

Kalibrierung von digitalen Luftbildkameras

Eberhard Gülich und Michael Cramer

Zusammenfassung

Mit der Einführung digitaler Luftbildkameras in die Praxis und deren zunehmender Bedeutung stellt die Kalibrierung eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung dar. Dieser Beitrag stellt die Phase 1 des EuroSDR (European Spatial Data Research, vormals OEEPE) Projektes zur Kalibrierung digitaler Luftbildkameras vor. Das Projekt wurde im Oktober 2003 begonnen. In diesem Kalibrierungsnetzwerk sind zurzeit 35 Experten aus der Industrie, insbesondere Kamerahersteller und Softwarefirmen, vertreten sowie Forschungsinstitute und Anwender digitaler Luftbildkameras. Die Ziele des Projektes werden einführend dargestellt. Danach wird die Praxis der Kalibrierung analoger Luftbildkameras vorgestellt, gefolgt von einer Analyse der aktuellen Methoden zur Kalibrierung digitaler Luftbildkameras. Dies erfolgt am Beispiel von drei verschiedenenartigen Sensoren, die in der Praxis eingesetzt werden. Die Applanix/Emerge DSS vertritt die Mittelformat-Sensoren, die ZI-Imaging DMC und die Leica ADS40 stellen großformatige Sensoren dar, die den Anspruch haben, die analogen Kameras in naher Zukunft zu ersetzen. Die Kalibrierung dieser Systeme muss an das jeweilige Sensorkonzept angepasst sein und wird im Detail beschrieben. Mit Hinweisen auf die geplanten Untersuchungen in der gerade beginnenden zweiten Phase des Projektes wird der Beitrag abgeschlossen.

Summary

This paper documents the status of the actual Phase 1 of the EuroSDR (European Spatial Data Research, former OEEPE) project on »Digital Camera Calibration«. This project was officially installed in October 2003. Up to now about 35 experts from industry, camera manufacturers, software developers, research and system users already joined this calibration network. Some general remarks on the objectives of the project are given in the introductory part of the paper. Besides that, the paper is describing current practice and methods for digital airborne camera calibration. Therefore three airborne sensors already in operational use are chosen exemplarily: The Applanix/Emerge DSS as one representative of medium format sensors, and the well-known ZI-Imaging DMC and Leica ADS40 systems, where the latter two both claim to replace the standard analogue airborne frame cameras in near future. The different applied calibration approaches and processing steps are described in greater detail. The paper summarizes with the planned investigations of Phase 2 of the project, which is just starting.

1 Einleitung

Die Kamerakalibrierung ist eine fundamentale Voraussetzung für den photogrammetrischen Produktionsprozess

(Meier 1978). Für klassische analoge Luftbildkameras ist dieser Prozess weltweit eingeführt und weitgehend standardisiert, wenn auch nicht in einem Verfahren vereinheitlicht. Die Luftbildkameras werden üblicherweise in kontrollierter Laborumgebung mit speziell entwickelten Vorrichtungen untersucht und die Kalibrierparameter mit hoher Genauigkeit festgelegt. In diesen Kollimatoren oder Goniometern werden die Verzeichnungsparameter durch die Abweichungen der gemessenen Koordinaten oder Winkel mit den vorab bekannten Werten ermittelt. Dabei werden die Kammerkonstante und die Hauptpunktkoordinaten so gewählt, dass der absolute Betrag der Objektivverzeichnung minimiert und ein symmetrisches Verzeichnungsverhalten realisiert wird.

Mit der Einführung der filmlosen, d. h. digitalen Luftbildkameras ändert sich diese eingeführte Praxis aus verschiedenen Gründen. Die neuen digitalen Sensorsysteme unterscheiden sich z. T. sehr fundamental in ihrem Design, d. h. es gibt sowohl starke Unterschiede in der spezifischen Systemrealisierung als auch im Vergleich zu analogen Luftbildkameras. Es gibt die Konzepte von flächenhaften Sensoren im Vergleich zu Liniensensoren, von Mehrkopfsystemen im Vergleich zu Einkopfsensoren, von großformatigen, mittelformatigen und kleinformatigen Sensoren sowie panchromatischer und/oder multispektraler Bildaufnahme. All dies erfordert unterschiedliche Kalibrierverfahren, die jedem Sensor typ angepasst sein müssen. Durch die Fähigkeit zur simultanen Multispektralaufnahme, was eines der schlagkräftigsten Verkaufsargumente ist, kann die Kalibrierung nicht allein auf die Geometrie beschränkt sein, sondern muss auch auf die Radiometrie erweitert werden.

Als weiterer wichtiger Grund spielt die Integration der bildgebenden Sensoren mit zusätzlichen Sensoren wie GPS (Global Positioning System) oder integrierten GPS/Inertialsystemen (INS, IMU) für die direkte Bestimmung der Flugbahn eine Rolle. Diese Verbindung bietet genaue Informationen zur Sensorbewegung, die es erlauben, sehr schnell photogrammetrische Produkte, wie z. B. Orthofotos zu erzeugen. Für Zeilensensoren ist diese enge Verknüpfung mit GPS und Inertialsensoren zwingend erforderlich. Daraus folgt, dass eine Kalibrierung sowohl den optischen Sensor als auch die Zusatzkomponenten umfassen muss. Das bedeutet weiterhin, dass erweiterte Kalibrierverfahren erforderlich werden, wobei die Feldkalibrierung an Bedeutung gewinnt, die das Gesamtsystem umfassen kann und nicht nur die Optik.

Vor diesem Hintergrund und der aktuellen Entwicklung der filmlosen Luftbildkameras hat die EuroSDR (European Spatial Data Research) das Projekt Digitale Kamera-Kalibrierung initiiert. Auf der Basis eines Expertennetzes sollen Verfahren zur Kalibrierung filmloser Kame-

ras untersucht und entwickelt werden. Die Ziele und aktuellen Arbeiten werden in diesem Beitrag vorgestellt und diskutiert. Das Projekt ist in zwei Phasen eingeteilt: Die erste Phase beschäftigt sich mit einer Bestandsaufnahme und den derzeit zugänglichen Verfahren zur Kalibrierung filmloser Kameras. Nach einer zusammenfassenden Darstellung der erprobten Techniken zur Kalibrierung analoger Luftbildkameras werden an drei verschiedenen kommerziellen Luftbildkameras aktuelle Techniken zu deren Kalibrierung vorgestellt und diskutiert. Basierend auf diesen Erfahrungen werden für eine zweite Phase Schwerpunkte für empirische Untersuchungen definiert, die zum Ziel haben, weitergehende Vorschläge zur Kalibrierung mit dem Schwerpunkt auf einer Lösung im Feld zu erarbeiten.

