

# Entwicklung eines geometrischen Modells für ein voll-reflektives Kamerasystem für Nahbereichsanwendungen

KATJA RICHTER<sup>1</sup>, KRISTOF SEIDL<sup>1</sup>, DANILO SCHNEIDER<sup>1</sup>, DAVID MADER<sup>1</sup>, HANS-GERD MAAS<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Für einige photogrammetrische Anwendungen ist die Abbildung eines breiten Spektralbereichs (z.B. UV, VIS und NIR) erforderlich. Da herkömmliche refraktive Optiken aufgrund der chromatischen Aberration nur für einen begrenzten Spektralbereich eingesetzt werden können, arbeiten die konventionellen Systeme hier oft mit mehreren Kameras, deren Optiken für das gewünschte Spektralband optimiert sind. Die Verwendung mehrerer Kameras oder Objektive bringt verschiedene Nachteile mit sich. So muss im Auswerteprozess die Parallaxe der aufgenommenen Bilder korrigiert werden, die Synchronisation bewegter Sensoren bedingt u.U. einen Extraaufwand, und durch das höhere Gewicht wird beispielsweise der Einsatz mit UAVs eingeschränkt.*

*Dagegen weist eine voll-reflektive Optik (d.h. ein ausschließlich aus Spiegeln aufgebautes Objektiv) die Probleme der Aberration nicht auf und kann daher für einen breiten Spektralbereich genutzt werden. In der Publikation wird ein solches voll-reflektives Kamerasystem vorgestellt. Prinzip bedingt weist die Optik dieses Systems starke asymmetrische Verzerrungen auf, die mit herkömmlichen Kalibriermodellen der Nahbereichsphotogrammetrie nur unzureichend modelliert werden können. Daher wird die Entwicklung eines geeigneten geometrischen Modells vorgestellt, das auf der Zentralperspektive basiert und um spezifische Zusatzparameter erweitert wurde. Zur Validierung des Kameramodells werden die Ergebnisse von Testfeldkalibrierungen mit Prototypen des voll-reflektiven Kamerasystems präsentiert.*

## 1 Einleitung

Reflektive Optiken kommen heute hauptsächlich in der Astronomie bei Teleskopen zum Einsatz. Dort werden Spiegelobjektive verwendet, um die starke Vergrößerung von weit entfernten Objekten zu ermöglichen. Durch die Faltung des Strahlengangs im Spiegelobjektiv kann die dafür notwendige große System Brennweite realisiert werden. Bei den meisten Teleskopen besitzen alle Elemente des Objektivs eine gemeinsame optische Achse ("On-Axis"-System). Das führt zu einer zentralen Abschattung des Strahlenganges, die für ein voll-reflektives Kamerasystem nicht tragbar ist. Werden die Spiegel hingegen so angeordnet, dass sie keine gemeinsame optische Achse bilden, kann die Zentralabschattung umgangen werden. Ein solches System wird auch als "Schiefspiegler" bezeichnet ("Off-Axis"-System) (SEIDL, 2011).

1) Dipl.-Ing. Katja Richter, Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas, Dr.-Ing. Danilo Schneider, Dr.-Ing. Kristof Seidl, David Mader, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01062 Dresden, E-Mail: katja.richter1@tu-dresden.de, hans-gerd.maas@tu-dresden.de

Gegenüber konventionellen refraktiven Optiken bieten reflektive Optiken einen entscheidenden Vorteil dadurch, dass sie keine chromatischen Aberrationen aufweisen. Dies ist vor allem für solche Anwendungen wichtig, in denen ein breiter Spektralbereich abgebildet werden muss. Gelingt es, die starke asymmetrische Verzeichnung eines Schiefspieglersystems mit hoher Genauigkeit zu modellieren, erschließen sich photogrammetrische Anwendungen z. B. bei der Bauschadenskartierung (HEMMLEB, 2006), der Restaurierung historischer Gebäude (LERMA, 2000), dem Precision Farming (ROVIRA-Más, 2010) oder im Bereich von Sicherheitsanwendungen (WEIDNER, 2004). In dieser Arbeit wird der Entwicklungsprozess des dafür notwendigen geometrischen Modells dargestellt.

