

---

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

Katja RICHTER, David MADER, Kristof SEIDL, Hans-Gerd MAAS

## Zusammenfassung

In der Nahbereichsphotogrammetrie werden aktuell ausschließlich refraktive Optiken verwendet. Der Einsatz solcher aus Linsen bestehender Objektive bringt allerdings bei manchen Anwendungen einen großen Nachteil mit sich. Durch die an Linsen auftretende chromatische Aberration müssen Einbußen der Bildqualität (Farbsäume) und ggf. Verluste der geometrischen Genauigkeit in Kauf genommen werden. Dieser Fakt spielt besonders bei Anwendungen, welche die Abbildung eines breiten Spektralbereiches erfordern, eine Rolle. Sollen zusätzlich zum sichtbaren Licht der ultraviolette und/oder nah-infrarote Spektralbereich erfasst werden, geraten herkömmliche Kameras schnell an ihre Grenzen. Anders verhält es sich mit voll-reflektiven Optiken. Da sie ausschließlich aus Spiegeln aufgebaut sind (welche prinzipbedingt keine chromatische Aberration aufweisen), können diese Objektive problemlos für einen breiten Spektralbereich eingesetzt werden.

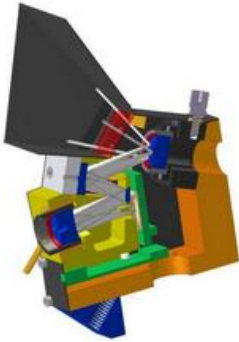
Allerdings weist die Optik durch den Aufbau aus asphärisch gekrümmten Spiegeln eine starke asymmetrische Verzeichnung auf, die nicht mit Standardmethoden der Photogrammetrie modelliert werden kann. Außerdem reagiert das Gesamtsystem stärker auf Abweichungen vom Idealmodell der Spiegeloberfläche. Daher wurde ein auf den Spezialfall der reflektiven Optik angepasstes geometrisches Modell entwickelt, das auf der Zentralperspektive basiert und um spezifische Zusatzparameter erweitert wurde. Es werden verschiedene Modellvarianten vorgestellt, die auf den Zusatzparametersätzen von Brown, Ebner und Grün sowie Legendreschen bzw. Tschebyscheffschen Polynomen und Fourierreihen aufbauen. Die Publikation diskutiert, inwiefern die verschiedenen Modellvarianten in der Lage sind, die Verzeichnung der reflektiven Optik zu modellieren. Weiterhin werden die Ergebnisse von Testfeld- und Selbstkalibrierungen mit Prototypen des voll-reflektiven Kamerasystems präsentiert und verschiedene Ansätze zur Berücksichtigung lokaler Spiegeldeformationen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode dargelegt.

## 1 Einleitung

Reflektive Optiken weisen im Vergleich zu herkömmlichen linsenbasierten Optiken keine chromatische Aberration auf und können daher problemlos auch für einen breiten Spektralbereich eingesetzt werden. Die Vorteile reflektiver Optiken werden in anderen Wissenschaftsdisziplinen seit Langem genutzt. In der Astronomie beispielsweise werden heute für wissenschaftliche Zwecke (Großteleskope) ausschließlich Spiegelteleskope verwendet um möglichst lange Brennweiten zu realisieren und extrem weit entfernte Objekte farbfehlerfrei abbilden zu können (LÖFFLER-MANG 2012). Auch in der Biologie und Materialfor-

schung spielen reflektive Optiken bei Mikroskopen eine Rolle. Durch die ausschließliche Verwendung von Spiegeln können Proben frei von chromatischer Aberration abgebildet werden (FISCHBACH 2012).

Um diesen Vorteil auch in photogrammetrischen Anwendungen zu nutzen, wurde ein voll-reflektives Kamerasystem bestehend aus vier Spiegeln und einem CMOS-Sensor entwickelt. Im Gegensatz zu den meisten Teleskopen und Mikroskopen handelt es sich hierbei, bedingt durch die Notwendigkeit großer Öffnungswinkel, um einen sogenannten Schiefspiegler. Durch die Anordnung der optischen Elemente außerhalb der optischen Achse wird eine zentrale Abschattung in der Bildmitte vermieden. Das optische Design des Kamerasystems ist in Abbildung 1 dargestellt und wurde in SEIDL (2009) vorgestellt. Um Potential und Grenzen zu ermitteln, wurden drei verschiedene Prototypen des Systems aufgebaut (Abbildung 2). Durch unterschiedlich stark gekrümmte Spiegel konnten verschiedene Brennweiten realisiert werden. In Tabelle 1 sind die wichtigsten technischen Daten zusammengestellt.