2 Das EuroSDR Projekt »Digital Camera Calibration«

2.1 EuroSDR

Die EuroSDR Organisation (vormals OEEPE) wurde vor über 50 Jahren gegründet und hat zurzeit 18 europäische Staaten als Mitglieder. Aus diesen Staaten nehmen Vertreter aus den Bereichen Verwaltung (meist Landesvermessungsämter), Forschung und Industrie teil. Die EuroSDR hat sich zum Ziel gesetzt, die Entwicklung und Verbesserung von Methoden, Systemen und Standards für die Erfassung, Prozessierung, Produktion und Verteilung von Geodaten zu fördern. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Datenerfassung aus der Luft oder dem Weltraum. Die Forschungsplattform EuroSDR war von Anfang an auf empirische Untersuchungen im europäischen Rahmen spezialisiert. Durchschlagenden Erfolg für die Praxis hatten z.B. die bahnbrechenden Arbeiten und Empfehlungen zur Blocktriangulierung. Die EuroSDR veranstaltet Workshops zu aktuellen Themen in der Geomatik und besitzt eine eigene Veröffentlichungsreihe für Projektberichte und Veranstaltungen. Hinsichtlich Aus- und Weiterbildung bietet die EuroSDR seit einiger Zeit erfolgreiche Distance Learning Kurse auf der Basis aktueller Projektergebnisse an. Nähere Informationen über die Aktivitäten finden sich unter EuroSDR (2004).

2.2 Status des Projektes

Im Herbst 2003 wurde das Projekt zur Kalibrierung digitaler Kameras von der EuroSDR etabliert, um mit Hilfe einer Kerngruppe von Experten auf wissenschaftlicher Basis den technologischen Hintergrund, verbunden mit empirischen Untersuchungen zu erarbeiten. Rechtliche und organisatorische Aspekte einer möglichen Zertifizierung sind vorerst von den Betrachtungen ausgeschlossen, d.h. allein der technologische Aspekt ist von Interesse.

Zurzeit bilden 35 Experten aus Industrie, Forschungseinrichtungen und nationalen Behörden das Netzwerk, das weiterhin offen für Interessierte ist. Im Moment wird die Phase 1 abgeschlossen und Phase 2 begonnen. Aktuelle Informationen zu dem Projekt finden sich auf der Projekt-Homepage unter IfP (2004).

2.3 Ziele des Projektes

Die Ziele des Projektes sind:

- Sammlung öffentlich zugänglichen Materials über die Kalibrierung digitaler Luftbildkameras zur Zusammenstellung eines umfassenden Berichts über die aktuelle Praxis und die eingesetzten Methoden (Phase 1) und
- empirische Untersuchungen mit dem Ziel, allgemein anerkannte Verfahren zu entwickeln, wobei die Erfahrungen der Experten auf Seiten der Kamerahersteller, der Forschung und der Anwendung gebündelt werden (Phase 2).

Als Ergebnis der ersten Phase wird ein allgemein zugänglicher Bericht erstellt, der eine gemeinsame Wissensbasis darstellt, um weitere Strategien und spätere Untersuchungen in Phase 2 zu formulieren. Dieser Beitrag stellt wesentliche Elemente dieses Berichtes vor. Dieser Bericht soll den Anwendern zusätzliche Informationen bieten, um mit den Problemen und bestehenden Lösungen für eine Kalibrierung digitaler Kameras vertraut zu werden. Es bleibt festzuhalten, dass sich dieses Projekt allein auf digitale Luftbildkameras bezieht und nicht auf eine auch gängige Kombination von LIDAR und bildgebenden Sensoren, was eigentlich ein Registrierungs- und kein Kalibrierungsproblem darstellt.

3 Aspekte der Kamerakalibrierung

3.1 Definitionen

Die wesentlichen Aspekte der Kamerakalibrierung können z.B. dem Manual of Photogrammetry (Slama 1980) entnommen werden:

- Kamerakalibrierung ist der Prozess, durch den die geometrischen Aspekte einer individuellen Kamera bestimmt werden.
- Das von der Kamera erzeugte Foto soll für die Produktion von Karten, für Messungen von Distanzen und Höhen und für die Herstellung von Orthofotos verwendet werden.
- Grundsätzlich können bis zu einem gewissen Grad alle Kameras kalibriert werden. Allerdings werden hier Kameras betrachtet, die die höchste geometrische Genauigkeit erlauben, speziell für Messzwecke entwickelt wurden und u.a. qualitativ sehr hochwertige Objektive besitzen. Hohe Qualität betrifft sowohl die Bilder als

auch eine genaue Positionierung in der Fokalebene des Bildes. Ein großer Öffnungswinkel sollte ohne nennenswerte Verzeichnung verfügbar sein. Rahmenmarken sollten das Bildkoordinatensystem festlegen und das Verhalten des Films kontrollieren.

- Kalibrierung geht von der grundsätzlichen Stabilität zwischen Kalibrierungen aus.
- Die Ergebnisse der Kamera und ihre Genauigkeiten werden in einem Kalibrierungszertifikat mit Tabellen und Grafiken dokumentiert.

Obwohl die meisten dieser Aspekte allgemeingültigen Charakter für analoge und digitale Kameras haben, sollten einige Besonderheiten hinsichtlich digitaler Sensoren angesprochen werden. Durch die bereits erwähnte Fähigkeit zu Multispektralaufnahmen steht neben der Geometrie auch die Radiometrie im Mittelpunkt, was in der traditionellen Kalibrierung nicht diese Bedeutung hat. Die Anwendungen der Bildinterpretation spielten bisher eher eine untergeordnete Rolle, werden aber für zukünftige Aufgaben immer wichtiger. Mittel- und kleinformatige Kameras, die ursprünglich nicht für den Luftbildfall konzipiert wurden, werden nun verstärkt für einfache und schnelle Farbaufnahmen eingesetzt, die für die Erfassung von Landnutzungsänderungen, den Katastrophenschutz, die Forstwirtschaft, Maklerwesen, Werbung oder Tourismus eingesetzt werden können. Diese Sensoren sind nicht auf höchste geometrische Güte ausgelegt, wobei allerdings der Punkt der Stabilität der Kalibrierung angesprochen werden muss.

Es gibt verschiedene Techniken, eine Kamerakalibrierung durchzuführen (Slama 1980). Grundsätzlich wird zwischen zwei Methoden unterschieden, je nachdem, ob Referenzwerte für die Kalibrierung im Objekt- oder im Bildraum gegeben sind:

- Ein Satz von Zielen mit bekannten Winkeln wird der Kamera präsentiert. Die Ziele können optische Sterne (für eine Simulation unendlich entfernter Ziele) oder Bodenziele sein, die von Türmen, Flugzeugen oder vom Boden aus aufgenommen werden. Die aufgenommenen Bilder werden ausgemessen und die Elemente der inneren Orientierung abgeleitet. Es sind dazu viele physikalische Überprüfungen und Kontrollen erforderlich.
- Ein Sollgitter wird in die Bildebene gebracht und die beobachteten Winkel im Objektraum visuell oder mit einer Goniometer-Technik gemessen. Die Verzeichnung wird aus der Brennweite und den Differenzen zwischen Bild- und Objektwinkeln berechnet.

