

# Kameramodellierung mit bildvarianten Parametern und Finiten Elementen

WERNER TECKLENBURG UND THOMAS LUHMANN<sup>1</sup>

*Abstract: Digital high-resolution consumer cameras are widely available, and are increasingly used in close-range photogrammetry. The mechanical construction of the cameras often do not match photogrammetric requirements, thus have to be modelled sufficiently. An approach for camera modelling is discussed that allows image-variant parameters of interior orientation. In addition a correction model based on finite elements is integrated that provides the correction of remaining errors in the sensor space (e.g. unflatness). All functional parameters are estimated simultaneously in a bundle adjustment.*

*Durch die breite Verfügbarkeit werden hochauflösende Digitalkameras für den Consumerbereich zunehmend auch in der Photogrammetrie eingesetzt. Sie entsprechen in ihrer Konstruktion nicht hochgenauen photogrammetrischen Anforderungen und müssen daher mit geeigneten funktionalen Ansätzen modelliert werden. Hierzu wird ein Ansatz diskutiert, der bildvariante Parameter der inneren Orientierung zulässt und darüber hinaus eine Korrekturmodell nach finiten Elementen für funktional nicht erfassbare Restfehlern in der Sensorfläche (z.B. Unebenheiten) beschreibt. Alle eingeführten Parameter werden simultan in einer Bündelausgleichung geschätzt. Die Leistungsfähigkeit wird an verschiedenen Testreihen nachgewiesen.*

## 1. Einführung

Für hochgenaue Messungen in der industriellen Messtechnik werden im Bereich der Photogrammetrie heute standardmäßig herkömmliche, qualitativ hochwertige Digitalkameras eingesetzt. Bei der Punktmessung in den Bildern kommen Algorithmen zum Einsatz, die es erlauben, Punkte mit einer Genauigkeit von bis zu 0.03 Pixel oder genauer zu erfassen. Das entspricht im Bildraum etwa einer Genauigkeit von 0.25µm oder besser (Luhmann 2000).

Von entscheidender Bedeutung für die Bestimmung von Punkten im Objektraum ist, neben der Definition des Objektkoordinatensystems durch Festlegung von Maßstabsinformationen und Lagerung, die Definition und Erfassung der Geometrieparameter der verwendeten Kameras. Verwendet werden hierbei standardmäßig Kameramodelle, die Kamerakonstante ( $c_k$ ), Hauptpunktlage  $(x_h, y_h)$ , radialsymmetrische Objektivverzeichnung  $(a_1, a_2, a_3)$ , Linsendezentrierungen durch tangentielle und asymmetrische Verzeichnung  $(b_1, b_2)$  und globale Sensoreigenschaften wie Affinität und Scherung  $(c_1, c_2)$  erfassen. In Sonderfällen kommen auch funktionale Modelle für Deformationen der Bildebene oder Film- oder Sensorunebenheiten zum Einsatz (z.B. CAP, BINGO) (Brown 1976, Jacobsen 1980, Kruck 1983). Munji (1986) berichtet über Versuche mit Finiten Elementen zur Erfassung von lokalen Abbildungsfehlern von Teilmesskameras.

Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass die Kameraparameter über den gesamten Zeitraum der Aufnahmen für ein Objekt stabil sind. Besonders dann nicht, wenn die Aufnahmen "frei Hand" erzeugt werden, da sie unterschiedlichen mechanischen Beanspruchungen durch den Benutzer ausgesetzt sind. Zum einen spielt der Einfluss der Schwerkraft auf das Objektiv bei

---

<sup>1</sup> Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, Ofener Str. 16, D-26121 Oldenburg; tecklenburg@fh-oldenburg.de, luhmann@fh-oldenburg.de

unterschiedlichen Aufnahmerrichtungen eine Rolle, zum anderen unterschiedliche Beanspruchungen auf das Kameragehäuse durch das Halten der Kamera. In der folgenden Untersuchung soll diesen Einflüssen durch Einsatz von bildvarianten Parametern Rechnung getragen werden.

Weiterhin sollen die Sensorunebenheiten Berücksichtigung finden. Da nicht vorhersagbar ist, welcher Art diese Unebenheiten sind, da sie produktionsbedingt oder durch den Einbau des Sensors in der Kamera hervorgerufen werden, wurde kein spezielles funktionales Modell gewählt, sondern ein stützpunktbezogenes Korrekturmodell integriert (Abb. 1). Die Stützpunkte werden gitterförmig mit vorher festgelegter Rasterweite über die Sensorfläche verteilt.