**Abb. 1:** Design voll-reflektives Kamerasystem



**Abb. 2:** Demonstratoren (Weitwinkel, Normalwinkel, Schmalwinkel)

**Tabelle 1:** Technische Daten der Demonstratoren

	Weitwinkelobjektiv	Normalwinkelobjektiv	Schmalwinkelobjektiv
Kamerakonstante	5,2 mm	7,9 mm	15,8 mm
Bildfeldwinkel	38° x 49°	26° x 34°	13° x 17°
	<b>Allgemeines</b>		
Bildgröße	2048 Pixel x 1536 Pixel		
Pixelgröße	3,2 µm x 3,2 µm		
Sensorgöße	6,55 mm x 4,92 mm		

Wie eingangs erwähnt, weist die Optik durch den Aufbau aus asphärisch gekrümmten Spiegeln eine starke asymmetrische Verzeichnung auf. Die Beispielbilder in Abbildung 3 zeigen, dass die Verzeichnung beim Weitwinkelobjektiv am stärksten ausgeprägt ist. Gelingt es, die Verzeichnung mit einem geeigneten geometrischen Modell zu modellieren,

können mit dem neuen Kamerasystem Anwendungen abgedeckt werden, die bisher nur mit mehreren Kameras, deren Optik auf den jeweiligen Spektralbereich optimiert ist, realisiert werden konnten.



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

## 2 Geometrische Modelle

Die Bildentstehung bei einer Spiegelkamera unterscheidet sich physikalisch grundlegend von der Bildentstehung bei linsenbasierten Optiken. Grundlage für die Kalibrierung der reflektiven Optik soll trotzdem das mathematische Modell der Zentralperspektive sein, damit Standardwerkzeuge der Photogrammetrie bei der Auswertung der Aufnahmen zum Einsatz kommen können. Bei der Kalibrierung herkömmlicher refraktiver Optiken wird die Abweichung der realen Kamera vom Idealmodell der Zentralperspektive durch Zusatzparameter, häufig die Brown-Parameter (BROWN 1971), berücksichtigt. Analog soll bei der Spiegelkamera vorgegangen werden. Ziel ist es, das mathematische Modell der Zentralperspektive mit Hilfe geeigneter Zusatzparameter so zu erweitern, dass es für die Kalibrierung einer Spiegelkamera eingesetzt werden kann.

Als Zusatzparametersätze kommen physikalische Parameter, Kombinationen mit den Polynommodellen von Ebner und Grün (RICHTER 2012a), reine Polynome (RICHTER 2012b) und Fourierreihen in Frage. Nachfolgend werden die verschiedenen Modellvarianten sowie Methoden zur Modelloptimierung vorgestellt.

### 2.1 Physikalische Parameter und Kombinationen

Die Entwicklung der physikalischen Zusatzparameter geht auf D. C. Brown (BROWN 1971) zurück, der mit seinen Parametern radialsymmetrische, radial-asymmetrische und tangentielle Verzeichnung beschreibt. Der Parametersatz wird in der Regel um zwei Parameter zur Modellierung von Affinität und Scherung erweitert. Stellt man die Funktion der Verzeichnungsparameter in Abhängigkeit der verwendeten Bildpunkte dar, ergibt sich folgendes Modell:

Zentralperspektive mit Brown Parametern:

$$\begin{aligned} (x, y) &= (x_h, y_h) + f_{Koll} \\ (x', y') &= (x, y) + f_{Brown}(x, y) \end{aligned} \quad (1)$$

In dieser Darstellung sind  $(x', y')$  die korrigierten Bildkoordinaten,  $f_{Koll}$  die Funktion der Kollinearitätsgleichung und  $(x_h, y_h)$  der Hauptpunkt. Die auf Polynomen basierenden Zusatzparameter von Ebner (EBNER, 1976) und Grün (GRÜN, 1978) sind eigentlich für die Luftbildphotogrammetrie gedacht, können aber für unsere Zwecke modifiziert werden. In Kombination mit den Brown-Parametern ergeben sich folgende Modellvarianten (RICHTER 2012a):

Zentralperspektive mit Brown und Ebner Parametern:

$$\begin{aligned} (x_b, y_b) &= f_{Koll} \\ (x', y') &= (x, y) + f_{Brown}(x_b, y_b) + f_{Ebner}(x, y) \end{aligned} \quad (2)$$

Zentralperspektive mit Brown und Grün Parametern:

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

Eine Modellbesonderheit ist, dass in die Berechnung der Brown Parameter nur die unkorrigierten Bildkoordinaten eingehen.