## 2 Design des voll-reflektiven Kamerasystems

Abb. 1 zeigt den inneren Aufbau eines Schiefspieglers, der aus vier Spiegeln und einem CMOS-Sensor besteht. Werden zwei der Spiegel als deformierbar konzipiert, kann auch die Systembrennweite geändert und somit die Zoomfähigkeit des Objektivs realisiert werden. Das entsprechende optische Design wurde in SEIDL (2009) vorgestellt. Da deformierbare Spiegel mit den nötigen Spezifikationen derzeit nicht verfügbar sind, werden im Folgenden Festbrennweiten behandelt.

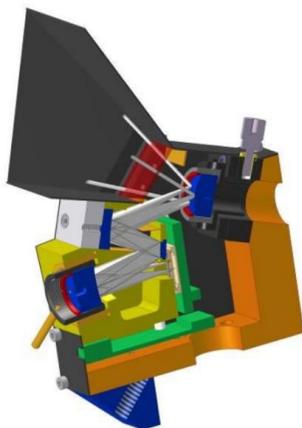


Abb. 1: Innerer Aufbau eines Schiefspieglersystems



Abb. 2: Demonstratoren

Für die nachfolgend gezeigten Arbeiten standen drei Demonstratoren unterschiedlicher Brennweite zur Verfügung, für die ein geeignetes geometrisches Modell zur Modellierung der inneren Orientierung und der Verzeichnung entwickelt werden soll. Die Demonstratoren unterscheiden sich lediglich in ihrer Kamerakonstante und sind ansonsten baugleich (Abb. 2). Die unterschiedlichen Brennweiten werden durch unterschiedlich stark gekrümmte Spiegel realisiert. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die technischen Daten.

Tab. 1: Technische Daten der Demonstratoren

	Weitwinkelobjektiv	Normalwinkelobjektiv	Teleobjektiv
Kamerakonstante	5,2 mm	7,9 mm	15,8 mm
Bildfeldwinkel	38° x 49°	26° x 34°	13° x 17°
Allgemeines			
Bildgröße	2048 Pixel x 1536 Pixel		
Sensorname	iCube NS 1300CU		
Sensortyp	½" CMOS MT9T001		
Pixelgröße	3,2 µm x 3,2 µm		
Sensorgöße	6,55 mm x 4,92 mm		
Verschlusstyp	Rolling Shutter		

Die Beispielbilder in Abbildung 3 zeigen die asymmetrische Verzeichnung der Optik, die beim Weitwinkelobjektiv (links) am stärksten sichtbar wird.



Abb. 3: Beispielbilder (Weitwinkel, Normalwinkel, Schmalwinkel)

### 3 Geometrisches Modell

#### 3.1 Ausgangsmodell

Bei der Kalibrierung von refraktiven Optiken (Linsensystemen) wird das mathematische Modell der Zentralperspektive zugrunde gelegt und um verschiedene Verzeichnungsparameter erweitert, um die Abweichungen der Kamera vom Idealmodell zu berücksichtigen. Die Zentralperspektive ist für reflektive Optiken zunächst nicht physikalisch begründet. Im Hinblick auf die Anwendbarkeit von Standardwerkzeugen der Photogrammetrie bei der Auswertung solcher Aufnahmen soll das Modell der Zentralperspektive dennoch zur Anwendung kommen. Ziel ist es, das Modell so zu erweitern bzw. anzupassen, dass es zur Kalibrierung eines reflektiven Schiefspieglersystems eingesetzt werden kann.