Die Parameter der inneren Orientierung sind eng mit der Kamerakalibrierung verknüpft, da eine Kamera als metrisch und kalibriert betrachtet wird, wenn die Parameter der inneren Orientierung mathematisch definiert sind. Üblicherweise werden die folgenden Parameter bestimmt:

- Kammerkonstante f ,
- Koordinaten des Bildhauptpunktes x_p und y_p und

- geometrische Verzeichnung des Objektivsystems, z. B. symmetrische Radialverzeichnung und asymmetrische Verzeichnung durch Dezentrierung.

Unabhängig von der Methode hängt die Genauigkeit der Kamerakalibrierung von der Qualität der bekannten Geometrie der Ziele ab. Ein hoher Qualitätsanspruch stellt für alle Kalibrierverfahren hohe Anforderungen und setzt bei einer Laborkalibrierung komplexes und teures Gerät voraus.

3.2 Laborkalibrierung

Vom Standpunkt der klassischen Photogrammetrie ist die Laborkalibrierung das Standardverfahren für analoge Luftbildkameras. Die Ergebnisse werden in den wohlbekannten Kalibrierungszertifikaten dokumentiert. Die Kalibrierung wird in vorgeschriebenen Abständen wiederholt, meist innerhalb von zwei Jahren. So werden Kalibrierungen z. B. bei Zeiss (D) und Leica (CH) mit Hilfe von Goniometern (s. Abb. 1), d. h. beweglichen Kollimatoren durchgeführt. Die Kameraachse ist fest und zeigt horizontal oder vertikal, der Kollimator bewegt sich um die Eingangspupille der Objektive. Die exakt bekannten beleuchteten Sollgitter in der Brennebene der Kamera werden durch das Objektiv projiziert. Diese Gitterpunkte werden mit dem Kollimatorteleskop in Übereinstimmung gebracht und die zugehörigen Winkel gemessen. Die Goniometer-Technik ist für digitale Kameras geeignet und wird auch bereits dafür verwendet.

Im Gegensatz zu der visuellen Goniometer-Technik sind Multikollimatoren (s. Abb. 2) näher an den praktischen Bedingungen der Photogrammetrie, da die relevante Information im Objektraum präsentiert wird. Es wird eine feste Anordnung von Kollimatoren verwendet (üblicherweise in Form eines Fächers mit definiertem Winkel zwischen verschiedenen Blickrichtungen), bei der jeder Kollimator ein Bild seines individuellen Fadenkreuzes auf eine fotografische Platte in der Brennebene der Kamera projiziert. Die Koordinaten der Kreuze werden gemessen und daraus die Kalibrierparameter abgeleitet. Bei dieser Kalibrierung wird neben der Optik auch die fotografische Emulsion berücksichtigt. Damit ist dieser Ansatz allgemeiner und näher an einer Systemkalibrierung, die nicht nur eine einzelne Komponente betrachtet, sondern alle wesentlichen Bestandteile eines Gesamtsystems.

Obwohl viele Nutzer weiterhin davon überzeugt sind, dass eine traditionelle Kalibrierung von Einzelkomponenten ausreichend ist, ist die Frage nach einer umfassenden Systemkalibrierung nicht neu und bereits vor ca. 30 Jahren in Betracht gezogen worden (Maier 1978). Mit dem Einsatz von GPS und Inertialsensoren hat dieser Ansatz sehr stark an Bedeutung gewonnen und ist hochaktuell geworden. Üblicherweise sind solche allumfassenden Kalibrierungen nur im Feld (In-situ) möglich.

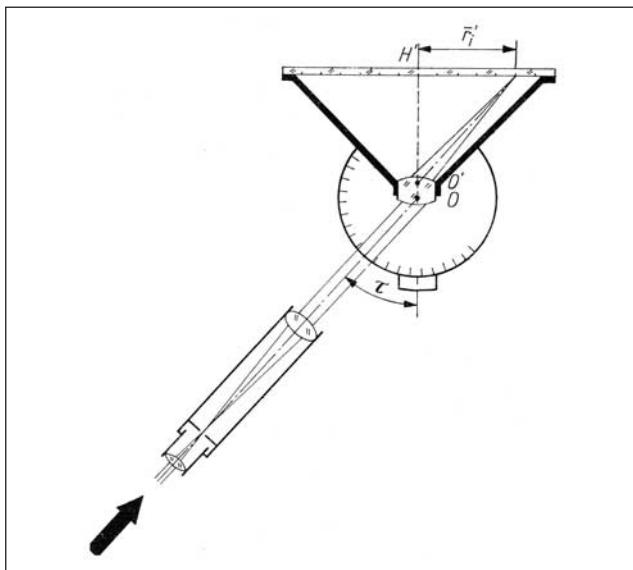


Abb. 1: Prinzip Goniometer (Quelle: Buchholtz/Rüger: Photogrammetrie, S. 46, Verlag für Bauwesen, Berlin, 1973)

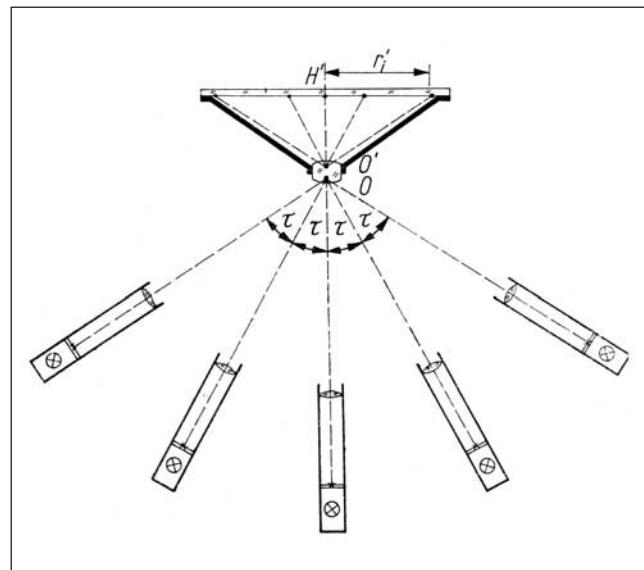


Abb. 2: Prinzip Multikollimator (Quelle: Buchholtz/Rüger: Photogrammetrie, S. 46, Verlag für Bauwesen, Berlin, 1973)