## 2.2 Polynome

Die Kamerakalibrierung kann auch als mathematisches Funktionsapproximationsproblem angesehen werden. Nach dem Weierstraß Theorem kann jede Funktion mit beliebiger Genauigkeit durch Polynome ausreichend hohen Grades approximiert werden. Unabhängig vom verwendeten Polynomansatz wird die Zentralperspektive folgendermaßen um die Polynomparameter erweitert:

Zentralperspektive mit Polynomparametern:

$$(x', y') = (x, y) + f_{Polynomparameter}(x, y) \quad (4)$$

Bei den Zusatzparametersätzen von Ebner und Grün handelt es sich um orthogonale bivariate Polynome zweiter bzw. vierter Ordnung. In TANG (2012a) wird eine neue Gruppe von Zusatzparametern vorgestellt, die auf orthogonalen Legendreschen Polynomen basiert (Gleichung 5) und als übergeordnete Verallgemeinerung der Ebner bzw. Grün Parameter angesehen werden kann. Es ergibt sich eine weitere Modellvariante, wobei Legendresche Polynome 5. Grades verwendet wurden, was einer Anzahl von 66 zusätzlichen Parametern entspricht.

$$\begin{aligned} L_0(x) &= 1 & L_1(x) &= x \\ L_2(x) &= \frac{1}{2}(3x^2 - 1) & L_3(x) &= \frac{1}{2}(5x^3 - 3x) \\ L_4(x) &= \frac{1}{8}(35x^4 - 30x^2 + 3) & L_5(x) &= \frac{1}{8}(63x^5 - 70x^3 + 15x) \end{aligned} \quad (5)$$

Zu beachten ist, dass einige Parameter auf Grund großer Korrelationen untereinander ausgeschlossen werden müssen. Außerdem ist eine Skalierung der Bildkoordinaten erforderlich, da die Polynome nur im Intervall  $[-1, 1]$  definiert sind. Alternativ zu den Legendre Polynomen können auch Tschebyscheff Polynome, wie sie in ABRAHAM (1997) zum Einsatz kommen, verwendet werden.

### 2.3 Fourierreihen

Anstelle von algebraischen Polynomen können auch Fourierreihen zur Funktionsapproximation genutzt werden. Das Fourier-Theorem besagt analog zum Weierstraß Theorem, dass jede beliebige zweidimensionale Funktion durch die Kombination von bivariaten Fourierreihen ausreichend hohen Grades approximiert werden kann. In TANG (2012b) wird ein auf Fourierreihen 2. Ordnung basierender Zusatzparametersatz vorgestellt, der aus 48 Parametern besteht. Da die Verzeichnung des reflektiven Kamerasystems relativ komplex ist, mussten zur Modellierung Fourierreihen 4. Ordnung verwendet werden, wodurch die Anzahl der Modellparameter auf 160 stieg.

$$(x', y') = (x, y) + f_{\text{Fourier}}(x, y) \tag{6}$$

Im Gegensatz zu den Legendre Parametern müssen bei den Fourier Parametern keinerlei Parameter eliminiert werden. Außerdem sind die Parameter für die Verzeichnungskorrektur in x komplett unabhängig von denen für die Verzeichnungskorrektur in y. Aus mathematischer Sicht sind die Fourier Parameter somit zu bevorzugen.

