

# **Ein Ansatz zur Elimination der chromatischen Aberration bei der Modellierung und Kalibrierung von Fisheye-Aufnahmesystemen**

Ellen SCHWALBE, Hans-Gerd MAAS

## **Zusammenfassung**

Fisheye-Objektive unterscheiden sich in ihrer Abbildungsgeometrie grundsätzlich vom in der Photogrammetrie gebräuchlichen Modell der Zentralperspektive. Hemisphärische Fisheye-Aufnahmen lassen sich durch den Ansatz einer äqui-angularen Abbildung modellieren. Dieses Modell wird erweitert durch Zusatzparameter zur Kompensation von systematischen Fehlern, welche durch Abweichungen der physikalischen Realität des Objektivs vom mathematischen Grundmodell bedingt sind. Eine Testfeldkalibrierung durch räumlichen Rückwärtsschnitt auf Basis des entwickelten Modells ergab für eine hochauflösende Digitalkamera mit Fisheye-Objektiv ein Genauigkeitspotential in der Größenordnung von 0,1 Pixel. Mit dem entwickelten Modell und dem erzielten Genauigkeitspotential können durch Fisheye-Objektive generierte hemisphärische Aufnahmen eine interessante Alternative für eine Reihe photogrammetrischer Anwendungen bilden.

In Fisheye-Aufnahmen hochauflösender Digitalkameras sind Effekte der chromatischen Aberration in Form von Farbsäumen, welche zum Bildrand hin eine Breite von mehr als einem Pixel aufweisen, gut sichtbar. Dies stört neben dem visuellen Eindruck vor allem auch die Anwendung von Verfahren der multispektralen Klassifikation. Zur Kompensation der Effekte der chromatischen Aberration wird das Modell der äqui-angularen Abbildung im Rückwärtsschnitt durch bildkanalvariante Parameter der radial-symmetrischen Verzerrung erweitert, welche eine Transformation aller Farbkanäle in eine gemeinsame Geometrie erlauben.

## **1 Einleitung**

Die Verwendung von Fisheye-Objektiven kann für eine Reihe photogrammetrischer Anwendung eine interessante Option darstellen. Fisheye-Objektive bieten den Vorteil eines  $180^\circ$ -Öffnungswinkels, welcher sich je nach Objektivbrennweite und Sensorgröße auf die Sensordiagonale, die große oder die kleine Sensorseite bezieht. Ein 'echtes', zirkulares Fisheye-Objektiv bietet einen Öffnungswinkel von  $180^\circ$  bezogen auf die kürzere Seite des Sensorformats und erlaubt hemisphärische Abbildungen. Im nicht-photogrammetrischen Bereich werden Fisheye-Objektive häufig für Überwachungsaufnahmen oder in der Effektphotographie eingesetzt. In der Photogrammetrie bieten sie sich vor allem für Innenraumaufnahmen an.

Die den hier gezeigten Arbeiten zugrunde liegende Anwendung hat die quantitative Beurteilung der Beleuchtungsbedingungen für Jungpflanzen im Waldbau zum Ziel (Wagner

1998, Schwalbe et al. 2004). Aus einer hemisphärischen Aufnahme mit vertikaler Aufnahmeachse zum Waldboden sollen strahlungsrelevante Bereiche des Kronendaches segmentiert werden. In Kombination mit dem aus Erdrotationsparametern berechenbaren Tages- und Jahresgang der Sonne kann daraus eine quantitative Angabe für die direkte Sonneneinstrahlung auf den Aufnahme- punkt abgeleitet werden.

Die geometrisch korrekte Auswertung der hemisphärischen Aufnahmen des Kronendaches bedingen die geometrische Modellierung und Kalibrierung des bei der Aufnahme verwendeten Fisheye-Objektivs, dessen Abbildungsmodell sich grundsätzlich von der in der Photogrammetrie gebräuchlichen Zentralperspektive unterscheidet. Statt der zentralperspektiven Abbildung finden wir hier das Grundmodell der äqui-angularen Abbildung, welches ggf. durch Zusatzparameter zu erweitern ist.