3.3 In-situ-Kalibrierung

In-situ-Kalibrierungen (Testfeldkalibrierungen oder Selbstkalibrierungen) sind bisher vor allem für photogrammetrische Nahbereichsanwendungen charakteristisch. Kamerakalibrierung und Objektrekonstruktion erfolgen in einem Prozess, der so genannten simultanen Kalibrierung. Hierbei geht das System mit allen Komponenten zum Zeitpunkt der Bildaufnahme einschließlich aller Effekte aus der Umgebung in die Kalibrierung mit ein. Diese Kalibrierung unterscheidet sich damit essentiell von der Laborkalibrierung und geschieht zudem in der Umgebung des zu messenden Objektes. Da die Objekterfassung meist im Vordergrund steht, kann die gewählte Aufnahmekonfiguration unter Umständen nicht gleichzeitig auch optimal für eine Kalibrierung sein. Üblicherweise werden dreidimensionale Testfelder (siehe z.B. Abb. 4) mit einer großen Anzahl signalisierter Punkte eingesetzt, die automatisch oder halbautomatisch gemessen werden, woraus dann die Kalibrierparameter abgeleitet werden. Es können z.B. kodierte Zielmarken verwendet werden, die es erlauben, nicht nur den Punkt automatisch zu messen, sondern auch die Punktnummer automatisch zu erkennen. Sind die Referenzkoordinaten der Punkte des Kalibrierfeldes mit übergeordneter Genauigkeit bekannt, spricht man üblicherweise von Testfeldkalibrierung. Dies ist allerdings nicht zwingend erforderlich, da normalerweise ein Sollmaßstab ausreichend ist, wobei man dann von Selbstkalibrierung spricht.

Ursprünglich ist die In-situ-Kalibrierung nicht für Luftbildanwendungen ausgelegt, so dass geeignete mathematische Modelle zuerst für die Kalibrierung terrestrischer Kameras verwendet wurden. Insbesondere in Brown (1971 und 1966) werden die wichtigsten Grundlagen für die Parameter der Systemkalibrierung gegeben, wozu Kammerkonstantenverbesserung, Hauptpunktlage,

radiale und asymmetrische Verzeichnung und weitere Bilddeformationen gehören. Brown weist nach, dass bei Bildverbänden mit starker Geometrie die Methode der Bündelausgleichung hervorragend geeignet ist, um eine signifikante Selbstkalibrierung durchzuführen oder zusätzliche Parameter zu bestimmen. Diese Parametersätze nach Brown sind in vielen kommerziellen Auswerteprogrammen für den Nahbereich implementiert (Fraser 1997).

Im Falle einer klassischen Aerotriangulation werden oftmals mathematische Polynomansätze verwendet, wobei die gebräuchlichsten von Ebner (1976) und von Grün (1978) vorgeschlagen worden sind. Im Gegensatz zu den Parametersätzen, die auf physikalischen Ursachen beruhen, werden diese Polynome verwendet, um das Modell der Bündelausgleichung zu erweitern und damit die Verbesserungen im Bildraum zu reduzieren. Da bereits durch Brown die hohe Korrelation zwischen Kalibrierparametern und einer geschätzten äußeren Orientierung nachgewiesen wurden, sind die Polynome nach Ebner und Grün orthogonal zueinander und zu den Elementen der äußeren Orientierung formuliert. Diese Korrelationen werden vor allem durch die relativ schwache Geometrie der Luftbildblöcke hervorgerufen, mit den nahezu parallelen Blickrichtungen einzelner Kamerastationen und den relativ geringen Geländehöhenunterschieden im Vergleich zur Flughöhe. In normalen Bildflugkonfigurationen können Veränderungen der Parameter der inneren Orientierung der Kamera nicht bestimmt werden, sofern nicht zusätzliche Beobachtungen für die Projektionszentren durch GPS oder Bilddaten aus verschiedenen Flughöhen und damit in verschiedenen Bildmaßstäben zur Verfügung stehen.

Die physikalisch begründeten Ansätze und die mathematischen Polynomansätze werden oft als konkurrierend betrachtet. Trotzdem sind die Bestimmung von physikalisch signifikanten Parametern und von Polynomkoeffi-

zienten ergänzend und beide Modelle können durchaus simultan eingesetzt werden, wie bereits von Brown (1976) angemerkt wurde.

4 Kalibrierung digitaler Kameras

Die bisher genannten Grundlagen der Kalibrierung weisen Möglichkeiten zur Verwendung bei filmlosen Kameras auf, wurden aber noch nicht näher spezifiziert. Daher werden nun einige Systeme beispielhaft vorgestellt, die bereits im praktischen Luftbildeinsatz sind. Der Fokus liegt dabei auf den angewandten Kalibriermethoden und weniger auf den sonstigen Eigenschaften der Kameras. Durch das stark ausgeprägte individuelle Design der Kameras werden nicht alle verfügbaren Kameras, sondern nur eine exemplarische Auswahl betrachtet, u. a. die Applanix/Emerge DSS, die ZI-Imaging DMC und die Leica ADS40. Diese drei Sensoren sind Vertreter folgender Sensorsorten: Sensoren, die auf (1.) einem flächenhaften Sensor innerhalb eines einzelnen Kamerakopfes beruhen (typischerweise klein- und mittelformatige Kameras), die auf (2.) mehreren flächenhaften Sensoren innerhalb einer Mehrkopflösung beruhen und dabei für jeden Kamerakopf mittel- bis sehr große Chips verwenden und (3.) zeilenbasierte Sensoren, mit mehreren CCD-Zeilen, die in verschiedenen Aufnahmerichtungen und unterschiedlichen spektralen Eigenschaften in der Brennebene angeordnet sind. Petrie (2003) präsentiert einen exzellenten Überblick über den 2D-Markt der digitalen Sensoren mit dem Schwerpunkt auf den Typen aus der ersten und zweiten Gruppe.

Die DSS repräsentiert die erste Gruppe. Diese Gruppe ist in großer Bewegung, da viele preisgünstige halbprofessionelle oder professionelle Kameras aus dem Konsumerbereich für Anwendungen aus der Luft modifiziert werden können. Die zweite und dritte Gruppe sind fast ausschließlich auf höchste Genauigkeit und großformatige Datenerfassung ausgelegt. Die Vexcel UltracamD und das Dimac Systems DIMAC sind neben der DMC Sensoren aus der zweiten Gruppe. Neben der ADS40 gibt es nur einige wenige Sensoren in der dritten Gruppe, die auf Zeilenscanning basieren, so etwa die DLR HRSC-Familie und der Starlabo TLS Scanner. Trotzdem werden auch andere Zeilenscanner in enger Verknüpfung mit Laser-scansystemen eingesetzt, um z.B. die automatische Klassifikation der Laserpunkte zu unterstützen. Ein Beispiel hierzu ist das Toposys Falcon Laserscanning System (Toposys 2004).