Hierfür wurde ein auf die Demonstratoren abgestimmtes Testfeld (Abb. 4) angelegt und mit allen drei Kameras mehrfach aufgenommen. Das Testfeld besteht ausschließlich aus codierten Zielmarken, damit es später auch für die Selbstkalibrierung genutzt werden kann. Die automatische Zuordnung von uncodierten Marken in einem Bildverband ist mit einem Industriephotogrammetriesoftwarepaket wegen der starken Verzeichnung nicht möglich. Die

Normalobjektivkamera repräsentiert die Spiegeloptik am besten, während die anderen beiden Kameras eher als Extremfälle gesehen werden. Daher wurde das Modell zunächst auf die Aufnahmen aus der Messreihe mit der Normalobjektivkamera optimiert, um hier im räumlichen Rückwärtsschnitt die Modellparameter zu berechnen. Anhand der Standardabweichung der Gewichtseinheit  $\hat{\sigma}_0$  und weiterer Ausgleichungsergebnisse kann eingeschätzt werden, wie gut das funktionale Modell den vorliegenden Messdaten entspricht.



Abb. 4: Testfeld

### 3.2 Erweiterung um Zusatzparametersätze

Aus der photogrammetrischen Praxis sind die verschiedensten Zusatzparametersätze bekannt. Einige von ihnen sind für die Luftbildphotogrammetrie gedacht, können aber für unsere Zwecke modifiziert werden. Bei herkömmlichen Kameras genügt es in der Regel, die Verzeichnung mit Hilfe der Brown Parameter zu modellieren (BROWN, 1971). Beim reflektiven Kamerasystem kann mit diesen Parametern lediglich eine Standardabweichung der Gewichtseinheit von 0,057 mm bzw. 17,8 Pixel erreicht werden.

Als Alternative zu Brown wurden daher folgende Parametersätze getestet: Mixed Model Brown (BROWN, 1976), Ebner (EBNER, 1976), Grün (GRÜN, 1978), Schut (SCHUT, 1978), Mauelshagen (MAUELSHAGEN, 1977), Kölbl (JUHL, 1979), El-Hakim (EL-HAKIM, 1977) und Seidl<sup>1</sup>. Die Koordinaten des Bildhauptpunktes wurden zunächst bei keinem Parametersatz geschätzt, da ihre Schätzung das Konvergenzverhalten stark verschlechterte. Die oben genannten Parametersätze wurden außerdem jeweils in Kombination mit den Brown-Parametern getestet (außer Mixed Model Brown), wobei doppelt auftretende bzw. vollständig korrelierte Parameter ausgeschlossen werden mussten.

In Tabelle 2 sind die erreichten Genauigkeiten zusammengestellt. Es wird deutlich, dass die Parametersätze, einzeln verwendet, die Verzeichnung nicht mit ausreichender Genauigkeit korrigieren. Die besten Ergebnisse erzeugen die Kombinationen Brown + Grün mit 0,3 Pixeln, Brown + Schut mit 0,48 Pixeln und Brown + Ebner mit 0,59 Pixeln. Für die weiteren Untersuchungen werden die Brown + Grün und die Brown + Ebner Kombination gewählt. Die Erstgenannte besitzt das größte Genauigkeitspotential, die Zweite liefert mit relativ wenigen Parametern trotzdem akzeptable Genauigkeiten. Um das Problem mit dem Hauptpunkt zu analysieren werden außerdem die Brown Parameter allein weiter betrachtet.

<sup>1</sup> Der als "Seidl" bezeichnete Parametersatz wurde aus Simulationsdaten hergeleitet und bereits in SEIDL (2010) vorgestellt.

Tab. 2: Vergleich Zusatzparametersätze

	$\hat{s}_0$ [mm]	$\hat{s}_0$ [Pixel]
Brown+Grün	0,00098	0,30
Brown+Schut	0,00154	0,48
Brown+Ebner	0,00188	0,59
Schut	0,00188	0,59
Grün	0,00290	0,91
Mixed Brown	0,00566	1,77
Brown+Seidl	0,00695	2,17
Seidl	0,01645	5,14
Ebner	0,02057	6,43
Mauelshagen	0,04944	15,45
El-Hakim	0,05463	17,07
Brown+El-Hakim	0,05530	17,28
Brown	0,05700	17,81
ohne Zusatzparameter	0,06114	19,11
Kölbl	0,06132	19,16
Brown+Kölbl	keine Konvergenz	
Brown+Mauelshagen	keine Konvergenz	