### 2.4 Modelloptimierung

Die oben vorgestellten Modellvarianten lassen sich weiter optimieren, indem nicht signifikante Parameter ausgeschlossen werden. Jeder Parameter wird mit Hilfe eines lokalen Hypothesentests auf Signifikanz getestet. Ein Parameter gilt als signifikant, wenn das Verhältnis aus Parameterwert und Standardabweichung des Parameters größer als der Tabellenwert der t-Verteilung für eine bestimmte statistische Sicherheit ist. Zur Reduktion der Modellparameter wurden zwei Vorgehensweisen getestet, die schrittweise Reduktion und die schrittweise Erweiterung um einzelne Parameter. Bei der ersten Variante wird nach jeder Ausgleichung der Parameter mit der geringsten Signifikanz aus der Liste der zu schätzenden Parameter entfernt, solange bis keine nicht-signifikanten Parameter mehr gefunden werden. Bei der zweiten Variante werden die Parameter einzeln eingeschaltet und nach und nach die Parameter mit der größten Signifikanz zum Modell hinzugenommen. Je nachdem auf welche Art und Weise die Modelloptimierung erfolgt, ergeben sich unterschiedliche Parametrisierungen und Standardabweichungen. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Modelloptimierung für die Legendre Parameter am Beispiel der Normalwinkelkamera.

**Tabelle 2:** Modelloptimierung Legendre Parameter Normalwinkelkamera

	<b>Reduktion um Parameter</b>	<b>Erweiterung um Parameter</b>
Parameteranzahl	29	22
Parametersatz	1-8, 15, 17, 19, 28, 33, 36, 38-41, 43, 45-47, 49, 51-52, 54, 57, 59, 63	1-8, 15, 17, 19, 36, 38, 40, 41,43,45,47,51,55,57,60
$\sigma_0$ in Pixel	0,075	0,081

Ursache für die unterschiedliche Anzahl der Parameter ist, dass sich Verzeichnungseffekte sowohl durch Parametergruppen als auch durch Einzelparameter gleichermaßen modellieren lassen. Bei der schrittweisen Reduktion setzten sich eher Parametergruppen durch, bei der schrittweisen Erweiterung hingegen Einzelparameter. Für die Optimierung aller Mo-

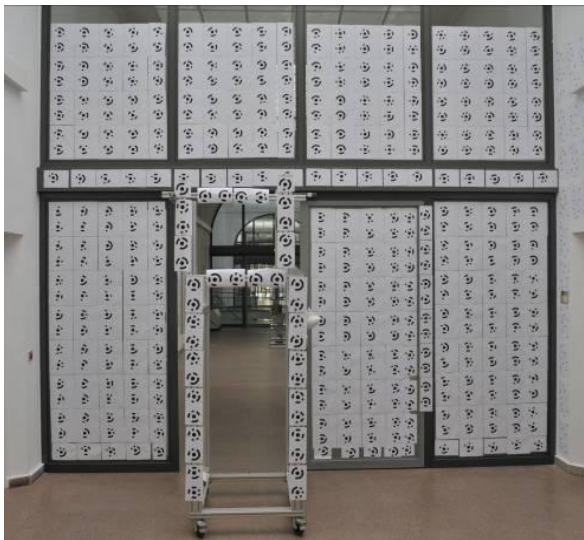
dellvarianten wurde die erste Methode gewählt, da sie sich leichter automatisieren lässt. Eine dritte Option, die allerdings noch nicht umgesetzt wurde, ist der Test einer großen Anzahl zufällig ausgewählter Parameterkonfigurationen. Dieses Verfahren könnte auch bei der Suche nach einer funktionierenden Grundkonfiguration, mit der die schrittweise Reduktion der Parameter begonnen werden kann, behilflich sein. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Modelloptimierung für alle Modellvarianten zusammengestellt, wobei  $n$  die Anzahl der Modellparameter vor und  $n_{\text{opt}}$  die Anzahl der Modellparameter nach der Optimierung ist.

**Tabelle 3:** Übersicht Modelloptimierung

Modell	$n$	$n_{\text{opt}}$	Modell	$n$	$n_{\text{opt}}$
Brown	7	6	Grün	44	31
Brown+Ebner	19	14	Legendre	66	40
Brown+Grün	51	34	Tschebyscheff	66	43
Ebner	12	9	Fourier	160	100

### 3 Testfeld- und Selbstkalibrierung

Um zu prüfen inwieweit die verschiedenen Zusatzparametersätze in der Lage sind das mathematische Modell der Zentralperspektive an die physikalische Realität der Spiegelkamera anzupassen, wurde ein geeignetes Testfeld angelegt (Abbildung 4) und mit allen drei Kameras aufgenommen. Zunächst wurden die unterschiedlichen geometrischen Modelle in einen Rückwärtsschnitt implementiert und mit Einzelaufnahmen Testfeldkalibrierungen durchgeführt. Anschließend wurden die Modelle in eine Bündelblockausgleichung integriert und mit konvergenten Bildverbänden Selbstkalibrierungen durchgeführt.