4.1 Applanix/Emerge DSS

Die Applanix/Emerge DSS-Kamera ist als Repräsentant für digitale Mittelformatsensoren ausgewählt. Der optische Teil basiert auf einer MegaVision 4092×4077 Pixel



Abb. 3: DSS-Kamera von Applanix/Emerge, mit Außen-skelett zur Stabilisierung des Kameragehäuses (Quelle: Applanix)

CCD-Matrix in einem digitalen Aufsatz zu dem Gehäuse einer Contax 645 Mittelformatkamera (vgl. Abb. 3). Das Gehäuse ist speziell mit Außenskelett stabilisiert, um eine mehr oder weniger fixierte innere Geometrie der Kamera zu gewährleisten. Der Kamerakörper ist fest mit einem Applanix POS/AV 410 GPS/Inertialsystem verbunden, das alle Parameter der äußeren Orientierung für eine direkte Geokodierung bereitstellt. Die Dimension der CCD-Matrix sind $3.68 \times 3.67 \text{ cm}^2$ (bei $9 \times 9 \mu\text{m}^2$ Pixelgröße), was in Bezug zu der Filmgröße bei mittelformatigen analogen Filmkameras (zw. $4.5 \times 6 \text{ cm}^2$ und $6 \times 7 \text{ cm}^2$) vergleichsweise gering ist. In Kombination mit zwei verfügbaren Objektiven von 55 mm (Standard) und 35 mm Brennweite (optional) ist das resultierende Bildfeld 37° bzw. 56° . Im Vergleich zur Geometrie einer Luftbildkame-

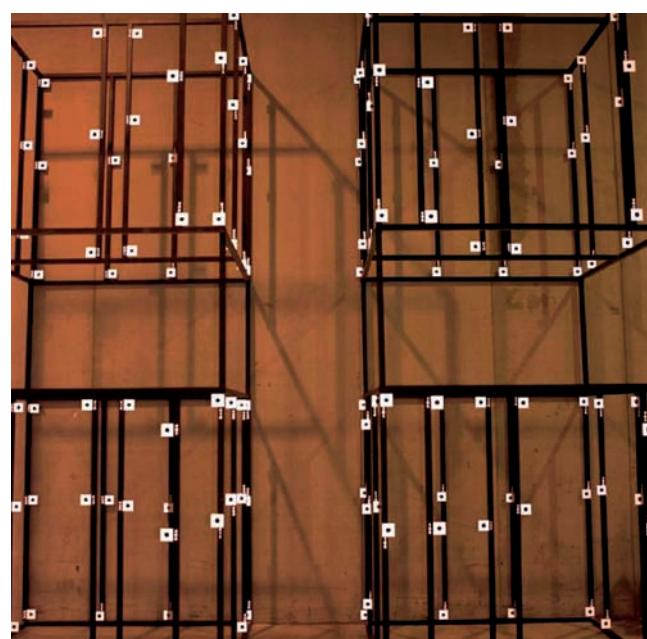


Abb. 4: Räumliches 3D-Kalibrierfeld zur terrestrischen Kalibrierung der DSS-Kamera von Applanix/Emerge (Quelle: Applanix)

ra (Format $23 \times 23 \text{ cm}^2$) entsprechen die zwei möglichen Bildwinkel der DSS ungefähr einer Normalwinkelaufnahme (41° , 30.5 cm Brennweite) bzw. einer Aufnahme mit 21 cm Brennweite (57°).

Die geometrische Kalibrierung der DSS-Kamera erfolgt durch terrestrische Verfahren und während des Fluges. Mit terrestrischen Aufnahmen eines Testfeldes (vgl. Abb. 4) aus verschiedenen Richtungen werden die Parameter der inneren Orientierung der Kamera bestimmt: d. h. Kammerkonstante, Bildhauptpunkt und Objektivverzeichnung. Dazu werden die Fehlausrichtung zwischen den IMU (Inertial Measurement Unit) Achsen und dem Kamerakoordinatensystem bestimmt. Nach der terrestrischen Kalibrierung erfolgt eine Verifizierung der Parameter aus Luftaufnahmen. Weitere Details zu diesen Verfahren, die verwendete Software und die ermittelten Eigenschaften sind Mostafa (2004) zu entnehmen.

4.2 ZI-Imaging DMC

Die Konzepte des DMC-Kamerasystems von ZI-Imaging (s. Abb. 5) wurden erstmals während der Photogrammetrischen Woche 1999 vorgestellt. Die offizielle Markteinführung erfolgte während des ISPRS Kongresses 2000 in Amsterdam. Dieser digitale Sensor basiert auf einer Mehrkopflösung mit vier großformatigen CCD-Matrixsensoren ($7\text{k} \times 4\text{k}$ Pixel bei einer Pixelgröße von $12 \times 12 \mu\text{m}^2$) für die vier leicht geneigten, panchromatischen Kameraköpfe. Aus allen vier Bildern, die sich teilweise überlappen, wird ein großformatiges virtuelles Bild von 13824×7680 Pixel berechnet. Dieses Bild sollte frei von Verzeichnung sein; dazu müssen die innere Orientierung jedes einzelnen Kamerakopfes und die relativen Orientierungen zwischen den Kameraköpfen bekannt sein. Damit ist auch die Kalibrierung in zwei Schritten erforderlich: eine Einkopfkalibrierung und eine Plattformkalibrierung. Der Ansatz hierzu ist im Detail in Dörstel et



Abb. 5:
DMC-Kamera
von ZI-Imaging
(Quelle:
ZI-Imaging
2003)

al. (2003) und Zeitler et al. (2002) beschrieben und soll in diesem Zusammenhang nur kurz umrissen werden.

4.2.1 Kalibrierung eines Kamerakopfes der DMC

Die Laborkalibrierung eines Kamerakopfes erfolgt an einem Goniometer im Zeiss Kamerakalibrierzentrum in Oberkochen. Diese Kalibriereinheit wird üblicherweise für die Kalibrierung analoger RMK-Luftbildkameras verwendet (vgl. Abb. 6). Das Goniometer basiert auf dem Zeiss Th2 Theodoliten mit einer Genauigkeit von 1 Bogensekunde, was einer Genauigkeit im Bild von $0.6 \mu\text{m}$ oder $1/20$ Pixel entspricht, bei einer nominalen Kammerkonstante von 12 cm der panchromatischen Kameraköpfe.



