

Geometrische Kalibrierung und Orientierung digitaler Bildaufnahmesysteme

Dipl.- Ing. Robert Godding
AICON 3D Systems GmbH
Celler Str. 32
38114 Braunschweig
robert.godding@acon.de
www.aicon.de



Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG	3
2	BEGRIFFSDEFINITIONEN.....	4
2.1	Kamerakalibrierung	4
2.2	Kameraorientierung.....	4
2.3	Systemkalibrierung	4
3	EINFLUSS INNERER UND ÄUßERER EFFEKTE AUF DIE GEOMETRISCHE LEISTUNGSFÄHIGKEIT.....	5
3.1	Innere Effekte	5
3.1.1	Optisches System.....	5
3.1.2	Elemente zur Auflösungserhöhung	5
3.1.3	Sensor und Signalübertragung.....	6
3.2	Äußere Effekte.....	6
4	MODELL DER ABBILDUNG MIT OPTISCHEN SYSTEMEN	7
5	KAMERAMODELLE	8
5.1	Kamerakonstante und Hauptpunktlage.....	9
5.2	Verzeichnung und Affinität.....	9
5.2.1	Radialsymmetrische Verzeichnung	10
5.2.2	Radial- asymmetrische und tangentielle Verzeichnung	11
5.2.3	Affinität und Nichtorthogonalität.....	12
5.2.4	Weitere Parameter	12
6	ANSÄTZE ZUR KALIBRIERUNG UND ORIENTIERUNG	13
6.1	Labormethoden.....	13
6.2	Einsatz der Bündelausgleichung zur Bestimmung von Kameraparametern.	13
6.2.1	Kalibrierung unter ausschließlicher Nutzung der Bildinformation.....	14
6.2.2	Kalibrierung und Orientierung mit Hilfe zusätzlicher Objektinformation.....	16
6.2.3	Systemkalibrierung.....	18
7	LITERATUR.....	19



1 Einführung

Die Nutzung digitaler Bildaufnahmesysteme zu Messzwecken erfordert die Möglichkeit, diese Systeme zu kalibrieren bzw. zu überprüfen. Eine solche Kalibrierung und Überprüfung ist insbesondere dann notwendig, wenn:

- eine Aussage über die erreichbare Genauigkeit des Messsystems und damit auch über die am Objekt erreichbare Messgenauigkeit getroffen werden soll;
- eine simultane Kalibrierung des Messsystems während der Messung verfahrensbedingt nicht möglich ist und daher einige oder alle Systemparameter vorab bestimmt werden müssen;
- vollständige Aufnahmesysteme oder Komponenten vom Hersteller im Rahmen der Qualitätskontrolle getestet werden sollen;
- von Einflüssen des Aufnahmesystems bereinigte digitale Bilder als Vorbereitung für weitere Arbeitsschritte (z. B. Entzerrungen) erzeugt werden sollen.

Zudem sind beim Aufbau von Messsystemen die Positionen der aufnehmenden Kameras oder sonstiger Sensoren bezüglich eines übergeordneten Weltkoordinatensystems zu ermitteln, um eine 3D- Bestimmung von Objekten innerhalb dieser Systeme zu ermöglichen.

Im folgenden sollen Verfahren zur Kalibrierung und Orientierung von Aufnahmesystemen vorgestellt werden. Dabei wird der Schwerpunkt auf photogrammetrische Verfahren gelegt, da diese eine in sich geschlossene und hochgenaue Bestimmung der benötigten Parameter ermöglichen.



2 Begriffsdefinitionen

2.1 Kamerakalibrierung

Unter einer Kalibrierung wird im photogrammetrischen Sprachgebrauch die Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung einzelner Kameras bezeichnet. Bei der Verwendung digitaler Kameras ist es sinnvoll, das vollständige Aufnahmesystem mit Kamera, Übertragungseinheiten und Framegrabber zu betrachten. Die durch eine Kalibrierung zu bestimmenden Parameter hängen ab von dem verwendeten Kameramodell. Mit einem kalibrierten Aufnahmesystem ist es möglich, Messungen durchzuführen, wobei noch die Orientierungen der Kameras bestimmt werden müssen.

2.2 Kameraorientierung

Die Orientierung von Kameras umfasst im allgemeinen die Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung zur Festlegung der Kameraposition und der Aufnahmerichtung im übergeordneten Objektkoordinatensystem, auch oft als Weltkoordinatensystem bezeichnet. Hierzu sind für jede Kamera drei Rotations- und drei Translationsparameter, also insgesamt sechs Parameter zu bestimmen.

2.3 Systemkalibrierung

In vielen Anwendungen werden feste Anordnungen verschiedener Sensoren zur Messung verwendet. Als Beispiel seien Online-Messsysteme genannt, in denen z. B. mehrere Kameras, Laserpointer, Musterprojektoren, Drehtische u.a.m. eingesetzt werden können. Betrachtet man das vollständige System als eigentliches Messwerkzeug, so kann man als Systemkalibrierung die simultane Kalibrierung und Orientierung aller beteiligten Komponenten bezeichnen.