**Abb. 4:** Testfeld mit 3D-Objekt

**Tabelle 4:** Standardabweichung der Gewichtseinheit  $\sigma_0$  in Pixel

Modell	Rückwärtsschnitt			Bündelblockausgleichung		
	WW	NW	SW	WW	NW	SW
Brown	0,81	0,59	0,13	0,74	0,41	0,12
Brown+Ebner	0,20	0,32	0,13	0,19	0,12	0,14
Brown+Grün	0,14	0,15	0,10	0,16	0,09	0,07
Ebner	4,77	3,51	0,76	2,07	1,72	0,42
Grün	0,15	0,11	0,07	0,13	0,10	0,06
Legendre	0,09	0,06	0,05	0,09	0,07	0,05
Tschebyscheff	0,13	0,06	0,05	0,13	0,07	0,05
Fourier	0,07	0,11	0,08	0,07	0,10	0,08

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse von Rückwärtsschnitt und Bündelblockausgleichung zusammengestellt. Anhand der Standardabweichung der Gewichtseinheit ist eine erste Beurteilung der Parametersätze möglich. Allgemein wird ersichtlich, dass die Durchführung einer Selbstkalibrierung einen deutlichen Zugewinn an Genauigkeit liefert. Grundsätzlich lässt sich außerdem festhalten, dass die Modelle von Brown und Ebner nicht in der Lage sind die Verzeichnung der Spiegeloptik zufriedenstellend zu modellieren. Die Kombinationen Brown+Ebner und Brown+Grün bieten zwar ein größeres Genauigkeitspotential, wurden jedoch verworfen, da Bildhauptpunkt und einer der Orientierungswinkel nicht korrekt geschätzt werden (RICHTER 2012b). Für die übrigen geometrischen Modelle ergeben sich Standardabweichungen im Bereich von 0,05 bis 0,13 Pixeln. Abschließend muss die Frage geklärt werden, welches der verbliebenen Modelle für die Spiegelkameras am besten geeignet ist. Die Wahl ausschließlich anhand der Standardabweichung der Gewichtseinheit zu treffen ist unzureichend. Nachfolgend werden geeignete Auswahlkriterien diskutiert.

## 4 Kriterien zur Modellwahl

Um bei der Entscheidung für ein Modell die optimale Auswahl zu treffen, können neben Standardabweichung, Parameteranzahl, Rechenaufwand und Konvergenzgeschwindigkeit die in ABRAHAM (1997) vorgestellten Kriterien zu Rate gezogen werden: Die aus der Kodierungstheorie abgeleitete minimale Beschreibungslänge und die Präzision der 3D - Rekonstruktion. Die minimale Beschreibungslänge (Minimum Description Length MDL) charakterisiert, wie effizient das geometrische Modell die vorliegenden Daten beschreibt. Je kleiner der Wert für MDL ist, desto besser ist das Modell geeignet (ABRAHAM 1997).

$$MDL = \frac{k}{2} \cdot \log_2(n) + \frac{v^T P v}{2 \log_e(2) \cdot \sigma_0^2} \quad (7)$$

In die Berechnung gehen die Anzahl der Modellparameter  $k$ , die Anzahl der Beobachtungen  $n$ , die Quadratsumme der Verbesserungen  $v^T P v$  sowie die Punktmessgenauigkeit im Bild  $\sigma_0^2$  ein. Es werden also Komplexität des Modells und erreichbare Genauigkeit gegen-

einander abgewogen. Bei komplexen Modellen, wie z.B. den Fourierparametern, ist der erste Summand durch die höhere Anzahl an Modellparametern größer als bei einfachen Modellen. Dafür werden die Daten besser beschrieben und der zweite Summand fällt entsprechend kleiner aus.