Abb. 6: Kalibriereinrichtung Carl Zeiss Oberkochen
(Quelle: Carl Zeiss)

Im Gegensatz zur klassischen Laborkalibrierung (s. Kap. 3.2) kann die CCD-Matrix, die fest mit dem Kamerakopf verbunden ist, nicht durch eine Sollgitterplatte ersetzt werden. Damit können auch keine Referenzpunkte auf dem Gitter und auch nicht die korrekte Autokollimation des Systems gemessen werden. Deshalb werden die projizierten Bilder der Theodolitenfadenkreuze im digitalen Bild mittels automatischer Punktmessung bestimmt. Die Goniometermessungen erfolgen in vier Ebenen (horizontal und vertikal und in den beiden Diagonalen), wobei in jeder Ebene zwei Messungen mit 180° -rotierten Kameraköpfen erfolgen. Da sich diese Rotation von dem nominalen 180° -Wert unterscheiden und auch die Autokollimation nicht garantiert werden kann, werden drei weitere Freiheitsgrade (drei unbekannte Rotationswinkel) in die folgende Kalibrierausgleichung eingeführt, die als unbekannte Parameter für jede Messebene bestimmt werden. Die ermittelten Winkel beschreiben die individuelle Rotation zwischen Pixel- oder Bildkoordinatensystem des Kamerakopfes und den Objektkoordinaten, wie sie durch den Goniometer für jede Messebene festgelegt sind.

Die gewünschten Kalibrierparameter werden durch Bündelausgleichung mit zusätzlichen Parametern bestimmt. Um eine Bündelausgleichung zu ermöglichen, werden die Winkelmessungen im Goniometer durch

Schnitte der gemessenen Strahlen mit einer virtuellen Ebene mit konstanter Höhe in Objektkoordinaten transformiert. In der DMC-Kalibrierung werden die physikalisch relevanten Parameter nach Brown in modifizierter Form nach Fraser (1997) benutzt. Die Genauigkeit $\hat{\sigma}_0$ nach der Parameterschätzung liegt bei ca. 0.15 Pixel bzw. $1.8 \mu\text{m}$. Eine Wiederholung der Kalibrierung nach einem bestimmten Zeitintervall bestätigt die hohe Stabilität der individuellen Kameraköpfe. Die maximalen Korrekturen nach einer wiederholten Kalibrierung werden mit 1/10 Pixel angegeben (Dörstel et al. 2003). Es ist anzumerken, dass die Einkopfkalibrierung sich auf die »vorläufigen« Bilder der einzelnen Kameraköpfe bezieht. Diese Angaben sind notwendig, um das virtuelle Gesamtbild zu berechnen, das als Grundlage der photogrammetrischen Auswertung der DMC-Daten dient. Das bedeutet, dass der Nutzer damit ein virtuelles, verzeichnungsfreies Bild verwendet.

4.2.2 Plattformkalibrierung der DMC

Die Plattformkalibrierung ist für das Resampling des virtuellen großformatigen Bildes erforderlich, das aus den vier panchromatischen Sensoren zusammengesetzt wird. Da mechanische Teile in so hochdynamischen Umgebungen wie sie ein Bildflug darstellt nicht als absolut stabil betrachtet werden können, wurde das DMC-Kameragehäuse so entwickelt, dass kleine Winkeländerungen zwischen einzelnen Kameraköpfen auf der Plattform erlaubt sind. Diese Deformationen sind für jede Bildflugumgebung unterschiedlich und müssen deshalb beim Bildflug selbst bestimmt werden. Diese Kalibrierung stützt sich auf Messungen von Verknüpfungspunkten von überlappenden Regionen der panchromatischen Bilder. Es sollten zudem die genauen relativen Positionen der Einzelköpfe, die Parameter der Einzelkopfkalibrierungen und Näherungswerte für die Winkelabweichungen zwischen Kameraköpfen als Eingangsdaten für die Plattformkalibrierung vorliegen. Die Kalibrierung erfolgt mit einer Bündelausgleichung, mit der die drei oben erwähnten Rotationswinkel und eine Korrektur für die Kammerkonstante für drei Kameraköpfe im Vergleich zum vierten Kamerakopf (Referenz) bestimmt werden. In Dörstel et al. (2003) werden 30 bis 50 Verknüpfungspunkte als ausreichend angesehen. Die erreichbare Genauigkeit liegt zwischen 1/12 und 1/6 der Pixelgröße.

4.3 Leica ADS40

Bei der Leica ADS40 (s. Abb. 7) werden statt flächenhafter Sensoren mehrere lineare CCDs verwendet. Die ADS-Entwicklung konnte sich auf Erfahrungen mit digitalen flugzeuggestützten Zeilensensoren der DLR stützen, insbesondere das WAOSS/WAAC-Kamerasystem, das für die Marsmission im Jahr 1996 entworfen wurde, durch Fehlschlag dieser Mission aber auf Luftbildanwendungen



Abb. 7:
ADS-Kamera
von Leica
Geosystems
(Quelle:
Leica, 2003)

übertragen wurde. Erste Tests mit den ADS-Prototypen begannen 1997 und das Produkt wurde offiziell während des ISPRS 2000 Kongresses in Amsterdam vorgestellt.

Die bildgebenden Sensoren bestehen aus typischerweise zehn CCD-Zeilen mit unterschiedlichen Aufnahmerichtungen und unterschiedlicher multispektraler Sensitivität. Jede Sensorzeile besteht aus 12.000 Pixel mit $6.5 \times 6.5 \mu\text{m}^2$ Pixelgröße. Während der Kalibrierung wird die Pixelposition jeder einzelnen Zeile bestimmt. Die Nomenklatur für die verschiedenen Typen von CCD-Zeilen ist wie folgt: panchromatisch vorwärts (PANF), panchromatisch Nadir (PANN) und panchromatisch rückwärts (PANB) sowie multispektral vorwärts (Rot REDF, Grün GRNF, Blau BLUF) und rückwärts (Nahes Infrarot NIRB). Die Aufnahmerichtung in Bezug auf den Nadir wird durch entsprechende Winkelangaben kodiert. So entspricht 28 für den PANF28-Sensor dem Winkel 28.4° zwischen Nadir und Vorwärtsblick des PANF-Sensors. Andere Aufnahmerichtungen sind 14.2° für die rückwärtsblickenden PAN-Zeilen, 16.1° für die vorwärtsblickenden RGB-Zeilen und 2.0° für die rückwärtsblickende NIR-Zeile. Da jeder panchromatische Kanal aus zwei individuellen Sensorzeilen besteht, die gegeneinander um ein halbes Pixel versetzt sind, werden diese Zeilen mit A für die erste Zeile und B für die zweite Zeile bezeichnet. Zur Vervollständigung sollte erwähnt werden, dass es für die ADS40 unterschiedliche CCD-Zeilenkonfigurationen in der Brennebene gibt. So werden z. B. die zwei Nadir-Zeilen und die vorwärtsblickenden RGB-Zeilen getauscht, womit ein Nadir-RGB-Kanal und ein zusätzlicher vorwärtsgerichteter Pan-Kanal entsteht. Solche Anordnungen können z. B. für eine Generierung multispektraler Orthofotos von Vorteil sein.