Abb. 1: Hemisphärische Kronendachaufnahme

Im Folgenden wird zunächst in Kapitel 2 das Grundmodell der äqui-angularen Abbildung gezeigt, welches dann – in Analogie zur Zentralperspektive in der konventionellen Nahbereichsphotogrammetrie – um Zusatzparameter zur Anpassung des mathematischen Grundmodells an die physikalische Realität erweitert wird. In Kapitel 3 werden die Resultate der Anwendung dieses Modells in einer Testfeldkalibrierung verschiedener Fisheye-Objektive gezeigt. In Aufnahmen aller im Rahmen der Untersuchungen getesteter Fisheye-Objektive waren Effekte der chromatischen Aberration mit bloßem Auge sichtbar. Diese stören nicht nur den visuellen Eindruck der Bilder, sondern beeinflussen auch die Resultate der Segmentierung hemisphärischer Kronendachaufnahmen mit dem Ziel der Extraktion strahlungsrelevanter Bereiche auf Basis einer multispektralen Klassifikation. Aus diesem Grunde wurde eine getrennte Kalibrierung der drei Spektralkanäle hemisphärischer Aufnahmen durchgeführt mit dem Ziel einer Bildkorrektur durch Resampling auf Basis der unterschiedlichen Modellparameter der einzelnen Spektralkanäle (Kapitel 4).

## 2 Mathematisches Modell für Fisheye-Aufnahmen

Fisheye-Aufnahmen weichen – schon visuell erkennbar – vom herkömmlichen zentralperspektiven Modell, welches die Grundlage der Kollinearitätsbedingung darstellt, ab. Nahe liegend ist stattdessen eine Modellierung der Abbildungsgeometrie von Fisheye-Objektiven auf Basis einer äqui-angularen Abbildung. Das Grundprinzip dieser Abbildung ist selbsterklärend: Gleiche Einfallswinkelunterschiede übersetzen sich überall im Bild in gleiche Bildkoordinatenunterschiede (Abb. 2). Der Sensor wird dabei also nicht als Ebene, sondern als hemisphärisch gekrümmt betrachtet. Das mathematische Grundmodell der äqui-

angularen Abbildung wird in (Schwalbe, 2005) detailliert beschrieben. Die Kamerakonstante wird darin durch den Radius des hemisphärischen Bildkreises ersetzt.

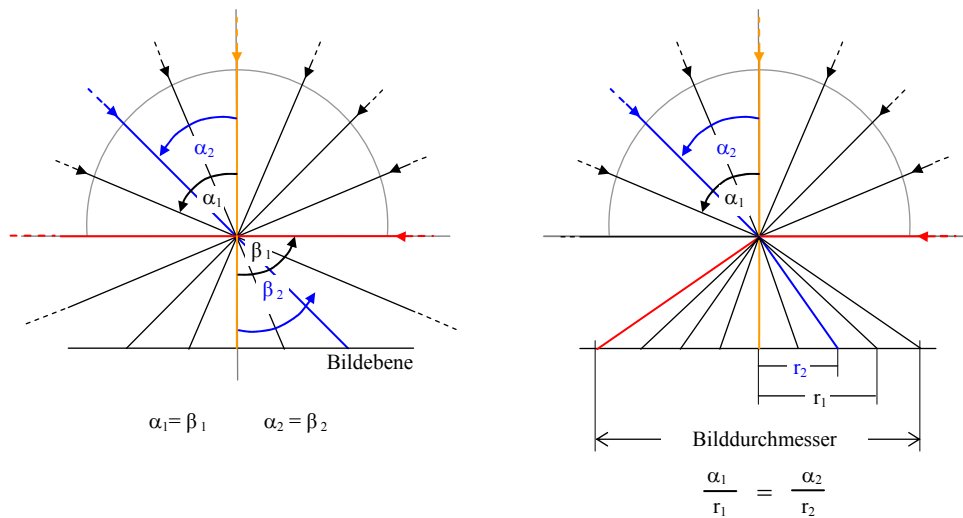


Abb. 2: Prinzip der zentralperspektiven und der äqui-angularen Abbildung

Zur Anpassung an die physikalische Realität der Abbildung und der damit notwendigen Kompensation systematischer Fehler wurde das Modell um Zusatzparameter erweitert. In Anlehnung an die Handhabung des zentralperspektiven Modells wurde hierzu der Parametersatz nach (Brown, 1971) mit drei Parametern für die radial-symmetrische und zwei Parametern für die radial-asymmetrische und tangentielle Verzeichnung in das Modell integriert. Zusätzlich wurden die häufig bei der Kalibrierung von Digitalkameras verwendeten Parameter für Affinität und Scherung (z.B. El-Hakim, 1986) ins Modell eingeführt.