3 Einfluss innerer und äußerer Effekte auf die geometrische Leistungsfähigkeit

3.1 Innere Effekte

Alle Komponenten eines digitalen Bildaufnahmesystems beeinflussen die Abbildung eines Objektes und damit auch die Messergebnisse, die aus der Weiterverarbeitung dieser Abbildung entstehen. Die relevanten Komponenten werden im folgenden kurz beschrieben (Abb. 1).

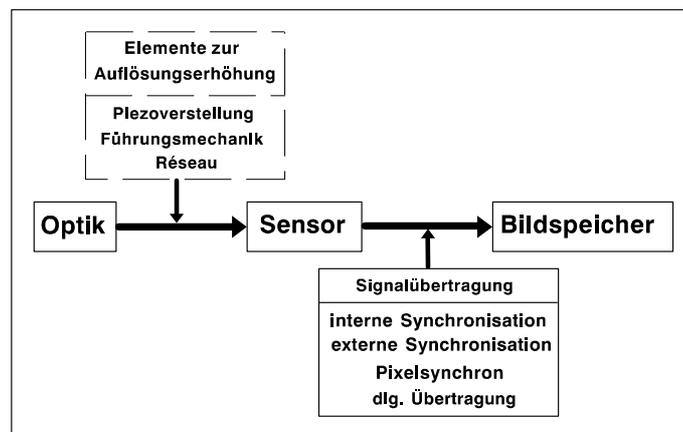


Abb. 1: Komponenten digitaler Aufnahmesysteme

3.1.1 Optisches System

Fast alle Objektive weisen typische radialsymmetrische Verzeichnungen auf, die sehr unterschiedliche Größenordnungen annehmen können. Einerseits werden in optischen Messsystemen Objektive eingesetzt, die nahezu verzeichnungsfrei sind [GODDING 1993], andererseits weisen besonders Weitwinkelobjektive oftmals Verzeichnungen von mehreren 100µm am Bildrand auf. Eine Sonderstellung nehmen Fish-Eye Objektive mit ihren zum Teil extremen Verzeichnungswerten am Bildrand ein. Da die radialsymmetrische Verzeichnung konstruktionsbedingt ist, kann in diesem Zusammenhang nicht von Objektivfehlern gesprochen werden.

Im Gegensatz dazu verursachen die bei der Objektivherstellung oftmals entstehenden Linsendenzentrierungen Abbildungsfehler, die sich in radial- asymmetrischen und tangentialen Verzeichnungsanteilen widerspiegeln [BROWN 1966]. Auch zusätzliche optische Elemente im Strahlengang, z.B. IR-Sperrfilter und Schutzglas des Sensors, beeinflussen die Abbildung und müssen bei der Kalibrierung eines Systems berücksichtigt werden.

3.1.2 Elemente zur Auflösungserhöhung

Das Format und die mögliche Auflösung von CCD-Sensoren ist begrenzt. Auf dem Markt werden derzeit zwar bereits Sensoren mit maximal 5000 * 5000 Bildelementen angeboten [LENZ u. LENZ 1993], allerdings zu hohen Preisen. Aus diesem Grunde werden verschiedene Techniken angewendet, um mit handelsüblichen Sensoren durch deren Bewegung parallel zur Bildebene höhere Auflösungen zu realisieren.



Im wesentlichen sind zwei Verfahren möglich. Beim sogenannten "Mikroscanning" werden durch eine Piezoverstellung die verwendeten Interline- Transfer- CCD- Sensoren um kleine Beträge so verschoben, dass die lichtempfindlichen Sensorelemente in die für diese Sensorbauweise typischen Lücken zwischen diesen Elementen fallen und dort zusätzliche Bildinformation erfassen [LENZ u. LENZ 1990], [RICHTER 1993]. Alternativ dazu können beim "Makroscanning" die Sensoren um ein Vielfaches der Sensorgröße verschoben werden, was zu einer Vergrößerung des Bildformates führt. Die Zuordnung der Einzelbilder zum Gesamtbild erfolgt dann entweder über eine hochgenaue Mechanik [POITZ 1993] [HOLDORF 1993], oder optisch numerisch durch die Messung eines in der Bildebene auf einer Glasplatte aufgetragenen Bezugsgitters ("Réseauscanning") [RIECHMANN 1992].

Alle Elemente zur Auflösungserhöhung beeinflussen die Gesamtgenauigkeit des Aufnahmesystems. Bei scannenden Systemen wirkt sich bei ausschließlich mechanischer Zuordnung der Einzelbilder die Genauigkeit der Verstellmechanik direkt auf die Geometrie der hochaufgelösten Bilder aus. Beim Réseauscanning ist die Genauigkeit des Réseaus bestimmend für die zu erreichende Bildmessgenauigkeit [BÖSEMANN, GODDING, RIECHMANN 1990].