4.3.1 Laborkalibrierung der ADS40

Die Laborkalibrierung der ADS40 basiert auf einem koadierten vertikalen Goniometer (CVG) bei SwissOptic (einer

Leica Geosystems Firma). Alle Details der Kalibriereinrichtung sind in Pacey et al. (1999) zu finden. Das CVG wurde aus einem modifizierten elektronischen Goniometer (EVG) entwickelt, bei dem der Photomultiplier durch eine digitale CCD-Flächenkamera und die Platte mit dem Sollgitter (mit hochpräzisen Marken) durch eine spezielle kodierte Glassplatte ersetzt wird. Die kodierten Ziele befinden sich auf den zwei Diagonalen und den zwei horizontalen und vertikalen Richtungen der Platte. Der räumliche Abstand zwischen zwei benachbarten Zielen ist 10 mm. Die Messung erfolgt automatisch mit hoher Präzision. Aus den gemessenen zugehörigen Objektwinkeln wird die kalibrierte Kammerkonstante und die Verzeichnungsfunktion abgeleitet. Das CVG wird für die Kalibrierung klassischer RC 30-Luftbildkammern eingesetzt wie auch für die ADS40-Kamera. Allerdings ist die Prozedur zur Kalibrierung unterschiedlich. Für die ADS40 erfolgt die Kalibrierung wie in Pacey et al. (1999) beschrieben. Objektivstutzen und CCD-Bildebene werden zunächst getrennt kalibriert. Danach werden beide Komponenten zusammengefügt und mit dem CVG kalibriert. Hier kann die kodierte Glassplatte nicht verwendet werden, da die CCD-Sensoren fest in der Brennebene montiert sind. Deshalb wird ein kodiertes Ziel rückwärts auf die CCD-Zeile des getesteten Objektivs projiziert. Um Messungen auch neben der Nadirrichtung zu ermöglichen, wird ein zusätzlicher Spiegelscanner an der Spitze des Goniometerarms angebracht. Damit kann jede einzelne Pixelposition in der Brennebene angesprochen werden. Nach Schuster und Braunecker (2000) reicht es aus, jedes Pixel im Abstand von 2–5° innerhalb des Bildwinkels zu messen. Die Werte für die dazwischenliegenden Pixel werden numerisch interpoliert.

4.3.2 Selbstkalibrierung der ADS40 mit Bündel- ausgleichung

Obwohl ein kompletter Mess- und Prozessablauf für die Laborkalibrierung existiert, wurde vor kurzem ein neuer Ansatz für die ADS40-Kalibrierung eingeführt. Dieser In-situ-Ansatz stützt sich vollständig auf Selbstkalibrierung, also auf einen Systemansatz unter Einbeziehung aller wesentlichen Komponenten. Damit rückt das inertielle Messsystem (IMU) in den Blickpunkt, das Voraussetzung für die Prozessierung der Bilder der Zeilensensoren ist. Die notwendige relative Orientierung zwischen dem IMU- und dem ADS-Bildkoordinatensystem kann nur mittels Selbstkalibrierung bestimmt werden, was gegenüber einer Laborkalibrierung vorteilhaft ist. Die verwendete Methode ist in Tempelmann et al. (2003) beschrieben. Auch hier wird der Parametersatz nach Brown für die Kalibrierterme verwendet. Dazu kommen noch die drei Unbekannten zur Bestimmung der oben erwähnten Winkelabweichungen. Obwohl die ADS40-Kamera aus Zeilengeometrie und nicht klassischer Geometrie besteht, lassen sich viele der Parameter nach Brown direkt übertragen. Restliche Effekte, die nicht durch den Parameter-

satz nach Brown eliminiert werden können, werden mit zusätzlichen Polynomen modelliert. In Tempelmann et al. (2003) wird ein Polynom 6. Grades als ausreichend betrachtet und für die X- und Y-Komponenten jeder Sensorzeile vorgeschlagen. Für eine gute Systemkalibrierung sind spezielle Anforderungen an den Kalibrierflug zu stellen. Durch die starken Korrelationen zwischen einigen der Kalibrierparameter und den Elementen der äußeren Orientierung sollte der Block aus zwei kreuzförmig angeordneten Streifen bestehen, wobei jede Linie doppelt in entgegengesetzter Richtung geflogen wird. Damit können auch ohne Passpunkte alle Parameter, mit Ausnahme der Brennweite, bestimmt werden. Für diese ist ein bekannter Maßstabsfaktor erforderlich, der z. B. über Passpunkte eingebracht werden kann. Alternativ kann diese Blockkonfiguration mit einer anderen Flughöhe, d.h. in einem anderen Bildmaßstab beflogen werden. Beide Blöcke sind über Verknüpfungspunkte verbunden und erlauben eine Kalibrierung ohne Passpunkte und bieten zusätzlich noch den Vorteil einer starken Blockgeometrie, die eine zuverlässige Schätzung der Kalibrierparameter erlaubt. Diese Konfiguration des doppelten Kreuzes wird für Kalibrierflüge empfohlen. So enthält der Kalibrierbericht bereits das Design des Kalibrierfluges mit den ausgewählten Verknüpfungspunkten. Praktische Tests haben gezeigt, dass in diesem Fall eine Genauigkeit von 2.5 µm bis 2.9 µm für alle ADS40-Systeme erreicht wird, was der Erwartung für das Genauigkeitspotential der automatischen Verknüpfungspunktmessung entspricht. Es scheint einen Trend zu geben, die Kalibrierparameter der ADS40 allein aus Selbstkalibrierung abzuleiten, womit eine Laborkalibrierung nicht mehr erforderlich wäre.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag stellt wichtige Grundlagen und erste zusammenfassende Ergebnisse des EuroSDR-Projektes zur Kalibrierung digitaler Kameras vor. Der detailliertere Abschlussbericht für die erste Phase wird im Herbst 2004 vorliegen, um wesentliche Neuerungen, die auf dem ISPRS Kongress 2004 in Istanbul und der Intergeo 2004 in Stuttgart vorgestellt werden, mit aufzunehmen. Dieser Bericht wird öffentlich zugänglich sein und mit einer sehr umfassenden Bibliographie ergänzt.

Obwohl nur für drei flugzeuggestützte Systeme in diesem Beitrag Kalibrierprozeduren näher beschrieben wurden, lassen sich mehrere allgemeine Trends ableiten:

- Der System- oder Plattformkalibrierung wird wegen der Komplexität der digitalen Sensorsysteme mit verschiedenen Komponenten viel größere Bedeutung zu kommen.
- Die Bedeutung der Laborkalibrierung scheint abzunehmen, wohingegen die Bedeutung einer In-situ-Kalibrierung (d. h. der Selbstkalibrierung mit spezifischen Kalibrierflügen) definitiv zunimmt.

