

Modellierung der chromatischen Aberration in Bildern digitaler Aufnahmesysteme

THOMAS LUHMANN, HEIDI HASTEDT & WERNER TECKLENBURG, Oldenburg

Keywords: Photogrammetry, digital camera, chromatic aberration, distortion, calibration, accuracy

Summary: *Modeling of chromatic aberration in digital imagery.* Chromatic aberration appears for almost all lenses that are used for digital cameras. It results in visible colour shifts that are most significant with larger imaging angles. The paper deals with the possibility of modeling chromatic aberration for every channel of an RGB colour image. We propose a wave-length dependent camera calibration which yields to a physically proven imaging model. On the one hand, the calibrated parameters can be applied for a colour-corrected resampling of the image. On the other hand, the image coordinates measured in each individual colour channel can be corrected. Up to now, an improvement of the photogrammetric length measurement error cannot be shown. It is subject to further investigations.

Zusammenfassung: Chromatische Aberration existiert für die meisten Objektive, die heute an Digitalkameras eingesetzt werden. Sie macht sich durch sichtbare Farbverschiebungen, insbesondere bei größeren Bildwinkeln, bemerkbar. Der Beitrag befasst sich mit der Möglichkeit, die chromatische Aberration für alle drei in einem Farbbild gespeicherten Kanäle zu modellieren. Dazu wird eine wellenlängenabhängige Kamerakalibrierung vorgeschlagen, die bei geeigneter Konfiguration zu einer physikalisch begründbaren Modellfunktion führt. Die ermittelten Parameter lassen sich zum einen für eine geometrische Farbkorrektur des Bildes verwenden. Zum anderen können die in den einzelnen Kanälen eines RGB-Bildes gemessenen Bildkoordinaten korrigiert werden. Eine positive Auswirkung der Modellierung auf die photogrammetrische Längenmessabweichung lässt sich bisher noch nicht nachweisen und ist weiterhin Gegenstand zukünftiger Untersuchungen.

1 Einführung

Der Beitrag beschäftigt sich mit der Modellierung und Korrektur der chromatischen Aberration in Bildern digitaler Aufnahmesysteme. Ziel der Untersuchungen ist zunächst ein grundlegendes Verständnis der auftretenden Abbildungsfehler, um daraus anschließend ein mathematisches Modell für deren Beschreibung sowie ein Verfahren für die Erfassung und Korrektur der Effekte abzuleiten. Erste Ergebnisse wurden bereits bei HASTEDT et al. (2006) vorgestellt.

Mit der Einführung der ersten höher auflösenden Digitalkameras (Still-Video-Ka-

meras) in den neunziger Jahren standen zunächst nur Schwarz-Weiß-Kameras zur Verfügung, deren Genauigkeitspotential schon früh nachgewiesen worden ist (z. B. PEIPE 1995, SHORTIS & BEYER 1996). Trotz der damals noch zahlreichen technischen Einschränkungen dieser Kameras konnte die volle physikalische Sensorauflösung für die Bildauswertung genutzt werden. Mit der zunehmenden Verbreitung von Digitalkameras im Consumerbereich stieg zum einen die verfügbare Bildauflösung ständig und hat heute bei professionellen Spiegelreflexkameras und digitalen Kamerarückteilen mehr als 20 Megapixel erreicht. Sensoren mit über 40

Megapixel sind bereits angekündigt worden. Zum anderen werden SW-Kameras praktisch gar nicht mehr angeboten, auch wenn sie für messtechnische Zwecke vorteilhaft wären. Im Bereich von digitalen Videokameras mit bis zu 1300×1000 Pixel sind dagegen SW-Sensoren ohne weiteres erhältlich.

Die übliche photogrammetrische Kalibrierung von Aufnahmesystemen erfasst radial-symmetrische Verzeichnung, tangentiale und asymmetrische Verzeichnung (Dezentrierung) sowie Affinität und Scherung des Sensors (Übersicht in LUHMANN 2003). Erweiterte Modellansätze beschäftigen sich z. B. mit der Kalibrierung von Zoom-Objektiven (CRONK et al. 2006), entfernungsabhängiger Verzeichnung (DOLD 1997) sowie bildvarianter Kalibrierung und Sensordeformationen (LUHMANN & TECKLENBURG 2000).