### 3 Implementation und Test

Das mathematische Modell der äqui-angularen Abbildung mit Zusatzparametern wurde zunächst im räumlichen Rückwärtsschnitt implementiert. Dieser erlaubt anhand von Aufnahmen eines Kalibrierfeldes (Abb. 3) die Kalibrierung der Kamera sowie Aussagen zum Genauigkeitspotential der Kamera bzw. zur Güte des Modells. Referenzkoordinaten der 140 Passpunkte des Kalibrierfeldes wurden mithilfe eines photogrammetrischen Industriemesssystems mit einer Standardabweichung von etwa 0,05 mm bestimmt.

Aufnahmen im Kalibrierraum wurden zunächst mit einer 4500 x 3000 Pixel Kodak DCS 14n und einem Fisheye-Nikkor 8mm f/2.8 gemacht. Zusätzlich wurden Aufnahmen mit einem zweiten, baugleichen Fisheye-Nikkor 8mm f/2.8 gemacht. Außerdem stand ein wesentlich kompakteres und preiswerteres Sigma EX 4,0/8mm Objektiv für Testzwecke zur Verfügung. Für einen Vergleich der hochauflösenden Stillvideokamera mit einer

Amateurkamera wurden zudem Aufnahmen mit einer Nikon Coolpix 990 mit Nikon Fisheye-Konverter FC-E8 gemacht.

Für die Kombination Kodak DCS 14n und Fisheye-Nikkor 8mm f/2.8 ergaben sich ein Gewichtseinheitsfehler von 0,1 Pixel sowie die in Tabelle 1 gelisteten Kalibrierparameter:

Parameter		Wert
Innere Orientierung	R	12.564 mm $\pm$ 0.0023 mm
	$x_H$	-0.141 mm $\pm$ 0.0007 mm
	$y_H$	-0.018 mm $\pm$ 0.0007 mm
Radial-symmetrische Verzeichnung	A1	$-6.2 \cdot 10^{-4} \pm 4.4 \cdot 10^{-6}$
	A2	$1.4 \cdot 10^{-6} \pm 5.7 \cdot 10^{-8}$
	A3	$-4.8 \cdot 10^{-9} \pm 2.2 \cdot 10^{-10}$
Radial-asymmetrische und tangentielle Verzeichnung	B1	$1.0 \cdot 10^{-5} \pm 1.4 \cdot 10^{-6}$
	B2	$8.9 \cdot 10^{-6} \pm 1.6 \cdot 10^{-6}$
Affinität und Scherung	C1	$4.4 \cdot 10^{-5} \pm 1.4 \cdot 10^{-6}$
	C2	$4.8 \cdot 10^{-5} \pm 1.6 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 1: Kalibrierparameter Kodak DCS 14n / Fisheye-Nikkor 8mm f/2.8

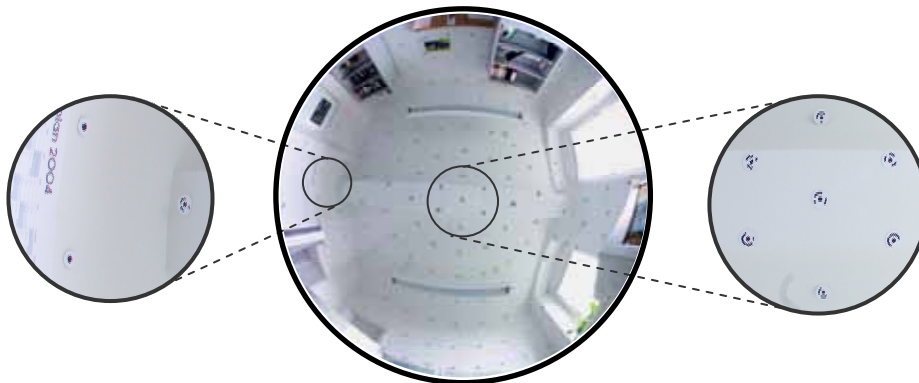


Abb. 3: Multi-funktionaler Fisheye-Kalibrierraum der TU Dresden

Der Vergleich der im Vorigen genannten Kamera-Objektiv Kombinationen ergab die folgenden Resultate:

Kamera / Objektiv	Kodak DCS 14n/ Nikkor 8mm f/2.8 (1)	Kodak DCS 14n/ Nikkor 8mm f/2.8 (2)	Kodak DCS 14n / Sigma 8mm F4 EX	Nikon Coolpix 990/ Nikon fisheye converter FC-E8
<b>Sensorgröße</b>	24 x 36 mm <sup>2</sup>	24 x 36 mm <sup>2</sup>	24 x 36 mm <sup>2</sup>	5.32 x 7.18 mm <sup>2</sup>
<b>Bildkreisradius</b>	11,5 mm	11,5 mm	11,0 mm	2,7 mm
<b>Sigma-0</b>	0.8 µm (0,09 Pixel)	1.1 µm (0,13 Pixel)	0.9 µm (0,11 Pixel)	0.7 µm (0,19 Pixel)
<b>max. Betrag der radial-symmetr. Verzeichnung</b>	1013 µm (127 Pixel)	1009 µm (126 Pixel)	1265 µm (158 Pixel)	190 µm (54 Pixel)
<b>max. Betrag der radial-unsymmetr. Verzeichnung</b>	6 µm (0,8 Pixel)	8 µm (1,0 Pixel)	14 µm (1,8 Pixel)	5 µm (1,4 Pixel)

Tabelle 2: Kalibrierergebnisse für verschiedene Kamera-Objektiv Kombinationen

Das erzielte Genauigkeitspotential erreicht zwar nicht ganz die üblicherweise bei vergleichbaren Kameras mit zentralperspektiven Objektiven erzielten Werte, doch weisen die praktischen Tests Fisheye-Objektiven insgesamt ein gutes Genauigkeitspotential aus, welches Objektive dieser Art grundsätzlich für photogrammetrische Anwendungen qualifiziert und ein weites Anwendungspotential erschließt. Restsystematiken sind in Residuenbildern des Rückwärtsschnittes nicht erkennbar (Schwalbe, 2005), was die Güte des mathematischen Modells bestätigt.

#### 4 Berücksichtigung der chromatischen Aberration

Die Aufnahmen aller im Zuge der hier gezeigten Untersuchungen getesteten Fisheye-Objektive zeigen eine klar erkennbare chromatische Aberration, welche zum Bildrand hin einen Betrag von mehr als einem Pixel ausmacht. Diese chromatische Aberration zeigt sich in Form von störenden Farbsäumen bei der visuellen Betrachtung der Bilder. Sie beeinflusst aber auch die geometrische Genauigkeit von Messungen in Farbbildern. Dies betrifft die Qualität der in Kapitel 3 gezeigten Kalibrierungsergebnisse nur unwesentlich, weil hier nur schwarze Punkte auf weißem Hintergrund in Schwarzweißbildern gemessen wurden, die durch die Effekte der chromatischen Aberration lediglich in ihrer Scharfabbildung beeinträchtigt werden. Ausführliche Untersuchungen zur Beeinflussung der Genauigkeit von Kalibrierergebnissen durch die chromatische Aberration sind in HASTEDT ET. AL. (2006) zu finden. Werden Bilder mit einer so deutlichen chromatischen Aberration jedoch als Basis für eine multispektrale Klassifikation verwendet, so können sich hier völlig falsche Klassifikationen von Pixeln ergeben.

Die Entstehung der in die Kategorie der Linsenfehler gehörenden chromatischen Aberration lässt einen systematischen Effekt erwarten, welcher sich bei der Betrachtung der Bilder bestätigt: Langwelliges rotes Licht wird in der Optik weniger stark gebrochen als grünes

und blaues Licht; somit erscheint beispielsweise bei den in Abb. 3 gezeigten Zielmarken ein nach innen versetzter roter Saum. Damit erscheint es nahe liegend, die chromatische Aberration im geometrischen Modell als systematische Abweichung vom Modell der äquiangularen Abbildung zu berücksichtigen. Dies kann relativ einfach realisiert werden, indem getrennte Rückwärtsschnitte mit den Bildpunktmessungen in den drei Farbkanälen gerechnet werden, bei denen sich dann die Bildkoordinaten aufgrund der chromatischen Aberration leicht unterscheiden. Eine stabilere Lösung ergibt sich durch einen kombinierten Rückwärtsschnitt auf Basis der Bildpunktmessungen in den drei Farbkanälen, bei dem die Parameter der äußeren Orientierung, der inneren Orientierung und der Affinität und Scheerung für alle drei Kanäle gleich angesetzt werden und nur bildkanalvariante Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung eingeführt werden.