Die Präzision der 3D-Rekonstruktion wird mit Hilfe der Kovarianzmatrix der Objektpunktkoordinaten beurteilt. Da die Präzision der Orientierungsparameter in diesem Fall nicht von Interesse ist, werden die Kovarianzen der Objektpunktkoordinaten als Teilmatrix aus der gesamten Kovarianzmatrix herausgelöst. Sollen verschiedene 3D-Rekonstruktionen verglichen werden, müssen sie sich auf ein einheitliches Koordinatensystem beziehen. Andernfalls ist eine S-Transformation nötig (NIEMEIER 2008). Um eine Aussage zur Präzision zu treffen, wird die Kovarianzmatrix  $\Sigma_{kk}$  mit einer individuell festgelegten Kriterien-Matrix H verglichen, in der die Genauigkeitsansprüche festgesetzt sind (ABRAHAM 1997).

$$K = H^{-1/2} \Sigma_{kk} H^{-1/2} \quad (8)$$

Dabei wird der größte Eigenwert der Matrix K  $\lambda_{\max}(K)$  untersucht. Die beste Präzision der 3D-Rekonstruktion liefert das Modell, bei dem  $\lambda_{\max}(K)$  minimal wird. Tabelle 5 enthält eine Übersicht der vorgestellten Kriterien für alle drei Kameras, wobei die kleinsten Werte jeweils hervorgehoben sind. Die kleinste minimale Beschreibungslänge tritt für alle drei Kameras beim Modell mit Grünparametern auf. Die Werte bei den Modellen mit Legendre- bzw. Tschebyscheffparametern liegen dicht beieinander. Weit abgeschlagen ist das Modell mit Fourierparametern. Die Komplexität des Modells mit 100 Parametern wird nicht durch die erreichbare Genauigkeit gerechtfertigt.

**Tabelle 5:** Übersicht minimale Beschreibungslänge und Präzision der 3D - Rekonstruktion

Modell	MDL			$\lambda_{\max}$		
	WW	NW	SW	WW	NW	SW
Grün	<b>189</b>	<b>184</b>	<b>161</b>	0,00177	0,00066	0,00047
Legendre	251	236	206	0,00121	<b>0,00046</b>	<b>0,00038</b>
Tschebyscheff	258	253	224	0,00169	<b>0,00046</b>	<b>0,00038</b>
Fourier	553	588	362	<b>0,00093</b>	0,00065	0,00059

Bei der Präzision der 3D-Rekonstruktion schneiden zumindest bei der Normalwinkel- und der Schmalwinkelkamera die Modelle mit Legendre- und Tschebyscheffparametern am besten ab. Berücksichtigt man auch die Standardabweichungen der Gewichtseinheit, so ist das Modell mit Legendreparametern am besten zur Kalibrierung des reflektiven Kamerasystems geeignet. Abbildung 5 zeigt die mit dem Modell von Legendre entzeichneten Beispielbilder.



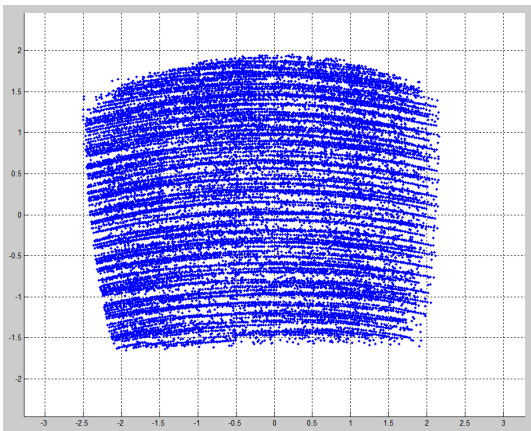


**Abb. 5:** Beispielbilder entzeichnet (Weitwinkel, Normalwinkel, Schmalwinkel)

## 5 Finite Elemente Methode

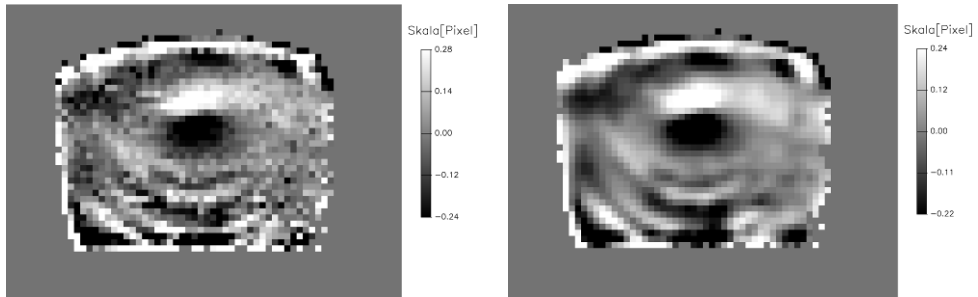
Mit dem oben vorgestellten Modell mit Legendreparametern lässt sich die Verzeichnung des reflektiven Kamerasystems auf unter  $\frac{1}{10}$  Pixel korrigieren. Es verbleiben lokale Verzeichnungseffekte, die sich nicht mit globalen Parametern modellieren lassen, sondern mit der Finite Elemente Methode (FEM) berücksichtigt werden sollen. Lokale Verzeichnungseffekte entstehen durch lokale Oberflächendeformationen der Spiegel. Solche Deformationen treten selbstverständlich auch bei Linsen auf. Da die Bildentstehung bei einer Spiegelkamera durch Reflexion anstatt durch Brechung erfolgt, führen Abweichungen von der idealen Form bei Spiegeln jedoch zu wesentlich größeren lokalen Verzeichnungseffekten als bei Linsen.