3.1.3 Sensor und Signalübertragung

CCD- Sensoren bieten aufgrund ihres Aufbaus in den meisten Fällen hohe geometrische Genauigkeiten [LENZ 1988]. Zur Beurteilung eines Aufnahmesystems sollte der Sensor in Verbindung mit dem verwendeten Framegrabber betrachtet werden. Insbesondere dann, wenn keine pixelsynchrone Übertragung des Signals von Kamera zu Bildspeicher gewährleistet ist, können bei der A/D- Wandlung des Videosignals je nach Art der Synchronisierung geometrische Fehler unterschiedlicher Größenordnung auftreten [BEYER 1992] [BÖSEMANN, GODDING, RIECHMANN 1990]. Bei pixelsynchronem Auslesen der Daten hingegen wird durch die zusätzliche Übertragung des Pixeltaktes gewährleistet, dass einem Sensorelement exakt ein Bildelement im Bildspeicher entspricht. Mit diesen Kameras konnten sehr hohe Genauigkeiten nachgewiesen werden [GODDING 1993]. Allerdings kann auch bei dieser Übertragungsart nicht davon ausgegangen werden, dass die einzelnen Bildelemente quadratisch sind. Vielmehr ist - bei jeder Art der Synchronisierung- bei den meisten Sensor- Bildspeicherkombinationen ein Affinitätsfaktor zu berücksichtigen, d. h. die Ausdehnung der Pixel in Zeilen- und Spaltenrichtung kann unterschiedlich sein.

3.2 Äußere Effekte

Sind mehrere Kameras im Rahmen eines Online- Messsystems angeordnet, so können sich nach erfolgter Kalibrierung und Orientierung sowohl die Parameter der inneren Orientierung (z. B. durch Umfokussierung und Temperaturänderungen), als auch die Parameter der äußeren Orientierung (z. B. durch mechanische Einwirkungen oder Temperaturschwankungen) verändern. Die daraus resultierenden Einflüsse reichen von Maßstabsfehlern bei der Objektbestimmung bis hin zu komplexen Modelldeformationen. Aus diesem Grunde sollte in solchen Systemen eine Möglichkeit der Überprüfung bzw. der Neubestimmung aller relevanten Parameter vorhanden sein.

4 Modell der Abbildung mit optischen Systemen

Grundsätzlich lässt sich die Abbildung eines optischen Systems nach den mathematischen Regeln der Zentralprojektion beschreiben. Damit wird ein Objekt so in eine Ebene abgebildet, dass die Objektpunkte P_i sowie die zugehörigen Bildpunkte P'_i auf Geraden durch das Projektionszentrum O_j liegen (Abb. 2). Für die Abbildung eines Objektpunktes in die Bildebene gilt unter idealisierten Bedingungen

$$\begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \end{bmatrix} = \frac{-c}{Z^*_{ij}} \begin{bmatrix} X^*_{ij} \\ Y^*_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

mit

$$\begin{bmatrix} X^*_{ij} \\ Y^*_{ij} \\ Z^*_{ij} \end{bmatrix} = D(\omega, \varphi, \kappa)_j \begin{bmatrix} X_i - X_{O_j} \\ Y_i - Y_{O_j} \\ Z_i - Z_{O_j} \end{bmatrix} \quad (2)$$

wobei

X_i, Y_i, Z_i die Koordinaten eines Objektpunktes P_i im Objektkoordinatensystem K ,
 $X_{O_j}, Y_{O_j}, Z_{O_j}$ die Koordinaten des Projektionszentrums O_j im Objektkoordinatensystem K ,
 $X^*_{ij}, Y^*_{ij}, Z^*_{ij}$ die Koordinaten des Objektpunktes P_i im Koordinatensystem K^*_j ,
 x_{ij}, y_{ij} die Koordinaten des Bildpunktes im Bildkoordinatensystem K_B sind und

$D(\omega, \varphi, \kappa)_j$ die Drehmatrix zwischen K und K^*_j sowie

c der Abstand des Projektionszentrums von der Bildebene ist

Dabei liegt das System K^*_j parallel zum System K_B mit dem Ursprung im Projektionszentrum O_j [WESTER-EBBINGHAUS 1989].

Durch obige Darstellung wird der Abbildungsvorgang derart aufgeteilt, dass in (1) im wesentlichen die Bildraumparameter, in (2) hingegen im wesentlichen die Objektraumparameter, d.h. die Parameter der äußeren Orientierung zum Tragen kommen.