In jüngerer Zeit rücken zunehmend farbabhängige Abbildungsfehler in den Fokus, die in Farbbildern häufig schon mit bloßem Auge erkennbar sind. Hierbei wird vor allem das Ziel verfolgt, neue aberrationsfreie Farbbilder zu erzeugen, z. B. für hochqualitative 3D-Visualisierungen (KAUFMANN & LADSTÄTTER 2005) oder multispektrale Klassifizierungen (SCHWALBE et al. 2006). In der Industriephotogrammetrie geht man dabei eher den Weg, aus einem Farbbild nur einen Kanal auszuwerten, i. d. R. den grünen Kanal oder den Intensitätskanal nach einer IHS-Transformation. Radiometrische und geometrische Effekte, die durch Objektiv und Sensor (z. B. Farbfilter) entstehen, werden hierbei üblicherweise vernachlässigt.

Die chromatische Aberration wird in zwei wellenlängenabhängige Effekte unterteilt.

Während der Farblängsfehler zu unterschiedlichen Brennweiten und Fokusebenen führt, verursacht der Farbquerfehler Maßstabsänderungen in Abhängigkeit des Bildradius (Abstand eines Punktes von der optischen Achse). Ebenso ist die radial-symmetrische Verzeichnung von der Wellenlänge abhängig, da sie im Wesentlichen durch Brechungsänderungen im Objektiv und durch Öffnungsdurchmesser und Position der Blende bestimmt wird.

Dieser Beitrag befasst sich mit Möglichkeiten zur Modellierung, Erfassung und Korrektur der chromatischen Aberration. Es wird weiterhin untersucht, wie sich die ermittelten Korrekturmodelle auf innere und äußere Genauigkeit einer photogrammetrischen 3D-Punktbestimmung im Rahmen von Bündelausgleichungen auswirken.

2 Farbdigitalkameras und Bildsensoren

Ein digitales Farbbild besteht bekanntermaßen aus drei Kanälen in den Grundfarben Rot, Grün, Blau (RGB). Gängige Kameras liefern dabei entweder Bilder im Rohformat, d. h. unkomprimierte Bilddaten in voller geometrischer und radiometrischer Auflösung, oder einem standardisierten Bildformat (TIFF, JPEG), das verlustfreie oder verlustbehaftete Kompressionsverfahren durchlaufen hat.

Farbdigitalkameras arbeiten in der Regel nach einem der beiden folgenden Prinzipien (Übersicht in LUHMANN 2003):

- a) Trennung der RGB-Information durch Farbfiltermasken, die unmittelbar vor der lichtempfindlichen Sensorfläche angebracht sind;

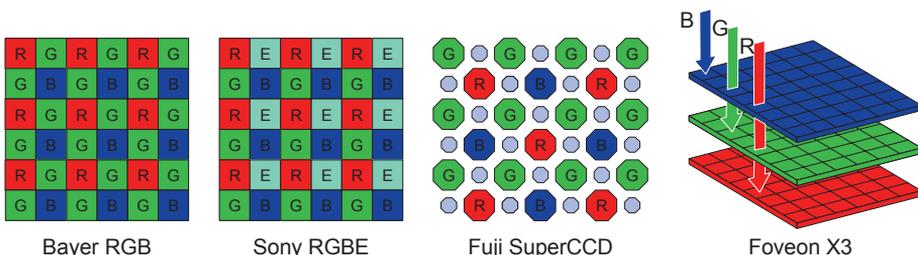


Abb. 1: Layout verschiedener Farbsensoren.

- b) Trennung der RGB-Information in einem Echtfarbsensor, der analog zum analogen Farbfilm drei Halbleiterschichten für je eine Grundfarbe besitzt.

Bei der unter a) genannten Möglichkeit werden Filtermasken eingesetzt, die benachbarte Pixel nur für jeweils einen Wellenlängenbereich sensibilisieren. Die bekannteste Filtermaske ist das sog. Bayer-Muster, das in einer 2×2 -Pixelumgebung ein Pixel für rot, ein Pixel für blau und zwei Pixel für grün aktiviert (siehe Abb. 1). Die verstärkte Betonung für grün ist dadurch begründet, dass das menschliche Auge für gelbgrüne Farben am empfindlichsten reagiert. In jüngerer Zeit werden auch Kameras angeboten, deren Farbfiltermasken für die Grundfarben rot, grün, blau und cyan (Emerald) ausgelegt sind. Neben der regelmäßigen Anordnung von Farbpixeln in Zeilen und Spalten existieren bei den Kameras der Firma Fuji auch Sensoren mit unterschiedlich großen oder diagonal angeordneten Sensorelementen.