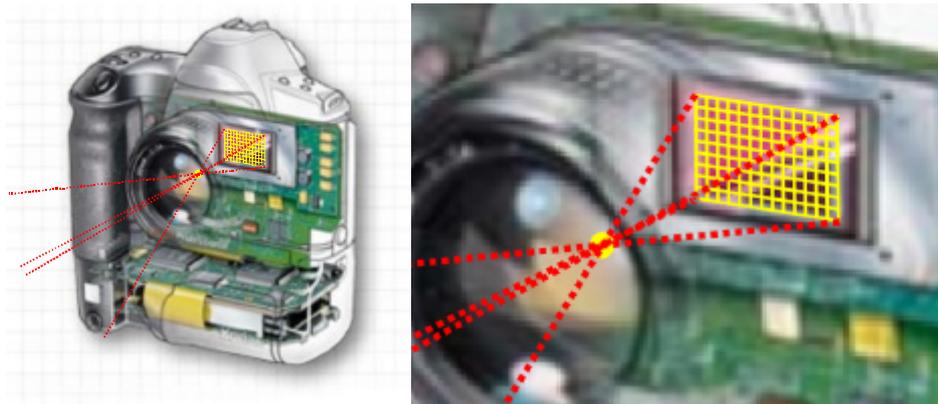


Abb. 1: Prinzip des Korrekturgitters für eine Digitalkamera (Kodak DCS)

## 2. Mathematisches Modell der Kameraparameter

### a) bildvariante Parameter

Herkömmlich werden die Kameraparameter global, d.h. für alle Bilder eines Verbandes identisch, angesetzt. Die Verzeichnungsparameter sind hierbei in der Regel hauptpunktbezogen definiert.

$$x' = x'_0 - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X_p - X_0) + r_{21} \cdot (Y_p - Y_0) + r_{31} \cdot (Z_p - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_p - X_0) + r_{23} \cdot (Y_p - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_p - Z_0)} + dx'$$

$$y' = y'_0 - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X_p - X_0) + r_{22} \cdot (Y_p - Y_0) + r_{32} \cdot (Z_p - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_p - X_0) + r_{23} \cdot (Y_p - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_p - Z_0)} + dy'$$

Beim Einsatz von bildvarianten Parametern werden pro Bild 3 neue Parameter hinzugezogen, welche die Änderung der Kamerakonstanten und die Änderung des Bildhauptpunktes beschreiben. Im Wesentlichen werden hierdurch die mögliche Verschiebung und Verdrehung des Objektivs gegenüber der im Kameragehäuse eingebauten Sensorfläche beschrieben.

$$x' = (x'_0 + \Delta x'_i) - (c + \Delta c_i) \cdot \frac{r_{11} \cdot (X_p - X_0) + r_{21} \cdot (Y_p - Y_0) + r_{31} \cdot (Z_p - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_p - X_0) + r_{23} \cdot (Y_p - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_p - Z_0)} + dx'_{\langle \dots, \Delta c_i, \Delta x'_i, \Delta y'_i \rangle}$$

$$y' = (y'_0 + \Delta y'_i) - (c + \Delta c_i) \cdot \frac{r_{12} \cdot (X_p - X_0) + r_{22} \cdot (Y_p - Y_0) + r_{32} \cdot (Z_p - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_p - X_0) + r_{23} \cdot (Y_p - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_p - Z_0)} + dy'_{\langle \dots, \Delta c_i, \Delta x'_i, \Delta y'_i \rangle}$$

$i = 1, \text{Anzahl Bilder}$

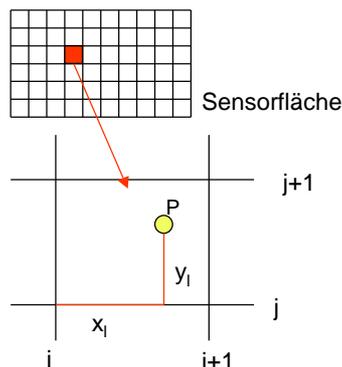
Die äußere Orientierung eines Bildes wird ergänzt um diese 3 Parameter, die Anzahl der zu bestimmenden Unbekannten im Ausgleichsprozess erhöht sich auf 9 Parameter pro Bild.

Zu beachten ist hierbei, dass die Änderung der Kamerakonstante Einfluss auf die Objektivverzeichnung in der Bildebene hat. Der Einfluss kann nicht mehr, wie dies üblicherweise der Fall ist, als Funktion einer Bildkoordinate erfasst werden, sondern muss in Abhängigkeit des Bildwinkels bestimmt werden. Eine lokale, je Aufnahme leicht veränderte Hauptpunktlage hat ebenfalls Einfluss auf die tatsächliche Auswirkung der Verzeichnung an jeder Bildposition.

Die zu erwartenden Änderungen der Kamerakonstante und Hauptpunktlage werden im Bereich von wenigen hundertstel Millimetern liegen, so dass diese Parameter als beobachtete Unbekannte mit entsprechender a priori Genauigkeit in den Ausgleichsprozess eingeführt werden können. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass die Ausgleichsergebnisse nicht zu "weich" werden und keine "Verschmierungseffekte" durch mögliche Korrelationen mit anderen Ausgleichsparametern, vorwiegend der räumlichen Lage des Projektionszentrums, auftreten.

## b.) Finite-Elemente-Korrekturmodell

Für die Berücksichtigung der nicht bildvarianten Parameter wurde ein stützpunktbezogenes, rasterförmiges Korrekturgitter auf der Basis der Finite-Elemente-Methode gewählt, wobei die Gitterschnittpunkte die entsprechenden Korrekturwerte in Form von ebenen Vektoren aufnehmen.