Diese Idealvorstellung wird in der Realität nicht erreicht. Vielmehr treten - bedingt durch die unterschiedlichen Komponenten des Aufnahmesystems - eine Vielzahl von Einflüssen auf. Diese Einflüsse lassen sich als Abweichung von der strengen Zentralprojektion modellieren. Verschiedene Möglichkeiten der mathematischen Kameramodellierung werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

5 Kameramodelle

Bei der Nutzung optischer Systeme zu Messzwecken ist die Modellierung des vollständigen Abbildungsvorganges entscheidend für die zu erreichende Genauigkeit. Grundsätzlich gleiche Überlegungen gelten z. B. für Projektionseinrichtungen, die ebenfalls ähnlich wie ein Aufnahmesystem modelliert werden können.

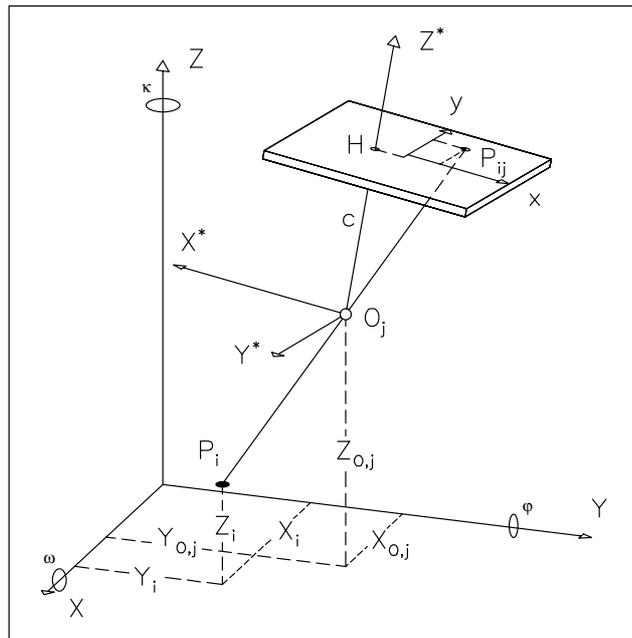


Abb. 2: Prinzip der Zentralprojektion [DOLD 1994]

Grundlage für die weitere Betrachtung ist die Definition eines Bildkoordinatensystems K_B in der Bildebene der Kamera. Diese Bildebene wird bei den meisten elektrooptischen Kameras durch die Sensorebene definiert, nur bei speziellen Kameras (z. B. Réseau-Scanning-Cameras [RIECHMANN 1992]) ist die Bildebene anders festgelegt. Während bei den meisten zu Messzwecken benutzten analogen Kameras das Bildkoordinatensystem durch projizierte Rahmenmarken oder ein Réseau festgelegt wird, ist diese Definition für digitale Kameras nicht notwendig. Hier reicht es aus, den Ursprung des Bildkoordinatensystems in die Mitte der im Bildspeicher vorhandenen digitalen Bilder zu legen (Abb. 3). Da der Abstand von Bildelementen in Spaltenrichtung im Bildspeicher gleich dem Abstand der entsprechenden Sensorelemente ist, kann als Maßeinheit im Bildraum die Einheit "Bildelement in Spaltenrichtung" dienen. Alle Parameter der inneren Orientierung können - ohne Umrechnung in metrische Größen - sofort in dieser Einheit berechnet werden.

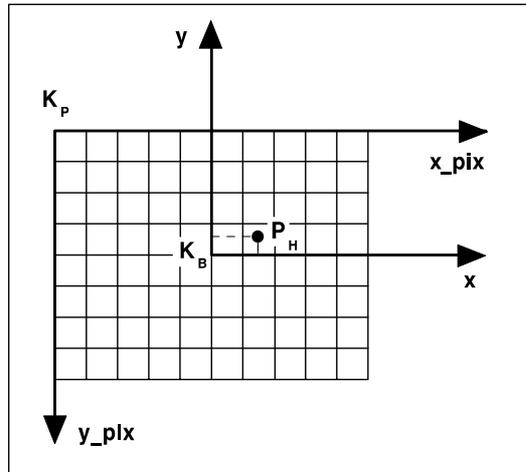


Abb. 3: Festlegung des Bildkoordinatensystems

5.1 Kamerakonstante und Hauptpunktlage

Die Bezugsachse zur Kameramodellierung ist nicht die optische Achse im physikalischen Sinne, sondern ein Hauptstrahl, der objektseitig senkrecht auf der oben definierten Bildebene steht und diese im Bildhauptpunkt P_H (x_H, y_H) durchstößt. Das Projektionszentrum O_j liegt im Abstand c_K (auch als Kamerakonstante bezeichnet) senkrecht vor dem Bildhauptpunkt [RÜGER, PIETSCHNER, REGENSBURGER 1978].