Eine ganz andere Technologie wird mit den Foveon-Sensoren angeboten, die über drei übereinander liegenden Farbschichten verfügen. Hierbei erhält jedes Pixel an einer Stelle x, y per se einen eigenen RGB-Wert, so dass das geometrische Auflösungsvermögen dieser Sensoren etwa um den Faktor 2

besser ist als das herkömmlicher Farbsensoren (LYON & HUBEL 2002). Diese Sensoren sind jedoch heute nur bis zu einer Anzahl von 2268×1512 Pixel erhältlich.

3 Optische Abbildungsfehler

3.1 Radial-symmetrische Verzeichnung

Verzeichnung entsteht in praktisch jedem Objektiv durch Brechungsänderungen (Dispersion) an asymmetrisch aufgebauten Linsensystemen sowie durch Einbau einer Blende. Je nach Position der Blende entsteht tonnen- oder kissenförmige radial-symmetrische Verzeichnung; eine zentral angebrachte Blende in einem symmetrisch aufgebauten Objektiv führt zu einer praktisch verzeichnungsfreien (orthoskopischen) Abbildung (siehe Abb. 2). Da Brechungsänderungen wellenlängenabhängig sind, ist somit auch die Verzeichnung eine Funktion der Wellenlänge (Übersicht in LUHMANN 2003).

Neben der radial-symmetrischen Verzeichnung wird der Einfluss nicht zentrierter Linsen durch tangentiale und asymmetrische Korrekturfunktionen erfasst. Abbildungsfehler in der Sensorebene oder durch elektronische Effekte werden mit Parametern für Affinität und Scherung modelliert.

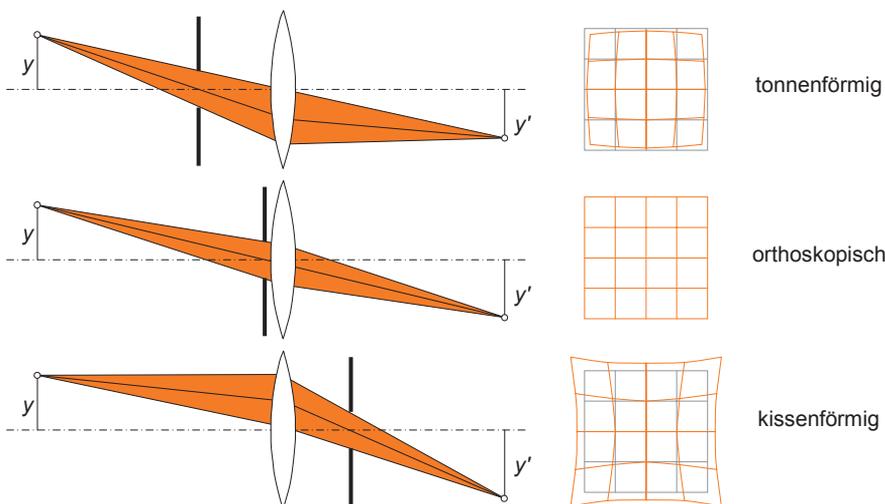


Abb. 2: Radial-symmetrische Verzeichnung in Abhängigkeit der Blendenposition.

Die photogrammetrischen Korrekturpolynome für die radial-symmetrische Verzerrung (A_1, A_2, A_3 bzw. K_1, K_2, K_3) werden üblicherweise im Rahmen einer Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung simultan mit den übrigen Kameraparametern bestimmt. Je nach gewählter Aufnahmeanordnung und Form des Objektpunktfeldes werden die Kameraparameter mit unterschiedlicher Genauigkeit und Zuverlässigkeit bestimmt. Korrelationen zwischen den ermittelten Kameraparametern sind dabei nicht immer zu vermeiden. Sie spielen allerdings nur dann eine Rolle, wenn die kalibrierten Parameter an eine andere Anwendung ohne zugehörige Kovarianzmatrix weitergegeben werden.

In jeder Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung existieren weiterhin numerische Korrelationen zwischen den Parametern der inneren und äußeren Orientierung, deren Größenordnung unter anderem von der gewählten Aufnahmeconfiguration und der verfügbaren Objektinformation abhängt. Sie führen dazu, dass z. B. die Lage des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem (c, x_0, y_0) teilweise durch entsprechende Verschiebung der äußeren Orientierungsparameter X_0, Y_0, Z_0 beschrieben werden kann.