**Abb. 2: Interpolation im Korrekturgitter**

Die Interpolation der Korrekturwerte für einen gemessenen Bildpunkt erfolgt dann linear nach folgendem Ansatz (Kraus 2000; siehe Abb. 2):

$$\begin{aligned}
 x_{korr} = & (1 - x_l - y_l + x_l \cdot y_l) \cdot k_{x[i,j]} \\
 & + (x_l - x_l \cdot y_l) \cdot k_{x[i+1,j]} \\
 & + (y_l - x_l \cdot y_l) \cdot k_{x[i,j+1]} \\
 & + x_l \cdot y_l \cdot k_{x[i+1,j+1]}
 \end{aligned}
 \quad \text{(gleiche Funktion für } y_{korr}\text{)}$$

wobei  $x_{korr}$  die Korrektur der gemessenen Bildkoordinate ( $x$ ) ist, die Koordinaten  $x_l, y_l$  die lokale Position des gemessenen Bildpunktes innerhalb eines Gitterelements beschreiben und die Elemente  $k_{x[i,j]}$ ,  $k_{x[i+1,j]}$ ,  $k_{x[i,j+1]}$ ,  $k_{x[i+1,j+1]}$  die beteiligten Gitterschnittpunkte sind. Der gleiche Aufbau ergibt sich für die Bildkoordinate ( $y$ ). Die Kollinearitätsgleichungen werden um o.g. Ansatz erweitert.

Um nun den "Signal-" vom "Rauschanteil" zu trennen, also die zufälligen Messfehler der Bildpunkte von den tatsächlichen Sensordeformationen und nicht berücksichtigten Abbildungsfehlern des Aufnahmeobjektivs zu separieren, werden Krümmungsbedingungen im Korrekturgitter als Quasi-Beobachtungen eingeführt (Kraus 2000).

$$0 = (k_{x[i,j-1]} - k_{x[i,j]}) - (k_{x[i,j]} - k_{x[i,j+1]})$$

$$0 = (k_{x[i-1,j]} - k_{x[i,j]}) - (k_{x[i,j]} - k_{x[i+1,j]}) \quad (\text{gleiche Funktion für } k_{y[ ]})$$

Angesetzt werden die Gleichungen innerhalb des Korrekturgitters sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung. Dies führt innerhalb des Gleichungssystems zu einer neuen Gruppe von Beobachtungen. Die Genauigkeit, mit der die Gleichungen in den Ausgleichungsprozess eingeführt werden, hängt von der zu erwartenden "Rauhigkeit" der zu ermittelnden Unebenheitsparameter des Korrekturgitters sowie von der tatsächlichen Anzahl der gemessenen Bildpunkte innerhalb des Bildverbandes pro Gittersegment ab.

Gleichfalls bieten diese Gleichungen einen Schutz vor möglichen Singularitäten innerhalb des Ausgleichungssystems, die auftreten können, wenn die an einen Gitterstützpunkt beteiligten Gittersegmente keine Bildpunktmessungen enthalten sollten.

### c) Beobachtungsgewichte der einzelnen Beobachtungsgruppen

Beim jetzigen Stand der Untersuchungen werden die Beobachtungsgewichte der bildvarianten Parameter global anhand der verwendeten Kamera a priori geschätzt.

Ebenso verhält es sich mit den Krümmungsbedingungen der Finite-Elemente-Parameter. Hier spielt zusätzlich noch die Dimension des Korrekturgitters eine Rolle, d.h. die zu erwartende Krümmungsänderung ist um so geringer, je dichter das Korrekturgitter angesetzt wird.

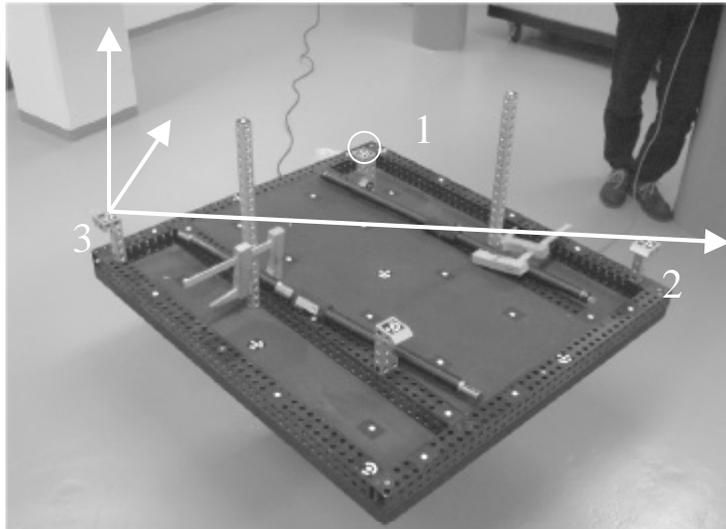
## 3. Ergebnisse einer Testreihe

Im IAPG wurden im Rahmen von studentischen Arbeiten eine Reihe von 5 Kameras unterschiedlicher Hersteller und Ausstattung mit diesem Ansatz untersucht (Tabelle 1). Hierzu wurde ein Kalibrierfeld mit 48 Punkten (Abb. 4) mit diesen Kameras in nahezu identischer Aufnahmekonfiguration aufgenommen.