Wie in LUHMANN (2009) vorgeschlagen, wird ein rasterförmiges Korrekturgitter entsprechend der FEM definiert. Dabei wurden verschiedene Gitterweiten (128, 64, 32, 20 Pixel) analysiert. Die Stützpunkte des Gitters enthalten die Korrekturwerte, mit denen beliebige Bildpunktmessungen korrigiert werden können. Um das Gitter mit Werten zu füllen, werden die Verbesserungen nach der Ausgleichung zu einem regelmäßigen Raster mit der gewünschten Gitterweite interpoliert. Damit sich auch bei einer geringen Gitterweite möglichst in jedem Gitterelement Messpunkte befinden, wurde ein extrem dichter Bildverband aufgenommen und zu einem Gesamtbild zusammengefasst (Abbildung 6).



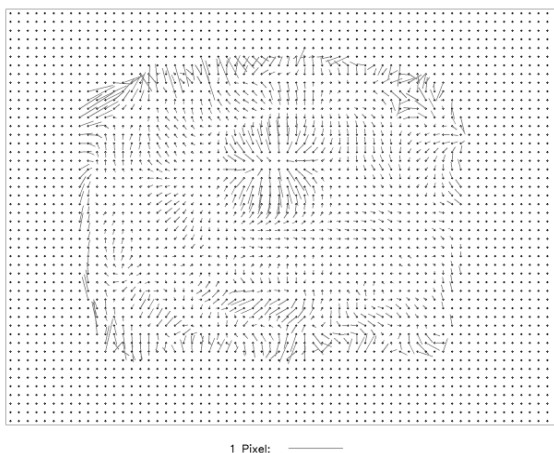
**Abb. 6:** Bildpunktmessungen Weitwinkelkamera im Gesamtbild

Die Interpolation erfolgt zum einen über eine einfache vermittelnde Ausgleichung der Verbesserungen der Messpunkte, die in ein Gitterelement fallen. Der Abstand der Punkte zur Mitte des Gitterelements wird über die Gewichtung berücksichtigt. Zum anderen kommt die in KRAUS (2000) vorgestellte Methode "Interpolation mit finiten Differenzen" zum Einsatz. Hier werden in die oben beschriebene Ausgleichung Krümmungsbedingungen über je drei Stützpunkte eingeführt, die eine Glättung bewirken und Probleme mit leeren Gitterelementen abfangen. Abbildung 7 zeigt einen Vergleich der beiden Interpolationsmethoden, wobei die Korrekturwerte in den Stützpunkten grauwertcodiert dargestellt sind.



**Abb. 7:** Korrekturgitter in  $y$ , Gitterweite 32 Pixel, links: Interpolation mit einfacher Ausgleichung, rechts: Interpolation mit finiten Differenzen

Das zugehörige Residuenbild für die zweite Interpolationsmethode ist in Abbildung 8 dargestellt. Es sind deutlich lokale Verzeichnungseffekte erkennbar. Der kreisförmige, wellenartige Charakter kann durch Oberflächenfehler verursacht worden sein, wie sie bei der Ultrapräzisionsbearbeitung entstehen. Es sind aber auch laterale Justierungenauigkeiten der Spiegel oder Deformationen des außeraxialen, rotationsunsymmetrischen Spiegels durch dessen Montage in seinem Halter denkbar.