Damit erweitert sich die ursprüngliche Formulierung der Gleichung (1) wie folgt:

$$\begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \end{bmatrix} = \frac{-c_k}{Z^*_{ij}} \begin{bmatrix} X^*_{ij} \\ Y^*_{ij} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_H \\ y_H \end{bmatrix} \quad (3)$$

5.2 Verzeichnung und Affinität

Für die radialsymmetrische und die radial-asymmetrische und tangentielle Verzeichnung sowie die Affinität lässt sich in Gleichung (3) eine weitere Korrekturfunktion wie folgt anbringen.

$$\begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \end{bmatrix} = \frac{-c_k}{Z^*_{ij}} \begin{bmatrix} X^*_{ij} \\ Y^*_{ij} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_H \\ y_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx(V, A) \\ dy(V, A) \end{bmatrix} \quad (4)$$

dx und dy können jetzt, in Abhängigkeit von dem verwendeten Kameramodell, unterschiedlich definiert sein und setzen sich aus verschiedenen Anteilen wie folgt zusammen:

$$dx = dx_{sym} + dx_{asy} + dx_{aff} \quad (5)$$

$$dy = dy_{sym} + dy_{asy} + dy_{aff} \quad (6)$$

5.2.1 Radialsymmetrische Verzeichnung

Die für jedes Objektiv charakteristische radialsymmetrische Verzeichnung lässt sich im allgemeinen mit genügender Genauigkeit durch ein Polynom ungerader Potenzen des Bildradius wie folgt darstellen (im folgenden wird zur Vereinfachung x_{ij} und y_{ij} als x und y bezeichnet):

$$dr_{sym} = A_1(r^3 - r_0^2 r) + A_2(r^5 - r_0^4 r) + A_3(r^7 - r_0^6 r) \quad (7)$$

mit

dr_{sym} : Radialsymmetrische Verzeichnungskorrektur

r : Bildradius aus $r^2 = x^2 + y^2$

A_1, A_2, A_3 : Polynomkoeffizienten

r_0 : Zweiter Nulldurchgang der Verzeichnungskurve

wobei

$$dx_{sym} = \frac{dr_{sym}}{r} x \quad (8)$$

$$dy_{sym} = \frac{dr_{sym}}{r} y \quad (9)$$

In den meisten Fällen reicht zur Beschreibung ein Polynom mit zwei Koeffizienten bereits zur Beschreibung der radialsymmetrischen Beschreibung aus. Durch Erweiterung dieses Verzeichnungsmodells ist es möglich, auch Objektive mit starker Abweichung von der Zentralprojektion (z.B. Systeme mit Fish-Eye- Optik) hinreichend gut zu beschreiben, wobei sich bei sehr starken Verzeichnungen die Einführung eines zusätzlichen Symmetriepunktes $P_S (x_S, y_S)$ als sinnvoll erweist. Eine typische Verzeichnungskurve zeigt die Abbildung 4.

Zur numerischen Stabilisierung und weitgehenden Vermeidung von Korrelationen zwischen den Koeffizienten der Verzeichnungsfunktion und der Kamerakonstanten wird durch die Vorgabe eines zweiten Nulldurchgangs ein linearer Anteil der Verzeichnungskurve abgespalten [WESTER-EBBINGHAUS 1980].

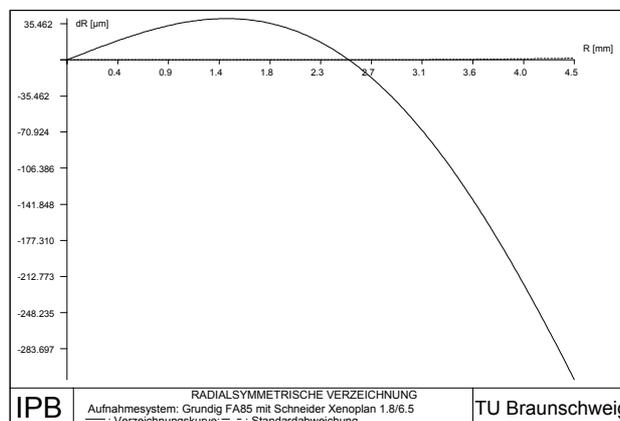


Abb. 4: Typische Verzeichnungskurve eines Objektivs

[LENZ 1987] stellt einen anderen Ansatz zur Bestimmung der radialsymmetrischen Verzeichnung dar, der nur einen Koeffizienten berücksichtigt. Damit ergibt sich eine Formulierung wie folgt:

$$dr_{sym} = r \frac{1 - \sqrt{1 - 4Kr^2}}{1 + \sqrt{1 - 4Kr^2}} \quad (10)$$

wobei K der zu bestimmende Verzeichnungskoeffizient ist.