3.2 Chromatische Aberration

Die chromatische Aberration entsteht durch den in den einzelnen Wellenlängen unterschiedlichen Strahlengang durch ein Objektiv. Der *Farblängsfehler* (longitudinale chromatische Aberration) führt dazu, dass jede Wellenlänge einen eigenen Brennpunkt besitzt. Ein abgebildeter weißer Objektpunkt wird im Bild in unterschiedlichen Bildweiten abgebildet, so dass keine optimale Fokussierung möglich ist (siehe Abb. 3). Je nach Qualität eines Objektivs kann dieser Effekt durch unterschiedliche Linsentypen und Beschichtungen reduziert werden. Wird die Abbildungsebene auf eine mittlere Wellenlänge (z. B. grün) gelegt, so entstehen im blauen und im roten Bereich Abbildungsfehler, die im Mittel auf ein Minimum reduziert werden (Übersichten in PEDROTTI et

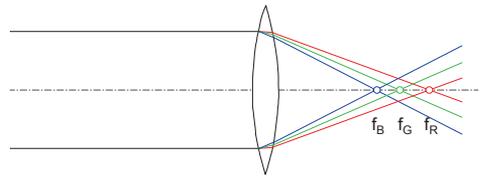


Abb. 3: Farblängsfehler.

al. 2002, SCHRÖDER 1990). So genannte Achromate sind Objektive, deren Aufbau so gestaltet ist, dass die chromatische Aberration unter eine sichtbare Größenordnung fällt.

In der Praxis führt chromatische Aberration zu einer schlechteren Schärfeleistung. Werden die in der Nahbereichsphotogrammetrie üblichen weißen Zielmarken verwendet, führt der Farblängsfehler theoretisch nicht zu einer Verschiebung des Zielmarkenzentrums, da weißes Licht alle Wellenlängen enthält. Wird jedoch mit farbigen, z. B. roten und grünen Zielmarken gearbeitet (siehe z. B. CRONK et al. 2006), werden diese Punkte im Farbbild unterschiedlich stark versetzt abgebildet.

Der *Farbquerfehler* (Farbvergrößerungsfehler oder transversale chromatische Aberration) führt dazu, dass ein Objekt mit unterschiedlichem Abbildungsmaßstab in Abhängigkeit vom Bildradius abgebildet wird. Für monochromatisches Licht entspricht der Effekt der radial-symmetrischen Verzerrung, für polychromatisches Licht führt der Farbquerfehler zu einer radial-wirkenden Farbverschiebung.

Der Effekt kann in digitalen Farbbildern leicht gezeigt werden. Abb. 4a zeigt die mangelnde Abbildungsqualität weißer Zielmarken in einem Farbbild. Deutlich sind Farbfehler an den Kanten der Marken erkennbar, wie sie auch bei jeder anderen Objektkante entsprechend auftreten werden. Abb. 4b zeigt den grünen Kanal mit einer hinreichenden Bildqualität, wie sie für eine photogrammetrische Punktmessung in der Regel ausreicht. Das Differenzbild in Abb. 4c macht die Farbverschiebung zwischen grünem und rotem Kanal deutlich.

Die dargestellte Farbverschiebung wirkt sich in farbkanalabhängigen Funktionen

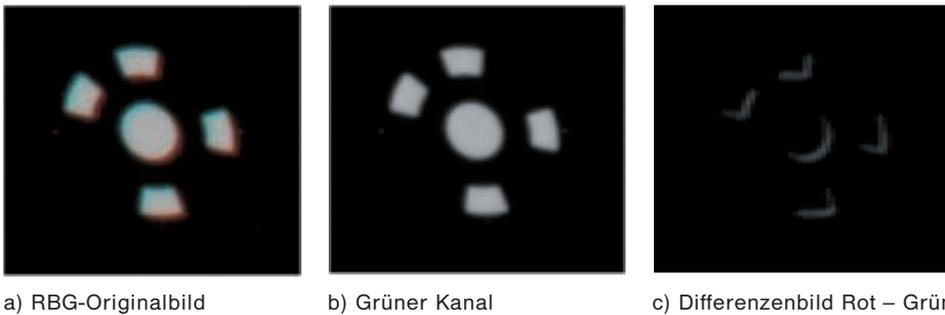


Abb. 4: Farbverschiebung an einer schwarz-weißen Kante.