Kodak DCS 460	f=28mm	9.0µm Pixel	
Kodak DCS 420	f=14mm(Fisheye)	9.0µm Pixel	
Kodak DCS 420	f=16mm(Fisheye)	9.0µm Pixel	
Nikon CoolPix700	f=7.4mm	3.9µm Pixel	
Toshiba PDR M4	f=7.4mm	3.9µm Pixel	Autofokus !, JPEG

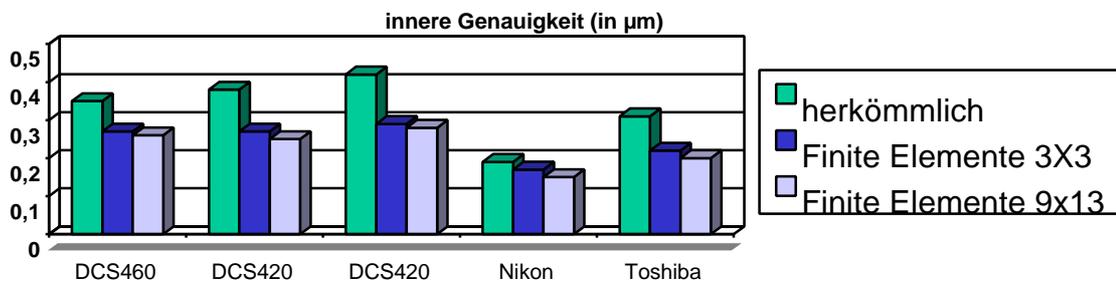
**Tabelle 1: Verwendete Kameras im Vergleichstest**

Die Festlegung des Objektkoordinatensystems erfolgte durch die Punkte 1 bis 3 (siehe Abb. 4), die Maßstabsdefinition durch die Punkte 1 und 2. Aus 8 Aufnahmerichtungen wurden je 3 Aufnahmen gemacht, von diesen wiederum 2 gewälzt, so dass je 24 Aufnahmen für die Auswertung vorhanden waren. Alle Aufnahmen wurden vom Stativ aus erzeugt, um mögliche mechanische Einflüsse zu minimieren. Bei der herkömmlichen Bündelorientierung wurde ein Kameradatensatz mit Kamerakonstante, Hauptpunktlage, radial-symmetrischer und tangential-asymmetrische Verzeichnung sowie Affinität und Scherung verwendet.

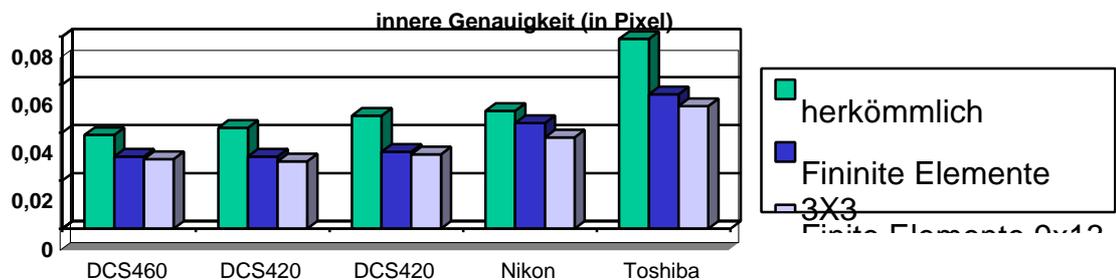


**Abb. 3: Testfeld**

Das Ergebnis zeigte bei allen Kameras eine deutliche Verbesserung der Bildmessgenauigkeit a posteriori gegenüber der herkömmlichen Ausgleichung. In Bezug auf bildvariante Parameter ist dieses auch an anderer Stelle schon nachgewiesen worden (Maas 1999). Da hier Kameras mit großem Bildwinkel vorliegen, sind die erreichbaren Bildmessgenauigkeiten stark abhängig von der Größe der tatsächlichen bildvarianten Parameter, da deren Einfluss nicht in so hohem Maße in die äußere Orientierung "gedrückt" werden kann. Das Ergebnis wird in Abb. 4 sichtbar. Die Abhängigkeit von der Dichte des Finite Elemente-Korrekturgitters wird ebenso deutlich. Da die Bildmessgenauigkeit wegen der unterschiedlichen Pixelauflösung der Kameras nicht identisch ist, ist sie in Abb. 5 auf Pixeleinheiten normiert worden und damit untereinander direkt vergleichbar.