5.2.2 Radial- asymmetrische und tangentiale Verzeichnung

Für die Darstellung der radial-asymmetrischen und tangentialen Verzeichnung sind verschiedene Formulierungen möglich. Zurückgehend auf [CONRADY 1919] lassen sich diese Verzeichnungsanteile wie folgt formulieren [BROWN 1966]:

$$dx_{asy} = B_1(r^2 + 2x^2) + 2B_2xy \quad (11)$$

$$dy_{asy} = B_2(r^2 + 2y^2) + 2B_1xy \quad (12)$$

Die Beschreibung dieser Effekte erfolgt also mit den zwei zusätzlichen Parametern B_1 und B_2 .

Eine Erweiterung dieses Ansatzes beschreibt [BROWN 1976], wobei zusätzlich zu den radial-asymmetrischen und tangentialen Verzeichnungsanteilen noch Parameter zur Beschreibung globaler Bilddeformationen bzw. der Unebenheit der Bildebene eingeführt werden.

$$dx_{asy} = (D_1(x^2 - y^2) + D_2x^2y^2 + D_3(x^4 - y^4))x / c_K + E_1xy + E_2y^2 + E_3x^2y + E_4xy^2 + E_5x^2y^2 \quad (13)$$

$$dy_{asy} = (D_1(x^2 - y^2) + D_2x^2y^2 + D_3(x^4 - y^4))y / c_K + E_6xy + E_7x^2 + E_8x^2y + E_9xy^2 + E_{10}x^2y^2 \quad (14)$$

Allerdings besteht bei dieser Formulierung aufgrund der großen Anzahl von Koeffizienten sehr leicht die Gefahr der Überparametrisierung. Da zudem dieses Modell in erster Linie für großformatige analoge Aufnahmesysteme entwickelt wurde, sind einige Parameter für Anwendungen mit digitalen Aufnahmesystemen nicht direkt interpretierbar. Im allgemeinen reicht zur Beschreibung asymmetrischer Effekte die Formulierung in (8) und (9) aus. Typische Auswirkungen für radial-asymmetrische und tangentiale Verzeichnungen zeigt Abb. 5.

5.2.3 Affinität und Nichtorthogonalität

Die im allgemeinen durch die Synchronisation hervorgerufenen Unterschiede in Länge und Breite der im Bildspeicher abgelegten Bildelemente lassen sich durch einen Affinitätsfaktor berücksichtigen. Zusätzlich kann auch eine Affinitätsrichtung bestimmt werden, die in erster Linie die Orthogonalität der Achsen des Bildkoordinatensystems K_B beschreibt. Als Beispiel sei hier ein nicht senkrecht zur Zeilenrichtung verfahrenender Zeilenscanner genannt. Beide Effekte lassen sich wie folgt berücksichtigen:

$$dx_{aff} = C_1x + C_2y \quad (15)$$

$$dy_{aff} = 0 \quad (16)$$

Die Auswirkungen der Affinität wird beispielhaft in Abb. 6 dargestellt.

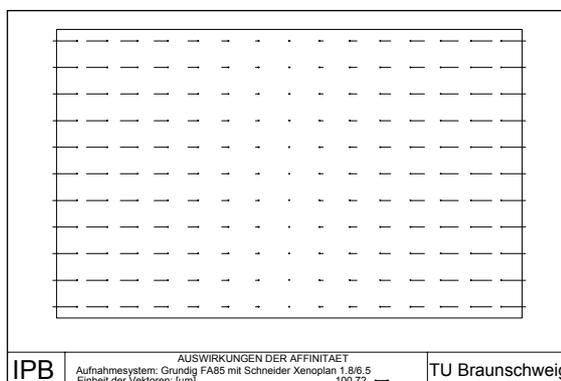
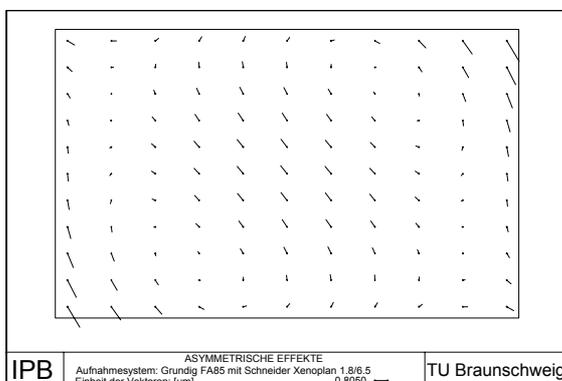


Abb. 5: Radial - asymmetrische und tangentielle Verzeichnung

Abb. 6: Auswirkungen der Affinität

5.2.4 Weitere Parameter

Neben den beschriebenen Parametern kann die Einführung weiterer Kenngrößen für spezielle Anwendungsfälle interessant sein. [FRYER 1989] und [FRASER u. SHORTIS 1992] beschreiben Ansätze, die zusätzlich noch entfernungsabhängige Verzeichnungsanteile berücksichtigen. Diese haben jedoch in erster Linie bei mittel- und großformatigen Bildformaten und entsprechenden Objektiven Einfluss und spielen für das breite Feld der digitalen Anwendungen eine untergeordnete Rolle.