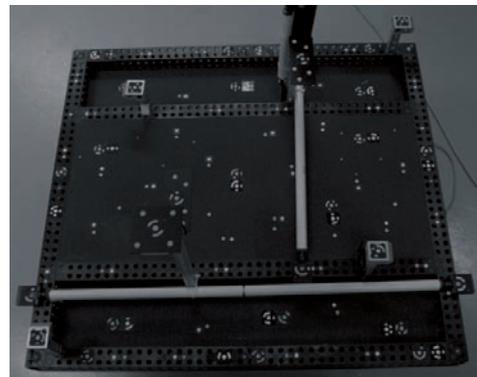
der radial-symmetrischen Verzeichnung aus. Der Effekt wird beispielhaft in Abb. 6 visualisiert. Bei Kenntnis der jeweiligen Farbverschiebung kann das Bild verzeichnungsfrei bzw. aberrationsfrei gerechnet werden. Dazu stehen kommerzielle Näherungslösungen zur Verfügung (z. B. NIKON Capture 4.4 oder Adobe Photoshop CS2). Eine photogrammetrisch fundierte Lösung präsentieren SCHWALBE & MAAS (2006) sowie KAUFMANN & LADSTÄDTER (2005).

4 Untersuchungen

Ziel der folgenden Arbeiten ist zunächst die Erfassung der chromatischen Aberration im Rahmen typischer Testfeldkalibrierungen. Die Versuche werden mit verschiedenen hoch auflösenden Digitalspiegelreflexkameras und verschiedenen Objektiven durchgeführt (Tab. 1). Die Aufnahmen werden an

ebenen sowie an räumlichen Testfeldern erzeugt, für die entweder hinreichend genaue Referenzkoordinaten oder kalibrierte Referenzlängen vorliegen (Abb. 5).

Für die Auswertung werden zunächst Einzelbilder durch Trennung der Farbkanäle erzeugt. In den einzelnen Kanälen sowie in den Farb- und Graustufenbildern erfolgt eine Bildpunktmessung mit anschließender



Tab. 1: Untersuchte Kameras und Objektive.

Kameras	Anzahl Pixel Sensorformat [mm]	Objektive [mm]
Fuji S2 Pro	3040 × 2016 23.3 × 15.6	14, 20, 28
Canon EOS D1 MarkII	4992 × 3328 36.0 × 24.0	35
Nikon D2X	4288 × 2848 23.5 × 15.6	24
Sigma SD10	2268 × 1512 20.7 × 13.8	24

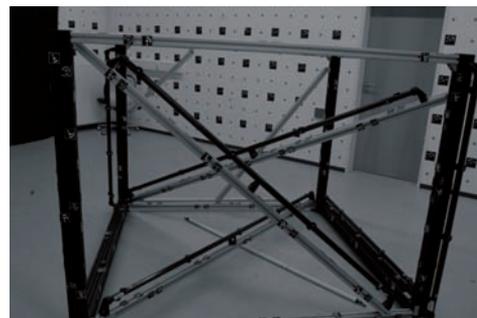


Abb. 5: Ebenes (IAPG) und räumliches Testfeld (AICON).

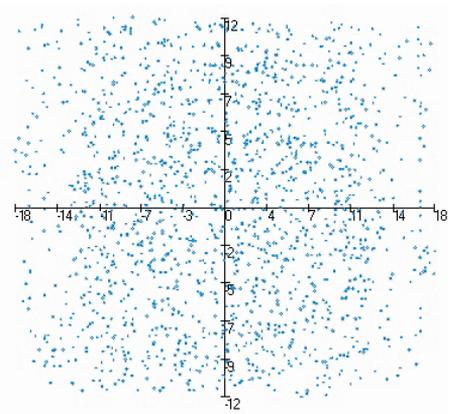
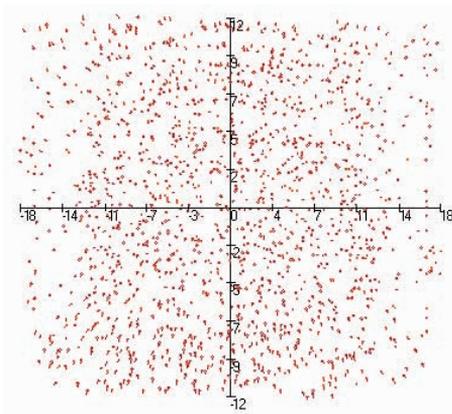
Bündelausgleichung mit dem Programm 3D Studio (AICON). Diesem Schritt schließt sich eine kombinierte Auswertung der in den einzelnen Kanälen erzeugten Bildmessungen mit dem Bündelausgleichungsprogramm Ax.Ori (AXIOS 3D) an. Die äußeren Orientierungen der drei Kanäle werden hier für jeden Aufnahmestandort festgehalten, d. h. sie werden pro Standort nur einmal bestimmt. Zusätzlich werden 3 Kameras jeweils für R, G und B eingeführt. Die Kameraparameter c , x'_0 , y'_0 sowie A_1 , A_2 , A_3 sind variabel definiert. Die tangential-asymmetrische Verzeichnung (B_1 , B_2) sowie Affinität und Scherung (C_1 , C_2) sind fixiert. Die Datumsfestlegung erfolgt durch freie Netz-

ausgleichung über alle Objektpunkte und ggf. über Maßstabsinformationen.