- Die Akzeptanz einer kombinierten Labor- und In-situ-Kalibrierung ist zurzeit noch gering, sollte aber zunehmen. Hierzu gibt es sicherlich Wissensdefizite auf Nutzerseite hinsichtlich der Eigenschaften und Vorteile einer Systemkalibrierung im Flug.

Diese Aspekte bestimmen wesentlich die zweite Phase des EuroSDR-Projektes. Es sollen allgemein akzeptierte Verfahren zur Kalibrierung getestet werden. Dabei spielt eine Validierung dieser Ergebnisse eine wichtige Rolle. Die technischen Aspekte müssen dabei sicherlich mit unterschiedlicher Priorität angegangen werden. Anfänglich werden die geometrischen Aspekte die wesentliche Rolle spielen, die in einer ökonomisch bedingt begrenzten Zahl von Testflügen verifiziert werden müssen. Zurzeit bereiten verschiedene Behörden Testflüge vor, die dazu sinnvoll mitgenutzt werden können. So sollen panchromatische Aufnahmen für geometrische Auflösungstests verwendet werden. Der Einfluss von radiometrischer 8-Bit-Auflösung gegenüber Originalauflösung des Signals auf die Messgenauigkeit ist zu untersuchen. Die Signalgröße ist geeignet zu wählen, da die Messgenauigkeit stark davon abhängt. Eine Analyse der Kamerastabilität ist durchzuführen, wobei eine sehr hohe Stabilität erwartet wird. Letztlich ist auch zu klären, ob Punktkoordinaten oder Bildprodukte (wie z. B. in den USA) überprüft werden sollen oder ob eine Kombination sinnvoll ist. Weitere Untersuchungen werden für radiometrische Aspekte, Farbe und Aspekte der Bildqualität vorbereitet.

Langfristiges Ziel ist es, aus den Erfahrungen und theoretischen Überlegungen einen Entwurf für optimale Kalibrierflugverfahren zu entwickeln und diese auch empirisch zu belegen. Generell zeigt sich schon jetzt ein enger Erfahrungsaustausch zwischen Nutzern oder potentiellen Nutzern, der sich sehr fruchtbar auf das Projekt auswirkt. Von den Kameraherstellern werden weitere Empfehlungen für die Kalibrierung und die Prozessierung der Sensordaten erwartet.

Mit diesem Projekt will EuroSDR in Kooperation mit ISPRS und Experten aus den USA diese neue Technologie unterstützen und international verbreiten. Es sollen dabei nicht Kameras verglichen werden, sondern es sollen einem weiten Nutzerkreis umfassende Informationen über individuelle Kameratypen und deren optimale Kalibrierung zur Verfügung gestellt werden, die sich auch im größtmöglichen Umfang auf vergleichbare Kameras übertragen lassen. Das Projekt unterstützt damit auch neue Kamerahersteller in dem Design geeigneter Kalibrierverfahren. Es sind jederzeit weitere Experten in dem Projekt willkommen. Weitere Informationen finden sich auf der Homepage des Projektes (IfP 2004).

Danksagung

Die Autoren danken allen Experten für die Bereitstellung von Material für das EuroSDR-Projekt. Insbesondere Prof. Gordon Petrie sei für seine kompetenten und detail-

lierten Kommentare und Beiträge zu Kamerasyystemen und den Kalibrierverfahren gedankt.

Literatur

- Brown, D.: Decentring distortions of lenses. *Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing PE&RS*, 32(3), S. 444–462, 1966.
- Brown, D.: Close range camera calibration. *PE&RS*, 37(8), S. 855–866, 1971.
- Brown, D.: The bundle adjustment – progress and prospects. Invited paper of Com. III, XIII. ISP congress Helsinki, 1976.
- Dörstel, C., Jacobsen, K., Stallman, D.: DMC – Photogrammetric accuracy – calibration aspects and generation of synthetic DMC images. *Optical 3D Measurements Symp. Proceed.*, Zürich, S. 74–82, CD-ROM, 2003.
- EuroSDR: European Spatial Data Research. www.eurosdr.org, Zugriff Juli 2004.
- Ebner, H.: Self-calibrating block adjustment. *Bildmessung und Luftbildwesen (BuL)* 44, S. 128–139, 1976.
- Fraser, C.: Digital self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52(1997), S. 149–159, 1997.
- Grün, A.: Accuracy, reliability and statistics in close-range photogrammetry. Inter-congress symposium, International Society for Photogrammetry, Com. V, Stockholm, Sweden, 1978.
- IfP: Institute for Photogrammetry, University Stuttgart, Camera Calibration Project of EuroSDR. <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/eurosdr/>, Zugriff Juni 2004.
- Meier, H.-K.: The effect of environmental conditions on distortion, calibrated focal length and focus of aerial survey cameras. *ISP Symposium*, Tokyo, 1978.
- Mostafa, M.: Camera/IMU boresight calibration – new advances and performance analysis. www.applanix.com, Zugriff April 2004, 12 Seiten, 2004.
- Pacey, R. E., Scheidt, M., Walker, S.: Calibration of analog and digital airborne sensors at LH Systems. *ASPRS symposium*, Portland, Oregon, CD-ROM, 7 Seiten, 1999.
- Petrie, G.: Airborne digital frame cameras. *GeoInformatics* 7(6), October/November 2003, S. 18–27, 2003.
- Schuster, R., Braunecker, B.: Calibration of the LH Systems ADS40 airborne digital sensor. *IAPRS*, Vol. 23, Amsterdam, CD-ROM, 7 Seiten, 2000.
- Slama, C.: Manual of photogrammetry. 4. Edition, American Society of Photogrammetry, 1056 Seiten, 1980.
- Tempelmann, U., Hinsken, L. & Recke, U. (2003): ADS40 calibration and verification process. *Optical 3D Measurements Symp. Proceed.*, Zürich, S. 48–54, 2003.
- Toposys: www.toposys.de, Zugriff April 2004.
- Zeitler, W., Dörstel, C.: Geometric calibration of the DMC: Method and results. *ISPRS Com. I Symp. Proceed.*, Denver, CD-ROM, 6 Seiten, 2002.

Anschrift der Autoren

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Gülich
Fachbereich Vermessung, Informatik, Mathematik
Hochschule für Technik – Fachhochschule Stuttgart
Schellingstraße 24, 70174 Stuttgart
eberhard.guelch@hft-stuttgart.de

Dr.-Ing. Michael Cramer
Institut für Photogrammetrie (ifp)
Universität Stuttgart
Geschwister-Scholl-Straße 24d, 70174 Stuttgart
michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de