### 3.3 Optimierung des Modells

Stellt man die Funktionen der Verzeichnungsparameter  $f_{Brown}$ ,  $f_{Ebner}$  und  $f_{Grün}$  in Abhängigkeit der verwendeten Bildpunkte dar, ergeben sich folgende Modelle:

Zentralperspektive mit Brown Parametern:

$$(x, y) = HP + f_{Koll} \quad (1)$$

$$(x', y') = (x, y) + f_{Brown}(x, y)$$

Zentralperspektive mit Brown und Ebner Parametern:

$$(x_b, y_b) = f_{Koll} \quad (2)$$

$$(x', y') = (x, y) + f_{Brown}(x, y) + f_{Ebner}(x_b, y_b)$$

Zentralperspektive mit Brown und Grün Parametern:

$$(x', y') = (x, y) + f_{Brown}(x, y) + f_{Grün}(x_b, y_b) \quad (3)$$

In dieser Darstellung sind  $(x', y')$  die korrigierten Bildkoordinaten,  $f_{Koll}$  die Funktion der Kollinearitätsgleichung und  $HP$  der Hauptpunkt  $(x_h, y_h)$ . Während in die Berechnung der Brown Parameter die um den Hauptpunkt korrigierten Bildkoordinaten eingehen, beziehen sich die Ebner und Grün Parameter zunächst nicht auf den Hauptpunkt. Da sie weder rotationssymmetrisch noch physikalisch begründet sind, erscheint dies zunächst am sinnvollsten. Wird Modell (1) im Rückwärtsschnitt verwendet, konvergiert dieser erst nach über 20 Iterationen, wobei  $\hat{s}_0 = 0,025$  mm ist. Für den Hauptpunkt werden untypisch große Werte ( $x_h = 0,11$  mm,  $y_h = -3,8$  mm) geschätzt. Die Erweiterung um die Ebner Parameter im Modell (2) bringt zwar eine deutliche Genauigkeitssteigerung ( $\hat{s}_0 = 0,002$  mm), erschwert die Konvergenz aber noch mehr.

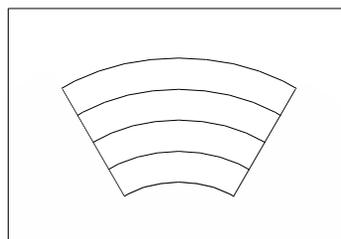
Offensichtlich ist das Modell in dieser Form nicht gänzlich schlüssig und muss geändert werden. Dafür kommen verschiedene Varianten in Frage: Einerseits können die Zusatzparametersätze komplett ausgetauscht werden, was aufgrund des vielversprechenden Genauigkeitspotentials vorerst nicht in Betracht gezogen wird. Andererseits können die Zusatzparameter von Brown und Ebner weiter untersucht werden. Hier spielen die Parameter an sich, die verwendeten Bildpunkte und der Bildhauptpunkt eine Rolle.

Beim Vergleich der tonnenförmigen Verzeichnung eines herkömmlichen Objektivs mit dem Verzeichnungsbild des Spiegelobjektivs entstand die Idee, einen gesonderten Symmetriepunkt für die radialsymmetrische Verzeichnung einzuführen. Die Brown Parameter können dadurch separat auf einen Symmetriepunkt  $(x_s, y_s)$  bezogen werden (Abb. 5), der entweder geschätzt oder auf die Bildmitte festgesetzt wird. Das neue Modell sieht folgendermaßen aus:

$$(x', y') = (x, y) + f_{Brown}(x_s, y_s) + f_{Ebner}(x_b, y_b) \quad (4a)$$

$$(x', y') = (x, y) + f_{Brown}(0,0) + f_{Ebner}(x_b, y_b) \quad (4b)$$

Aus den Ergebnissen in Tabelle 3 wird deutlich, dass der Gewichtseinheitsfehler durch die Trennung von Brown Parametern und Hauptpunkt auf 0,00064 mm (0,2 Pixel) verbessert werden kann. Allerdings tritt auch hier die Konvergenz erst nach mehr als 20 Iterationen ein. Außerdem ist das Modell so instabil, dass es nicht auf alle Bilder angewendet werden kann. Etwas stabiler verhält sich die Variante mit festem Symmetriepunkt  $(0,0)$ , wobei auch hier die Ergebnisse nicht zufriedenstellend sind.