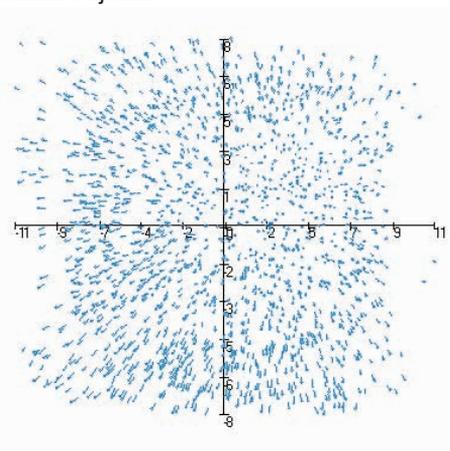
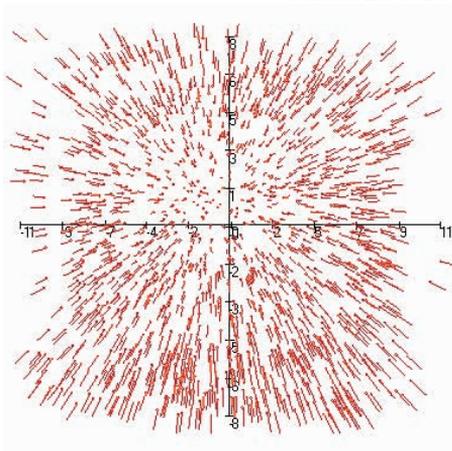
4.1 Farbabhängige Kalibrierung

Die unterschiedlichen Bildmessungen in den drei Farbkanälen werden zunächst als Vektordiagramme dargestellt. Abb. 6 zeigt beispielhaft für zwei Datensätze die Ergebnisse der Bildmessungen im grünen Farbkanal als Verschiebungsvektoren zu korrespondieren Messungen im roten bzw. blauen Kanal.

Während die Darstellungen der Canon EOS D1 mit 35 mm Objektiv praktisch keine systematischen Effekte zeigen, sind bei der Fuji S2 Pro mit 20 mm Objektiv signifikante



Canon EOS D1 mit 35 mm Objektiv



Fuji S2 Pro mit 20 mm Objektiv

Abb. 6: Vektordarstellung der Bildmessungen in R und B gegenüber G-Kanal.

Tab. 2: Kameraparameter bei kombinierter Auswertung (Auswahl).

Kamerakonstante	c_R	c_G	c_B
Canon EOS D1 mit 35 mm	-33.3337	-33.3299	-33.3309
Fuji S2 Pro mit 20 mm	-20.5739	-20.5557	-20.5468
Bildhauptpunkt x'_0	x'_{0R}	x'_{0G}	x'_{0B}
Canon EOS D1 mit 35 mm	-0.0345	-0.0342	-0.0341
Fuji S2 Pro mit 20 mm	0.2812	0.2818	0.2812
Bildhauptpunkt y'_0	y'_{0R}	y'_{0G}	y'_{0B}
Canon EOS D1 mit 35 mm	-0.0494	-0.0493	-0.0490
Fuji S2 Pro mit 20 mm	-0.2080	-0.2095	-0.2105

radial-systematische Abbildungsfehler erkennbar. Sie können in dieser Form auch für die anderen untersuchten Kameras nachgewiesen werden. Die für den roten Kanal nach außen und für den blauen Kanal nach innen weisenden Vektoren entsprechen der physikalischen Theorie und gehen konform mit der Brennweitenänderung nach Abb. 3.

Die Ergebnisse der kombinierten Auswertung bestätigen ebenfalls die in Abb. 3 angegebenen theoretischen Abhängigkeiten der Kamerakonstante vom Farblängsfehler. Bei allen Datensätzen (Tab. 1), außer der Canon, ergeben sich kürzere c_B als c_R . Die Bildhauptpunktkoordinaten sind für alle drei Kanäle identisch, d. h. die theoretisch wellenlängenunabhängige Lage der optischen Achse wird ebenfalls bestätigt.