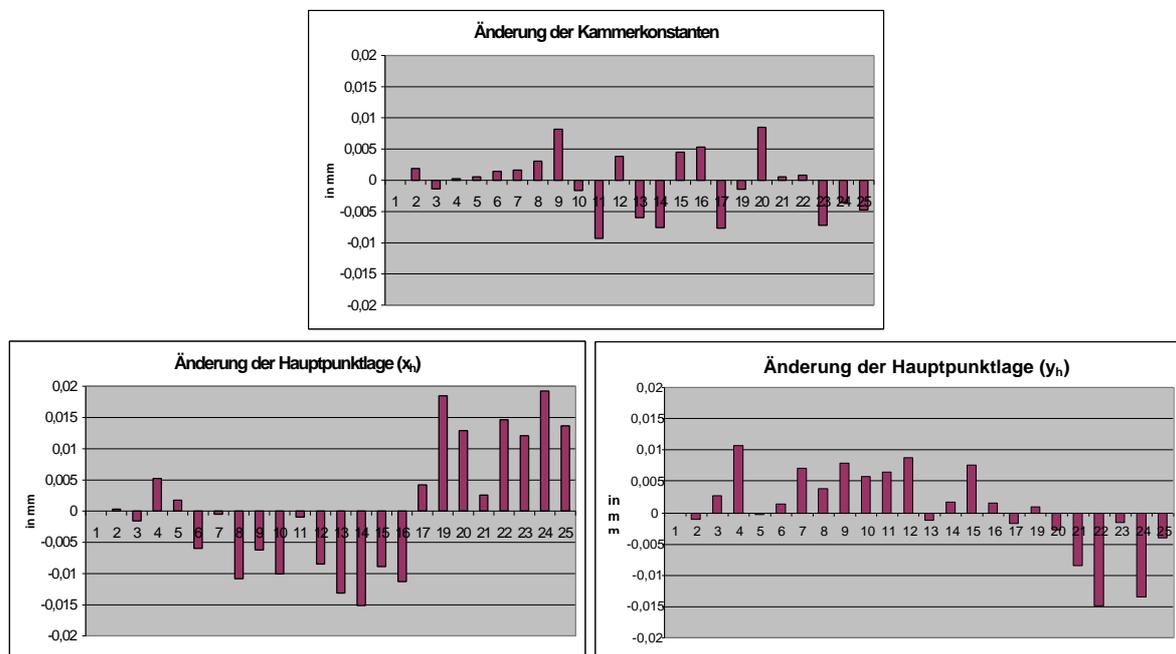
**Abb. 4: Mittlere Residuen der Bildkoordinaten (in µm)**



**Abb. 5: Mittlere Residuen der Bildkoordinaten (in Pixel)**

Im Vergleich fällt die Toshiba PDR M4 gegenüber den anderen Kameras stark ab. Begründet ist dies durch die nicht verlustfreie Bildspeicherung im JPEG-Format, was zu einer grundsätzlich schlechteren Bildpunktmessung führt. Der Einfluß des nicht abschaltbaren

Autofokus wurde durch die bildvarianten Parameter kompensiert. Da alle Aufnahmen aus der gleichen Entfernung zum Testfeld erzeugt wurden und somit gleiche Einstellungswerte durch den Autofokus zu erwarten sind, ist dieser Einfluss relativ gering.



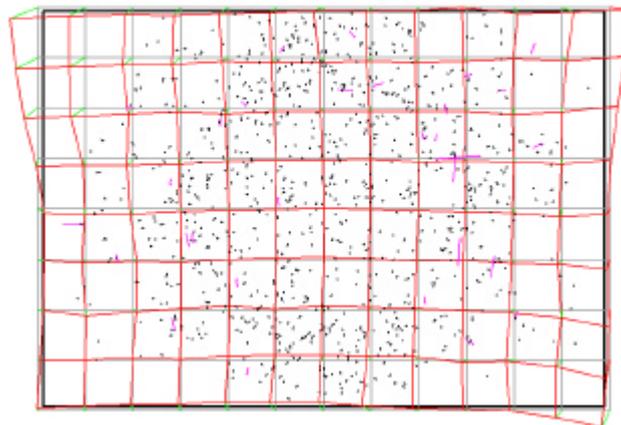
**Abb. 6: Änderungen der inneren Orientierungsparameter über die Bildsequenz Kodak DCS 460 / f=28mm**

Das Ergebnis der bildvarianten Parameter soll anhand der Kodak DCS 460 mit 28mm Objektiv dargestellt werden (Abb. 6). Die Bilder 1 bis 9 sind ohne Kantung, die Bilder 10 bis 17 um 90° nach rechts und die Bilder 18 bis 25 um 90° nach links gekantet aufgenommen. Deutlich erkennt man eine Systematik der Änderung der Hauptpunktlage je nach Kantungsrichtung. So sind alle Änderungen der Hauptpunktlage in x-Richtung bei Kantung nach links negativ, und bei Kantung nach rechts positiv. Da alle Aufnahmen vom Stativ aus erfolgten, ist diese Auswirkung allein auf den Einfluss der Schwerkraft auf das Kamerasystem zurückzuführen. Insbesondere das Gewicht das Objektivs sowie der für die Stabilität der Kamera ungünstige Aufbau mit nur einer Befestigungsschraube für die Sensoreinheit an das Kameragehäuse ist hier von Bedeutung.