$(x_s, y_s)$

Abb. 5: Symmetriepunkt für die radialsymmetrische Verzeichnung

Tab. 3: Brown und Ebner Parameter mit Brown auf einen geschätzten Symmetriepunkt  $(x_s, y_s)$  und auf  $(0,0)$  bezogen

	$\hat{s}_0$ [mm]	$x_h$ [mm]	$y_h$ [mm]	$x_s$ [mm]	$y_s$ [mm]
Brown auf $(x_s, y_s)$ bezogen (4a)	0,00064	-0,130	-3,27	0,05	-0,32
Brown auf $(0,0)$ bezogen (4b)	0,00072	-0,079	-2,95	0	0

Daher wurde als nächste Modellanpassung die Möglichkeit betrachtet, die Ebner Parameter auf den Hauptpunkt zu beziehen:

$$(x', y') = (x, y) + f_{Brown}(x_s, y_s) + f_{Ebner}(x, y) \quad (5a)$$

$$(x', y') = (x, y) + f_{Brown}(0,0) + f_{Ebner}(x, y) \quad (5b)$$

Die in Tabelle 4 zusammengestellten Ergebnisse zeigen, dass sich die Genauigkeiten und die Parameter durch diese Anpassung wenig ändern. Allerdings zeigt die Variante (5b), bei der die Brown Parameter auf die Bildmitte bezogen werden, ein normales Konvergenzverhalten mit durchschnittlich 12 Iterationen. Variante (5a) mit dem geschätzten Symmetriepunkt wird an dieser Stelle verworfen, da die Konvergenz unverändert schlecht und der Genauigkeitsgewinn nur gering ist.

Tab. 4: Ebner Parameter auf den Hauptpunkt bezogen

	$\hat{s}_0$ [mm]	$x_h$ [mm]	$y_h$ [mm]	$x_s$ [mm]	$y_s$ [mm]
Brown auf $(x_s, y_s)$ bezogen (5a)	0,00065	-0,15	-3,21	0,03	-0,30
Brown auf $(0,0)$ bezogen (5b)	0,00072	-0,11	-2,89	0	0

Nachdem mit (5b) ein funktionierendes geometrisches Modell gefunden wurde, konnte anschließend die Genauigkeit durch Verwendung des Parametersatzes von Grün auf 0,00028 mm (0,088 Pixel) gesteigert werden.

$$(x', y') = (x, y) + f_{Brown}(0,0) + f_{Grün}(x, y) \quad (6)$$

Die starke Verschiebung des Bildhauptpunktes entlang der y-Achse lässt sich durch den schrägen Einfall der Strahlen auf die optischen Elemente erklären.

## 4 Test des geometrischen Modells

Die entwickelten geometrischen Modelle werden nun im Rückwärtsschnitt auf alle drei Kameras angewendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Der für das Normalobjektiv bereits nachgewiesene Genauigkeitsgewinn durch die Modellanpassungen ist auch beim Weit- und Teleobjektiv erkennbar. Allerdings besitzt Modell 6 für das Teleobjektiv keine Gültigkeit.

Tab. 5: Ergebnisse Rückwärtsschnitt

	Weitwinkel		Normalwinkel		Telewinkel	
	$\hat{s}_0$ [mm]	$\hat{s}_0$ [Pixel]	$\hat{s}_0$ [mm]	$\hat{s}_0$ [Pixel]	$\hat{s}_0$ [mm]	$\hat{s}_0$ [Pixel]
Brown + Ebner ohne HP	0,00217	0,68	0,00188	0,59	0,00062	0,19
Brown + Ebner + HP (5b)	0,00073	0,23	0,00066	0,21	0,00050	0,16
Brown + Grün ohne HP	0,00056	0,18	0,00098	0,30	0,00041	0,13
Brown + Grün + HP (6)	0,00031	0,10	0,00030	0,09		

Abbildung 6 zeigt die mit den im Rückwärtsschnitt bestimmten Parametern entzeichneten Beispielbilder.