4.2 Längenmessabweichung

Die Analyse der ausgeglichenen Objektpunktkoordinaten zeigt eine Verbesserung der inneren Genauigkeit um den Faktor 1.7. Der Wert entspricht etwa $\sqrt{3} = 1.73$ und kann auch dadurch erreicht werden, dass die in nur einem Kanal gemessenen Bildkoordinaten dreifach in die Ausgleichung eingeführt werden. Es handelt sich folglich nur um eine scheinbare Genauigkeitssteigerung.

Die RMS-Werte der Objektkoordinaten liegen je nach Kamera und Objektiv zwi-

schen 0.005 mm (Nikon D2X) und 0.04 mm (Fuji S2) bei einem Messvolumen zwischen ca. $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ und $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1.5\text{ m}$. Das innere Genauigkeitsniveau ist also extrem hoch zu bewerten.

Mit dem bei der Firma AICON vorhandenen 3D-Testkörper kann die ISO-konforme Längenmessabweichung gemäß VDI 2634 bestimmt werden. Die dort vorhandenen Referenzlängen sind mit einer Messunsicherheit von etwa $5\text{ }\mu\text{m}$ kalibriert und zertifiziert. Mit einer Nikon D2X und verschiedenen Objektiven (20 mm, 24 mm) wurden Rundum-Bildverbände aufgenommen und nach dem obigen Verfahren ausgewertet. Die ermittelten Längenmessabweichungen liegen bei bis zu 0.1 mm, auch für Auswertungen, in denen nur der grüne Kanal verwendet worden ist.

Entgegen der erhofften Genauigkeitssteigerung ergeben sich keine Veränderungen der erreichten Längenmessabweichung. Berücksichtigt man das ohnehin schon sehr hohe Genauigkeitsniveau der digitalen Photogrammetrie und die Tatsache, dass die Längenmessabweichung 100% aller Messfehler enthält, liegt die Vermutung nahe, dass hier das maximal erreichbare Genauigkeitsniveau bereits erreicht ist.

Der theoretische Grenzwert g_{LME} der Längenmessabweichung einer aus zwei Punkten berechneten Länge, die jeweils die gleiche Standardabweichung s_{XYZ} aufweisen und

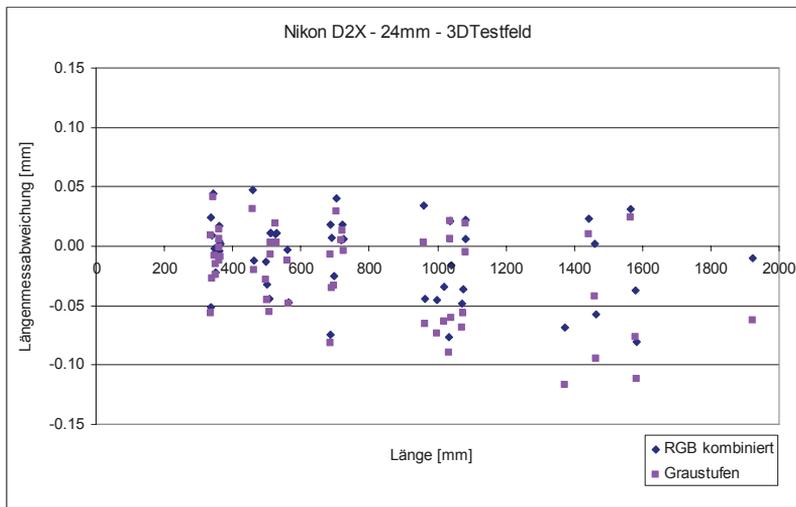


Abb. 7: Diagramm der Längenmessabweichungen für Nikon D2X (24 mm).

mit $3s$ eingehen (Sicherheitswahrscheinlichkeit 99%), ist gegeben durch

$$g_{LME} = 3\sqrt{2} \cdot s_{XYZ} = \sqrt{18} \cdot s_{XYZ}$$

Für das Beispiel eines RMS-Wertes von $s_{XYZ} = 0.02$ mm wird damit ein Grenzwert von $g_{LME} = 0.1$ mm berechnet. Damit werden die praktisch gewonnenen Ergebnisse auch fehlertheoretisch belegt.