Mit diesen bildkanalvarianten Parametern der radial-symmetrischen Verzeichnung im kombinierten Rückwärtsschnitt ergeben sich für die Kombination Kodak DCS 14n und Fisheye-Nikkor 8mm f/2.8 die in Tabelle 3 und Abb. 4 gezeigten Resultate:

Objektiv	Nikkor 8mm f/2.8			Sigma 8mm F4 EX		
Farbkanal	Rot	Grün	Blau	Rot	Grün	Blau
A1	$-5,9 \cdot 10^{-4}$	$-6,2 \cdot 10^{-4}$	$-6,2 \cdot 10^{-4}$	$-5,8 \cdot 10^{-4}$	$-6,2 \cdot 10^{-4}$	$-6,3 \cdot 10^{-4}$
A2	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$-2,7 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$
A3	$-3,0 \cdot 10^{-9}$	$-4,8 \cdot 10^{-9}$	$-5,2 \cdot 10^{-9}$	$-4,1 \cdot 10^{-9}$	$-6,0 \cdot 10^{-9}$	$-6,8 \cdot 10^{-9}$
max. Differenz Rot/Grün	2,57 Pixel			3,25 Pixel		
max. Differenz Blau/Grün	0,59 Pixel			0,22 Pixel		

Tabelle 3: Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung einer RGB-Kalibrieraufnahme

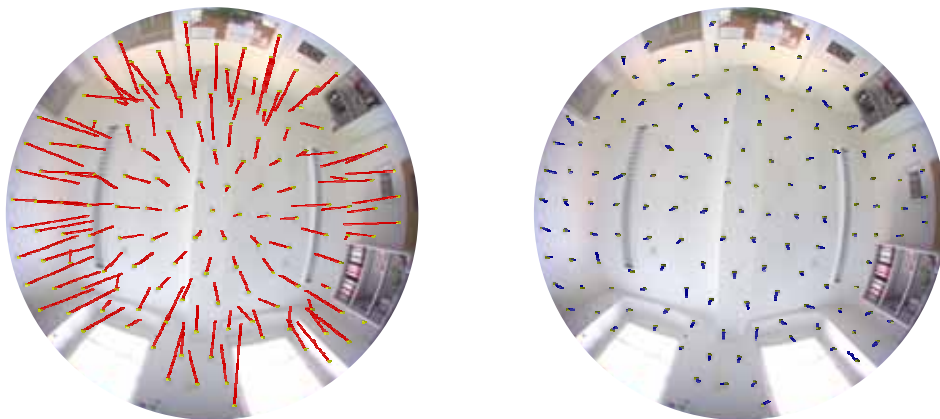


Abb. 4: Verzeichnungsunterschiede zwischen dem roten und grünen Kanal (links) und dem blauen und grünen Kanal (rechts) beim Sigma 8mm F4 EX

Die Resultate zeigen, dass der geometrische Effekt der unterschiedlichen radial-symmetrischen Verzeichnung der einzelnen Farbkänäle der Fisheye-Aufnahme bis zu 26  $\mu\text{m}$  (oder 3,25 Pixel) differieren. Interessant ist dabei die Tatsache, dass speziell beim Sigma-Objektiv die Differenzen zwischen dem blauen und grünen Kanal keine Systematiken aufweisen und sehr gering sind, während die Differenzvektoren zwischen dem grünen und roten Kanal den Erwartungen entsprechend radial ausgerichtet sind und von der Bildmitte zum Bildrand hin zunehmen (vgl. Abb. 4). Ein Erklärungsansatz dafür ist, dass Effekte der chromatischen Aberration für den blauen und grünen Kanal bereits durch achromatisch gestaltete Linsen verringert werden. Dies beeinträchtigt jedoch nicht die grundsätzliche Vorgehensweise der Kalibrierung mit bildkanalvarianten Verzeichnungsparametern. Die Resultate der Kalibrierung erlauben eine Korrektur der Effekte der chromatischen Aberration durch ein Resampling der Farbkänäle (vgl. Abb. 5). Dabei können beispielsweise der rote und der blaue Farbkanal unter Nutzung der Verzeichnungsparameter auf die Geometrie des grünen Kanals transformiert werden. Das Resultat dieser Transformation ist ein Bild mit gefälligerer visueller Qualität, welches zugleich für eine multispektrale Klassifikation wesentlich besser geeignet ist. Störend wirken aber kantenverstärkende Effekte, die durch eine kamerainterne Vorverarbeitung der Bilder auftreten, und zu Farbsäumen führen, die auch nach dem Resampling noch in den Bildern enthalten sind.

