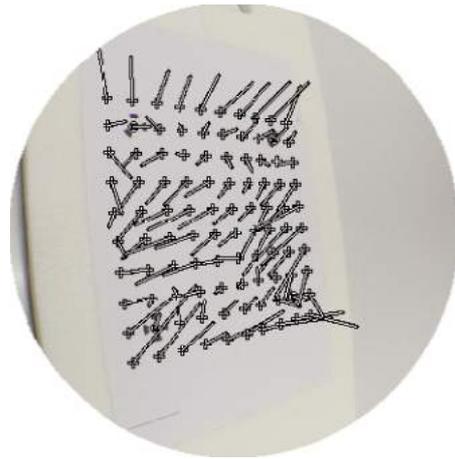
Aufnahme 5



Aufnahme 6



Aufnahme 7



Aufnahme 8

Anhang 4: Darstellung der Residuen aller bei der Kalibrierung des Fisheyeobjektives verwendeten Aufnahmen mit 500-facher Überhöhung (räumliches Testfeld)



Aufnahme 1



Aufnahme 2



Aufnahme 3



Aufnahme 4



Aufnahme 5



Aufnahme 6



Aufnahme 7



Aufnahme 8