Abb. 6: Entzeichnete Aufnahmen (Weitwinkel, Normalwinkel, Schmalwinkel)

## 5 Ausblick

Ergebnis der bisherigen Analysen ist ein funktionierendes geometrisches Modell, mit dem die Verzeichnungen einer reflektiven Optik modelliert werden können. Der Gewichtseinheitsfehler eines Rückwärtsschnittes auf ein Testfeld konnte dadurch von 19,1 Pixel auf unter 0,1 Pixel reduziert werden. In nachfolgenden Untersuchungen soll der gefundene Modellansatz in einer Bündelblockausgleichung getestet werden. Außerdem sollen Systematiken in den Verbesserungen untersucht und weitere Modellvarianten, unter anderem mit den Zusatzparametern von Schut, getestet werden. Da wahrscheinlich nicht alle Verzeichnungseffekte mit globalen Parametern korrigiert werden können, sollen lokale Effekte mit der Finite-Elemente-Methode berücksichtigt werden.

## 6 Literaturverzeichnis

- BROWN, D. C., 1971: Close-range camera calibration Photogrammetric Engineering 37(8), pp. 855 –866
- BROWN, D. C., 1976: The bundle adjustment - Progress and prospects Proc. XIIIth Congress of the ISP, Commission III
- EBNER, H., 1976: Self-calibrating block adjustment Proc. XIIIth Congress of the ISP, Commission III
- EL-HAKIM, S. F. & FAIG, W., 1977: Compensation of systematic image errors using spherical harmonica Proc. of the American Society of Photogrammetry, Fall Technical Meeting, pp. 492 – 499
- GRÜN, A., 1978: Experiences with the self-calibrating bundle adjustment Proc. ACSM-ASP Convention, Washington, D. C.
- HEMMLER, M., WERTZ, F., MAIERHOFER, C. & SCHIEMENZ, A., 2006: Schadensdiagnose an Bauwerksoberflächen mit multispektralen Methoden DGZfP-Berichtsband 100-CD
- JUHL, J., 1979: Results from Jämijärvi Contributions to the ISP WG III/3 Seminar, pp. 39 – 52
- LERMA, J. L., RUIZ, L. A. & BUCHON, F., 2000: Application of spectral and textural classifications to recognize materials and damages on historic building facades International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B5, Amsterdam
- MAUELSHAGEN, L., 1977: Teilkalibrierung eines photogrammetrischen Systems mit variabler Passpunktanordnung und unterschiedlichen deterministischen Ansätzen *DGK, Reihe C.*, Nr. 236 München
- ROVIRA-MÁS, F., 2010: Sensor Architecture and Task Classification for Agricultural Vehicles and Environments Sensors 10, pp. 11226 – 11247
- SCHUT, G. H., 1978: Selection of additional parameters for bundle adjustments Proc. Symposium of Commission III of the ISP, Moscow
- SEIDL, K., KNOBBE, J. & GRÜGER, H., 2009: Design of an all-reflektive unobscured optical-power zoom objective Applied Optics, 48, pp. 4097 – 4107.
- SEIDL, K., KNOBBE, J., SCHNEIDER, D. & LAKNER, H., 2010: Distortion correction of an all-reflektive unobscured optical-power zoom objective Applied Optics, 49
- SEIDL, K., 2011 Entwicklung eines Systemansatzes für ein Spiegel-Zoomobjektiv mit deformierbaren Elementen Verlag Dr. Hut
- WEIDNER, T., 2004: Auslegung einer multispektralen Kameraanordnung für einen automobilen Einsatz Dissertation Technische Universität Darmstadt