[GERDES, OTTERBACH und KAMMÜLLER 1993] nutzen ein anderes Kameramodell, in dem zusätzlich 2 Parameter für die Schrägstellung des Sensors zur optischen Achse bestimmt werden müssen.



6 Ansätze zur Kalibrierung und Orientierung

6.1 Labormethoden

Die Bestimmung von Verzeichnungsparametern lässt sich im Labor unter fest definierten Bedingungen durchführen.

Beim Goniometerverfahren wird in der Bildebene einer Kamera eine Platte mit einem hochgenauen Gitter angebracht. Mit einem Goniometer werden von der Objektseite her die Gitterpunkte angezielt und die entsprechenden Winkel bestimmt. Aus einem Soll-Ist Vergleich lassen sich dann Werte für die Verzeichnung ermitteln .

Bei Kollimatorverfahren können von mehreren, in definierten Winkeln zueinander angeordneten Kollimatoren, Testfiguren auf die Bildebene projiziert werden. Auch hier lassen sich die Parameter der inneren Orientierung durch einen Soll-Ist Vergleich ermitteln, allerdings nur für auf ∞ fokussierte Kameras [RÜGER, PIETSCHNER, REGENSBURGER 1978].

Neben dieser Einschränkung gibt es weitere Gründe, die gegen den Einsatz oben genannter Laborverfahren für die Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme sprechen. Dazu gehört, dass

- der apparative Aufwand sehr groß ist;
- die innere Orientierung der verwendeten Kameras im allgemeinen nicht stabil ist, was eine Nachkalibrierung in regelmäßigen Abständen beim Nutzer erfordert;
- die innere Orientierung einschließlich Verzeichnung sich bei unterschiedlichen Fokussierungen und Blendeneinstellungen ändert und damit eine Kalibrierung unter Einsatzbedingungen sinnvoller ist.

6.2 Einsatz der Bündelausgleichung zur Bestimmung von Kameraparametern.

Die Bestimmung aller zur Kalibrierung und Orientierung notwendigen Parameter kann im Rahmen einer photogrammetrischen Bündelausgleichung erfolgen. Bei der Bündelausgleichung werden, aufbauend auf den Gleichungen (2) und (4), für jeden in einem Bild gemessenen Punkt zwei sog. Beobachtungsgleichungen aufgestellt. Die Gesamtheit aller Gleichungen für die Bildpunkte aller betrachteten Objektpunkte führt zu einem System, das die Bestimmung der unbekannt Parameter ermöglicht. Da es sich um ein nichtlineares Gleichungssystem handelt, muss zunächst linearisiert werden. Die Berechnung wird iterativ nach der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt, wobei die Bestimmung der Unbekannten so erfolgt, dass die Quadrate der Abweichungen an den beobachteten Bildkoordinaten minimiert werden. Damit erlaubt die Bündelausgleichung eine simultane Bestimmung der unbekannt Objektkoordinaten, der äußeren Orientierung sowie der inneren Orientierung mit allen relevanten Systemparametern des Aufnahmesystems. Zusätzlich werden für alle Parameter Standardabweichungen berechnet, wodurch eine Beurteilung der Güte des Aufnahmesystems möglich wird.

Beispiele für kommerziell verfügbare, speziell für Nahbereichsanwendungen optimierte, leistungsfähige Bündelprogramme, sind BINGO [KRUCK 1984], CAP [HINSGEN 1989], MOR [WESTER-EBBINGHAUS 1985a], ORIENT [KAGER 1989] und STARS [BROWN 1982].

6.2.1 Kalibrierung unter ausschließlicher Nutzung der Bildinformation.

Dieses Verfahren ist besonders geeignet zur Kalibrierung einzelner Bildaufnahmesysteme. Es erfordert die Aufnahme eines Punktfeldes in einem geometrisch stabilen photogrammetrischen Verband. Das Punktfeld braucht keine Punkte mit bekannten Objektkoordinaten (also keine Passpunkte) zu beinhalten, die Koordinaten aller Punkte müssen nur näherungsweise bekannt sein [WESTER-EBBINGHAUS 1985a]; allerdings ist gefordert, dass das Punktfeld während der Aufnahmezeit stabil ist. Der Maßstab des Punktfeldes ist ebenfalls ohne Einfluss auf die Bestimmung der gesuchten Bildraumparameter. Abb. 7 zeigt ein für die Kalibrierung geeignetes Punktfeld.