Die a priori Beobachtungsgewichte für die bildvarianten Parameter der Kodak DCS 406 (Abb. 6) der wurden mit 2,5µm angesetzt. Die Standardabweichungen für die Änderung der Kamerakonstanten ergaben sich durchschnittlich mit 1,3µm, für die Hauptpunktlage in x und y mit durchschnittlich 1,8µm. Alle drei Parameter wurden statistisch signifikant bestimmt, wobei sich der Hauptpunkt über die gesamte Bildsequenz im Bereich von 20µm verschoben hat.

Zu erwarten ist, dass der Einfluss beim Fotografieren "aus der Hand" durch mechanische Einwirkung des Bedieners sowie thermische Einflüsse, wie ungleichmäßige Erwärmung des Sensors durch zeitlich nicht gleichmäßige Bildfolgen, größer wird. Genauere Untersuchungen hierzu stehen noch aus.

■ 5 Mikrometer



**Abb. 7: Finite-Elemente-Korrekturraster nach Bündelausgleichung (Kodak DCS 460)**

In Abb. 7 ist die Modellierung der Kameraparameter der Kodak DCS 460 mittels finiter Elemente dargestellt. Sichtbar sind alle gemessenen Bildpunkte innerhalb des Bildverbandes. Für die Finite-Elemente-Korrektur wurde eine Rasterweite von 2.35mm verwendet, das Raster enthält also 9x13 Korrektur-elemente. Die Krümmungsbedingungen wurden mit  $0.5\mu\text{m}$  angesetzt, die Bildmessgenauigkeit mit  $0.3\mu\text{m}$ . Der Einfluss der Krümmungsbedingungen nimmt um so mehr ab, je mehr Bildmessungen in beteiligten Rasterzellen vorhanden sind.

Deutlich sichtbar werden Extrapolationseffekte innerhalb des Korrekturgitters an Positionen ohne Punktmessungen in den benachbarter Rasterzellen. Wird dieser Datensatz bei einem anderen Bildverband mit gleicher Kamerakonfiguration als feste "innere Orientierung" verwendet, müssen streng genommen diese Bereiche bei der Punktmessung ausgeschlossen werden. In der vorliegenden Abbildung betrifft das die Randbereiche des Sensors.

#### **4. Absoluter Vergleich der Ergebnisse im Objektraum bei vorliegenden Sollkoordinaten**

Für die weitere Betrachtung lag ein Objekt mit der Längenausdehnung von ca. 20m vor. Alle Punkte wurden sowohl geodätisch als auch photogrammetrisch vermessen (Tabelle 2)<sup>2</sup>. Die Genauigkeit der geodätischen Vermessung ist für alle Punkte mit besser als 0.3mm angegeben. Da es sich hier um ein langgestrecktes Objekt handelt (siehe Abb. 9) und die Aufnahmen nur von einer Seite aus möglich waren, ist die photogrammetrisch zu erreichende Genauigkeit ebenfalls nur auf diesem Niveau zu erwarten. Die ermittelten Standardabweichungen in der Bündelausgleichung von durchschnittlich 0.35mm erhärten diese Annahme. Die Bündelorientierungen wurden auf geodätisch ermittelte Koordinaten gelagert. Ein direkter Vergleich der photogrammetrisch ermittelten Objektkoordinaten mit den geodätischen ist somit möglich.

Messvolumen	ca. 20m x 3.5m x 3m
Markierte Punkte	82
Aufnahmen	79 (Kodak DCS 460 mit $f=24\text{mm}$ )
Bildmessungen	1857
	Alle Punkte geodätisch vermessen ( $\sigma \leq \pm 0.3\text{mm}$ )

**Tabelle 2: Projektdaten**

<sup>2</sup> Die hier verwendete Kamera ist nicht identisch mit der aus der Versuchsreihe von Kap. 3

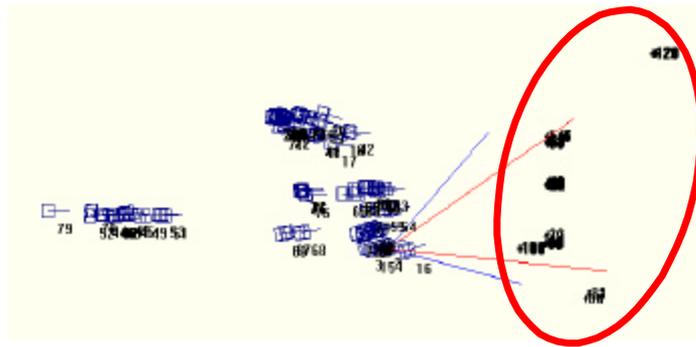


Abb. 8: Testobjekt (Schnitt) mit Aufnahmepositionen)

	+120	+121	+122	+123	+124	+125	+126	+127	+128	+129									
+60	+79	+78	+77	+76	+75	+74	+73	+72	+71	+70	+69	+68	+67	+66	+65	+64	+63	+62	+61
+60	+59	+58	+57	+56	+55	+54	+53	+52	+51	+50	+49	+48	+47	+46	+45	+44	+43	+42	+41
+40	+39	+38	+37	+36	+35	+34	+33	+32	+31	+30	+29	+28	+27	+26	+25	+24	+23	+22	+21