5 Zusammenfassung

Grundlage dieser Untersuchung war die Annahme, dass die typische Genauigkeit von professionellen Farbdigitalkameras von ca. 1:100000 (innere Genauigkeit bei signalisierten Bildverbänden, siehe z. B. PEIPE 2005) das vorhandene Potential noch nicht ausschöpft. Bildvariante Kalibrierungen sind in der Lage, während einer Aufnahmeserie auftretende Änderungen der Kamerageometrie zu erfassen (TECKLENBURG & LUHMANN 2000). Die genauere Modellierung der Farbeigenschaften von Kamera und Objektiv lag daher nahe, um die Auswirkungen durch Farbfehler im Objektiv, Farbmasken auf dem Sensor oder kamerainterne Prozessierung genauer zu verstehen.

Die objektivabhängige chromatische Aberration erzeugt signifikant unterschiedliche Bilder in den einzelnen RGB-Kanälen. Der Effekt kann signifikant modelliert werden, wenn in der Bündelausgleichung jeweils drei Kameras für RGB eingeführt werden. Mit Hilfe zusätzlicher Bedingungen für die äußeren Orientierungen dieser Kameras werden die farbabhängigen Kameraparameter entsprechend der physikalischen Theorie bestimmt.

Das ohnehin schon sehr hohe Genauigkeitsniveau bei der Mehrbildmessung signalisierter Punkte wird durch diesen Ansatz nicht signifikant erhöht. Gleichwohl können die ermittelten Kameraparameter für eine exakte geometrische Farbkorrektur eines Bildes genutzt werden.

Literatur

- Cronk, S., FRASER, C.S. & HANLEY, H., 2006: Automatic calibration of colour digital cameras. – The Photogrammetric Record, im Druck.
- DOLD, J., 1997: Ein hybrides photogrammetrisches Industriemeßsystem höchster Genauigkeit und seine Überprüfung. – Schriftenreihe Universität der Bundeswehr München, Heft 54.
- HASTEDT, H., LUHMANN, T. & TECKLENBURG, W., 2006: Zur Nutzung von RGB-Farbkanälen für

- die hochgenaue 3D-Punktbestimmung. – In: LUHMANN (ed.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006, Wichmann Verlag, Heidelberg: 112–121.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R., 2005: Elimination of color fringes in digital photographs caused by lateral chromatic aberration. – XXth International CIPA Symposium 2005.
- LUHMANN, T., 2003: Nahbereichsphotogrammetrie. – Wichmann Verlag, Heidelberg.
- LYON, R. & HUBEL, P., 2002: Eyeing the Camera: Into the Next Century. – IS&T/TSID 10th Color Imaging Conference Proceedings, Scottsdale, Az., USA: 349–355.
- PEDROTTI, F., PEDROTTI, L., BAUSCH, W. & SCHMIDT, H., 2002: Optik für Ingenieure – Grundlagen. – Springer Verlag, Berlin, 846 S.
- PEIPE, J., 1995: Photogrammetric investigation of a 3000 × 2000 pixel high-resolution still-video camera. – ISPRS Intercommission Work-shop „From Pixels to Sequences“, Zürich.
- PEIPE, J., 2005: Entwicklungstendenzen in der digitalen Fotografie. – In: LUHMANN (ed.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. – Wichmann Verlag, Heidelberg: 150–155.
- SCHRÖDER, G., 1990: Technische Optik. – Kamp-rath Reihe, Vogel Verlag, Würzburg.
- SCHWALBE, E. & MAAS, H.-G., 2006: Ein Ansatz zur Elimination der chromatischen Abberation bei der Modellierung und Kalibrierung von FishEye-Aufnahmesystemen. – In: LUHMANN (ed.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. – Wichmann Verlag, Heidelberg: 122–129.
- SHORTIS, M. R. & BEYER, H. A., 1996: Sensor technology for digital photogrammetry and machine vision. – In: ATKINSON (ed.): Close Range Photogrammetry and Machine Vision. – Whittles Publishing: 106–155.
- TECKLENBURG, W. & LUHMANN, T., 2000: Kameramodellierung mit bildvarianten Parametern und Finiten Elementen – Publikationen der DGPF, Band 9.

Anschriften der Autoren:

Prof. Dr.-Ing. THOMAS LUHMANN
Dipl.-Ing. HEIDI HASTEDT
Dipl.-Ing. WERNER TECKLENBURG
Institut für Angewandte Photogrammetrie und
Geoinformatik
FH Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven
Ofener Str. 16, D-26121 Oldenburg
Tel.: 0441-7708-3172, Fax: 0441-7708-3170
e-mail: luhmann@fh-oow.de
heidi.hastedt@fh-oldenburg.de
tecklenburg@fh-oldenburg.de

Manuskript eingereicht: Mai 2006

Angenommen: Juli 2006