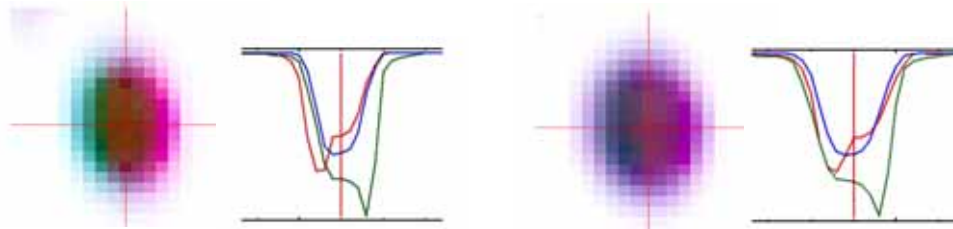


Abb. 5: Originalzielmarke (links) und entzeichnete Zielmarke (rechts) mit den jeweiligen Grauwertprofilen der einzelnen Farbkänäle

## 5 Ausblick

Die Arbeiten zur Modellierung und Kalibrierung von Fisheye-Aufnahmen zeigen das Genauigkeitspotential derartiger Optiken und erlauben den Einsatz von Fisheye-Objektiven in photogrammetrischen Messsystemen. Eine Basis dazu ist gegeben durch einen kombinierten Rückwärts- und Vorwärtsschnitt oder vorzugsweise eine selbst-kalibrierende äquiangulare Bündelblockausgleichung auf Basis des gezeigten Modells.

Inwieweit die Effekte der chromatischen Aberration eine bildkanalvariante Behandlung der Verzeichnungsparameter bedingen, hängt von der jeweiligen Anwendung ab. Bei der Nutzung des Farbinhalts von Bildern wird dies in der Regel der Fall sein. Zur Stabilität der Differenzen der Verzeichnungsparameter zwischen den Farbkänälen sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Wenn sich dabei die erwartete hohe Stabilität der Differenzen abzeichnet, kann die bildvariante Behandlung der Parameter in der Kalibrierung auch durch eine objektivspezifische Vorkorrektur ersetzt werden.

Durch die Verwendung eines Fisheye-Objektivs auf einer Rotationszeilenpanoramakamera ergibt sich die Möglichkeit der Aufnahme und geometrischen Auswertung hochauflösender vollsphärischer Bilder (Bonnet 2005, Schwalbe/Schneider 2005). Auch hier sind – prinzipbedingt allerdings nur in vertikaler Bildkoordinatenrichtung – Effekte der chromatischen Aberration zu erwarten, welche auf Basis der im Vorigen gezeigten Vorgehensweise beseitigt werden können.

## Danksagung

Die Arbeiten werden von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) gefördert (Forschungsvorhaben 170801/33). Weiterhin danken wir dem Institut für Waldbau und Forstschutz der Technischen Universität Dresden für die Zusammenarbeit in diesem Projekt.

## Literatur

- Bonnet, G., 2005: *SPHERON - Panoramic camera and processing of panoramic data*. Proceedings 1<sup>st</sup> Panoramic Photogrammetry Workshop (Eds. Maas/Schneider) International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, Part 5/W16
- Brown, D., 1971: *Close-Range Camera Calibration*. Photogrammetric Engineering, Vol. 37, No. 8.
- El-Hakim, S.F., 1986: Real-Time Image Meteorology with CCD Cameras. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 52, No. 11, pp. 1757 - 1766.
- Hastedt, H., Luhmann, T., Tecklenburg, W. (2006): Zur Nutzung von RGB-Farbkanälen für die hochgenaue 3DPunktbestimmung. In Luhmann (ed.): *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik*. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Schneider, D., Maas, H.-G., 2004: Development and application of an extended geometrical model for high resolution panoramic cameras. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXV, Part B
- Schwalbe, E., Maas, H.-G., Wagner, S., Roscher, M., 2004: *Akquisition und Auswertung digitaler Hemisphärenbilder für waldökologische Untersuchungen*. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 13, S. 113-120
- Schwalbe, E. (2005): *Geometric Modelling and Calibration of Fisheye Lens Camera Systems*. Proceedings 2<sup>nd</sup> Panoramic Photogrammetry Workshop (Eds. Reulke/Knauer), International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, Part 5/W8
- Schwalbe, E.; Schneider, D. (2005): *Design and testing of mathematical models for a full-spherical camera on the basis of a rotating linear array sensor and a fisheye lens*. Optical 3D Measurement Techniques VII (Eds.: Grün, A.; Kahmen, H.), Vol. I, pp. 245-254
- Wagner, S., 1998: *Calibration of grey values of hemispherical photographs for image analysis*. Agricultural and Forest Meteorology, Jg. 90, Nr. 1/2, S. 103-117