Abb. 9: Testobjekt (Frontansicht)

Die jeweilige Bündelausgleichung wurde zum einen mit Lagerung des Systems nach der 3-2-1-Methode durchgeführt, zum anderen durch Lagerung auf die vier Eckpunkte des Objektes. Maßstäbe wurden nicht verwendet, da die Lagerung direkt auf die geodätisch vermessen Koordinaten der Punkte erfolgte. Die Kameraparameter wurden wie bei der DCS 460 in der vorher beschriebenen Testreihe angesetzt. Für die weiteren Betrachtungen werden die Differenzen zur geodätischen Messung direkt herangezogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt.

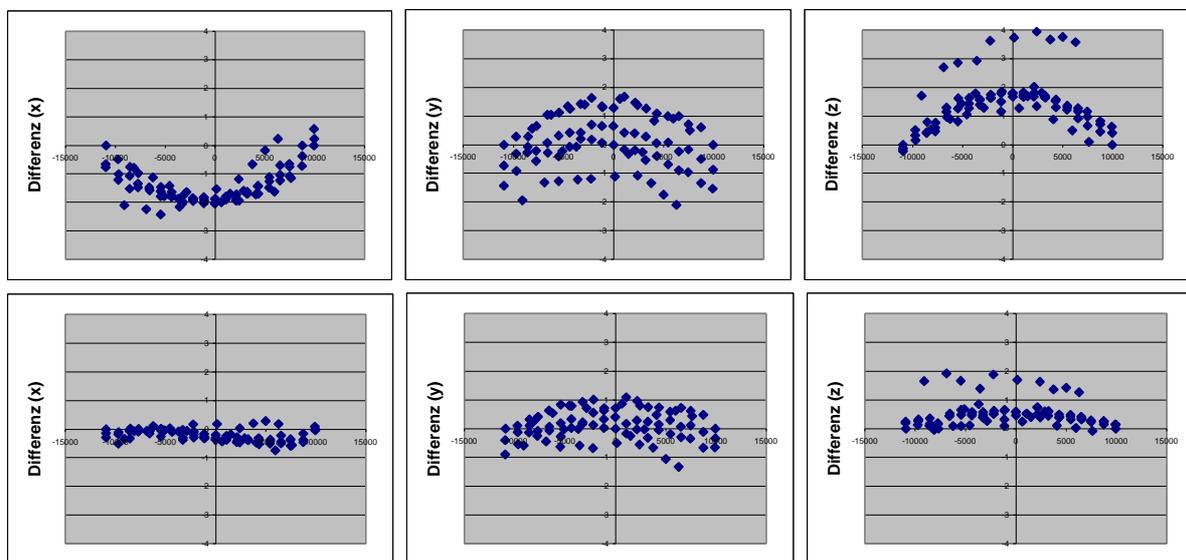
Verwendter Ausgleichungsansatz	3-2-1 Methode	4 Punkte fest
<i>herkömmlich</i>		
Erreichte Bildmessgenauigkeit	0,52 µm	0,53 µm
Max. Standardabweichung im Objektraum	0,54 mm	0,46 mm
Max. Differenz im Objektraum	3,94 mm	2,54 mm
<i>Finite Elem. mit bildvarianten Parametern</i>		
Erreichte Bildmessgenauigkeit	0,24 µm	0,24 µm
Max. Standardabweichung im Objektraum	0,40 mm	0,29 mm
Max. Differenz im Objektraum	1,91 mm	1,31 mm

Tabelle 3: Vergleich der Ergebnisse

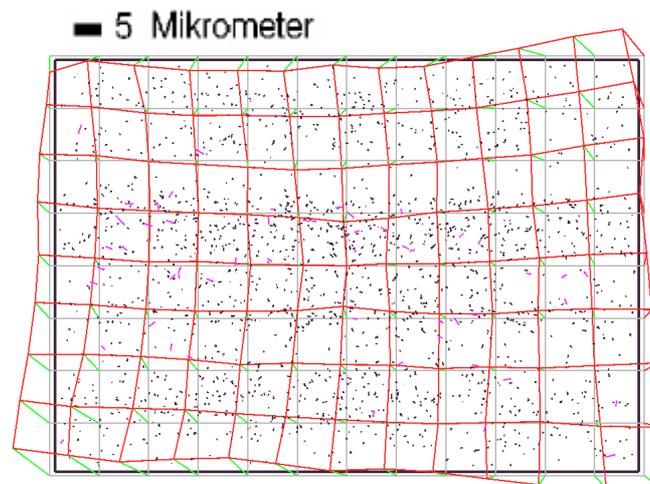
In Tabelle 3 (maximale Standardabweichung und maximale tatsächliche Differenz im Objektraum) und den Abbildungen 10 ist deutlich die Verformung des Objektkoordinatensystems bei den photogrammetrischen Auswertungen zu sehen. Hervorgerufen werden diese durch die vorhandenen Korrelationen zwischen Kameraparametern und Objektpunkten. Da es sich quasi um einen "Streifenverband" handelt, wird dieser Effekt um so deutlicher.