**Abb. 8:** Residuen 2D

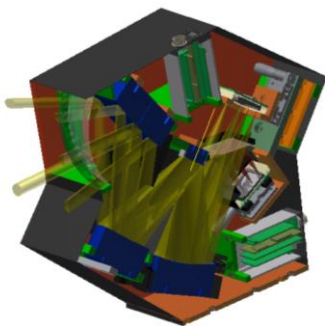
Abschließend soll die Frage geklärt werden, ob sich durch die Verwendung der FEM eine Genauigkeitssteigerung nachweisen lässt. Dazu wurden die Bildpunktmessungen mit Hilfe der verschiedenen dichten Korrekturgitter um die lokalen Verzeichnungseffekte korrigiert und in einer neuen Bündelblockausgleichung ausgewertet. Aus Tabelle 6 kann entnommen werden, dass die resultierenden Standardabweichungen für alle Varianten unter dem Referenzwert  $\sigma_0=0,13$  Pixel für die Ausgleichung ohne FEM-Korrektur liegen. Die Ergebnisse zeigen, dass die zweite Interpolationsmethode zu bevorzugen ist, da sie weniger empfindlich auf zufällige Fehler reagiert, die besonders bei sehr kleinen Gitterweiten ins Gewicht fallen.

**Tabelle 6:** Standardabweichungen BBA mit FEM-Korrektur in Pixel

Gitterweite	Interpolation mit einfacher Ausgleichung	Interpolation mit finiten Differenzen
128	0,13	0,12
64	0,12	0,11
32	0,10	0,10
20	0,11	0,09

## 6 Ausblick

Ausgehend von den Erfahrungen mit den eingangs vorgestellten Prototypen wird derzeit ein voll-reflektives, spektral breitbandiges, hochauflösendes, weitwinkliges Kamerasystem auf Basis eines 36 x 24 mm Sensors mit 4008 x 2672 Pixeln konzipiert. Es eignet sich besonders für photogrammetrische Aufgabenstellungen im Nahbereich mit hohem Genauigkeitsanspruch. Um einen breiten Spektralbereich abzudecken, wird dabei der Strahlengang mit Hilfe einer Strahlteilerplatte aufgespalten und auf zwei Vollformatsensoren gelenkt, die unterschiedliche Spektralbereiche aufnehmen (Abbildung 9). Zur Kalibrierung sollen die entwickelten geometrischen Modelle auf das neue Kamerasystem übertragen werden.



**Abb. 9:** Design Dualband Vollformatkamera

## Literatur

- Abraham, S., Förstner, W. (1997): *Zur automatischen Modellwahl bei der Kalibrierung von CCD-Kameras*. 19.DAGM-Symposium "Mustererkennung 1997", Springer Verlag, pp.147-155
- Brown, D. C. (1971): *Close-range camera calibration*. Photogrammetric Engineering 37(8), pp. 855–866
- Ebner, H. (1976): *Self-calibrating block adjustment*. Proc. XIIIth Congress of the ISPRS, Commission III
- Grün, A. (1978): *Experiences with the self-calibrating bundle adjustment*. Proc. ACSM-ASP Convention, Washington, D. C.
- Fischbach, J. (2012): *Reflecting Microscope Objectives*. [http://www.lot-qd.de/files/downloads/davin/eu/Reflecting\\_Microscope\\_Objectives\\_eu.pdf](http://www.lot-qd.de/files/downloads/davin/eu/Reflecting_Microscope_Objectives_eu.pdf)
- Kraus, K. (2000): "Photogrammetrie, Band 3, Topographische Informationssysteme", Dümmler Verlag, Bonn
- Löffler-Mang, M. (2012): "Optische Sensorik", Vieweg+Teubner, Wiesbaden
- Luhmann, T. (2009): "Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie", Habilitationsschrift
- Niemeier, W. (2008): "Ausgleichsrechnung - Statistische Auswertemethoden", de Gruyter, Berlin
- Richter, K., Seidl, K., Schneider, D., Mader, D., Maas, H.-G. (2012a): *Entwicklung eines geometrischen Modells für ein voll-reflektives Kamerasystem für Nahbereichsanwendungen*. 32. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation in Potsdam, DGPF Tagungsband 21/2012
- Richter, K., Mader D. (2012b): *Development of a geometric model for an all-reflective camera lens system for multispectral image acquisition*. Entwicklerforum Geodäsie und Geoinformationstechnik 2012, Shaker Verlag
- Tang, R. (2012a): *New mathematical self-calibration models in aerial photogrammetry*. 32. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation in Potsdam, DGPF Tagungsband 21/2012
- Tang, R. (2012b): *A rigorous and flexible calibration method for digital airborne camera systems*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B1