Bei der Verwendung der 3-2-1-Methode im herkömmlichen Fall beträgt die maximale Abweichung der Objektkoordinaten 3.94mm von den geodätischen Koordinaten, bei dem Ansatz finiter Elemente und bildvarianter Parameter reduziert sich die Abweichung um ca. 50% auf 1.9mm. Die erreichte Punktmessgenauigkeit ist ebenfalls um 50% besser als herkömmlich und entspricht damit der tatsächlich bei der Messung zu erzielenden Genauigkeit. Die Standardabweichungen im Objektraum werden nur geringfügig besser, was seine Ursache in dem durch die bildvarianten Parameter etwas "weicherem" Bildverband hat. Die Reduzierung des Verformungseinflusses durch die Verwendung des vorgestellten Ansatzes in Abb. 10 deutlich zu erkennen.

Werden nun 4 Punkte festgehalten, ist der Einfluss auf das Objektkoordinatensystem bei beiden Verfahren etwas geringer. Die Gesamtkorrelation zwischen den Parametern des Objektkoordinatensystems und den Kameraparametern nimmt ab, dennoch ist keine Veränderung der Standardabweichungen der Bildmessgenauigkeit festzustellen.



**Abb. 10: Abweichungen der Objektkoord. Vom Soll**  
(oben:herkömmlich, unten: Finite Elemente + bildvariante Parameter)



**Abb. 11: Finite-Elemente-Korrekturraster nach Bündelausgleichung**  
(Kodak DCS 460 für Testobjekt)

Betrachtet man das in diesem Beispiel ermittelte Korrekturraster der Kodak DCS 460 (Abb. 11), wird der kompensierte Effekt der tangential-asymmetrischen Verzeichnung des verwendeten Objektivs in der linken, unteren und rechten, oberen Bildecke deutlich. Die Korrekturvektoren in der Bildmitte, betroffen sind hier die 4 mittleren Zellen, sind stark nach innen gerichtet. Ein herkömmlicher Ansatz von Kameraparametern ist nicht in der Lage diese Korrekturen aufzufangen. Insgesamt liegt eine sehr gute Verteilung der Messpunkte über die gesamte Sensorfläche vor, so dass keine Extrapolationseffekte vorhanden sind. Die Korrekturvektoren im mittleren Bildbereich sind mit einer Standardabweichung von  $0.3\mu\text{m}$ , in den Randbereichen noch mit  $0.9\mu\text{m}$  bestimmt.

## 5. Ausblick

Die ermittelten Kameraparameter mit dem Finite-Elemente-Korrekturgitter können, ohne sie jeweils neu zu berechnen, für photogrammetrisch zu vermessene Objekte herangezogen werden. In der Bündelorientierung sind dann nur die bildvarianten Parameter zu bestimmen. Es ist zu erwarten, dass dieser Ansatz robuster gegen Deformationen des Objektkoordinatensystems ist und zu qualitativ besseren Ergebnissen führt. Die dennoch auch bei diesem Ansatz vorhandenen Abweichungen im Objektraum (Abbildung 10) deuten darauf hin, dass die Kameraparameter im vorliegenden Fall noch nicht vollständig erfasst worden sind. So ist z.B. im weiteren noch die Annahme zu untersuchen, ob der Bildhauptpunkt gleichzeitig den Durchstoßpunkt der optischen Achse des Aufnahmeobjektivs in der Bildebene darstellt. Die Trennung der Sensoreigenschaften von den Abbildungseigenschaften des Objektivs gelingt ebenfalls noch nicht, da z.Z. von den objektivseitigen Parametern nur die radial-symmetrische Verzeichnung Anwendung findet.

## 6. Literatur

- Brown, D.C. (1976): *The bundle adjustment – progress and prospectives*. International Archives of Photogrammetry, 21 (3), ISP Congress, Helsinki, pp. 1-33.
- Jacobsen, K. (1980): *Vorschläge zur Konzeption und zur Bearbeitung von Bündelblockausgleichungen*. Dissertation, Universität Hannover.
- Kraus, K. (200): *Photogrammetrie, Band 3, Topographische Informationssysteme*, Dümmler Verlag, Bonn, p. 188ff.
- Kruck, E. (1983): *Lösung großer Gleichungssysteme für photogrammetrische Blockausgleichungen mit erweitertem funktionalem Modell*. Dissertation, Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 128.
- Luhmann, T. (2000): *Nahbereichsphotogrammetrie*. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Maas, H.-G. (1999): *Ein Ansatz zur Selbstkalibrierung von Kameras mit instabiler innerer Orientierung*. Publikationen der DGPF, Band 7, München 1998.
- Munji, R.A.H. (1986): *Self-calibration using the finite element approach*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 52, No. 3, March 1986, pp. 411-418.
- Munji, R.A.H. (1986): *Calibrating non-metric cameras using the finite element method*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 52, No. 8, August 1986, pp. 1201-1205.