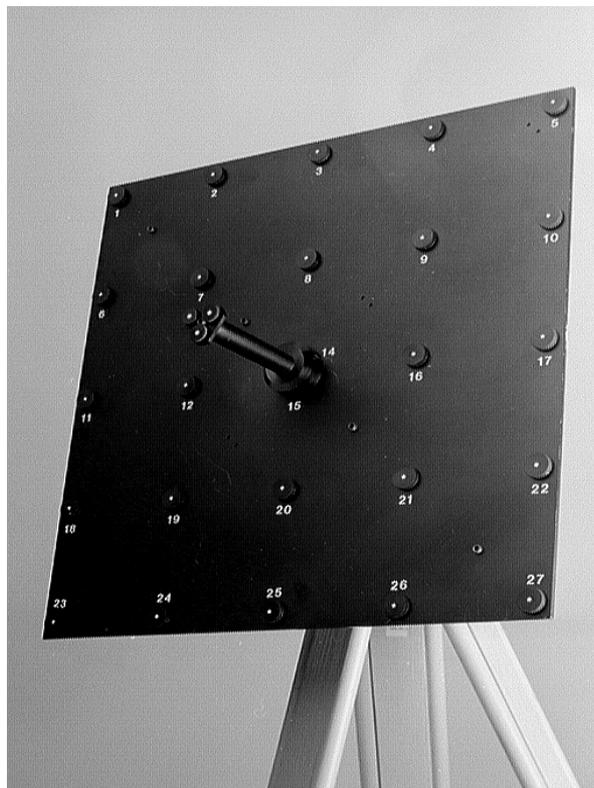


Abb. 7: Testfeld zur Kamerakalibrierung

Die Genauigkeit des zu untersuchenden Systems lässt sich aufgrund der Restklaffungen an den Bildkoordinaten sowie der Standardabweichung der Gewichtseinheit nach der Ausgleichung beurteilen (Abb. 8). Hier werden z. B. Auswirkungen durch Synchronisationsfehler sofort deutlich, etwa durch größere Restklaffungen mit unterschiedlicher Größenordnung in Zeilen- und Spaltenrichtung.

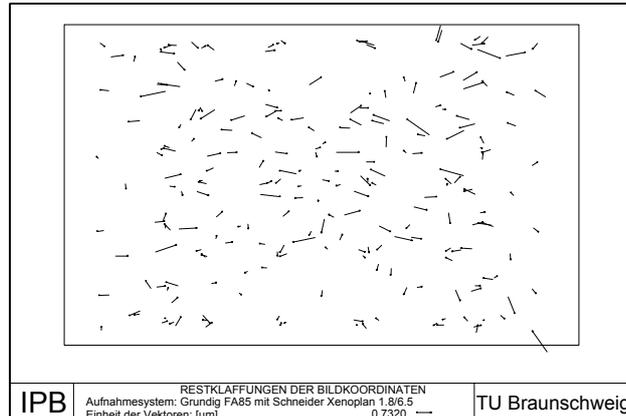


Abb. 8: Restklaffungen nach der Bündelausgleichung

Abb. 9 zeigt schematisch die Mindestanordnung zur Aufnahme eines Punktfeldes, mit der die beschriebenen Systemparameter bestimmbar sind. Als Punktfeld kann ein räumliches Testfeld mit einer ausreichenden Anzahl von gut verteilten, kreisförmigen, retroreflektierenden Punktmarken dienen. Dieses Testfeld wird zunächst in drei frontalen Aufnahmen abgebildet, wobei Kamera und Feld einmal zur Bestimmung der Affinität um 100gon und einmal zur Bestimmung der Hauptpunktlage um 200gon gegeneinander gekantet sind. Zusätzlich werden vier konvergente Aufnahmen des Testfeldes verwendet, um dem Verband die notwendige geometrische Stabilität zur Bestimmung der Objektkoordinaten zu geben und Korrelationen mit der äußeren Orientierung zu minimieren.

Zur Ermittlung der Verzeichnungsparameter ist eine gute Ausnutzung des Bildformates Voraussetzung. Diese Forderung muss jedoch nicht für alle Einzelbilder erfüllt sein. Es genügt, wenn die Bildpunkte aller Aufnahmen zusammen das Format gleichmäßig und vollständig ausfüllen.

Beachtet man diese Anordnung, erhält man sieben Bilder, die etwa dem Schema in Abb. 10 entsprechen, wobei der jeweils äußere Rahmen das Bildformat, der innere Rahmen die Abbildung des quadratischen Testfeldes und die Pfeilspitze die Stellung des Testfeldes symbolisieren. In den meisten Fällen ist es sinnvoll, während der Aufnahmen nicht die Kamera zu bewegen, sondern das Testfeld mittels einer geeigneten Aufhängung vor der Kamera in die entsprechenden Positionen zu drehen.

Die Verwendung retroreflektierender Marken und eines Ringlichtes gewährleistet eine sehr gute und kontrastreiche Abbildung der Objektpunkte als Voraussetzung für eine sichere und genaue Messung. Ein vollständiges, kommerziell verfügbares Programmpaket, das die beschriebenen Arbeitsschritte weitgehend automatisiert durchführt, ist in [GODDING 1993] beschrieben.

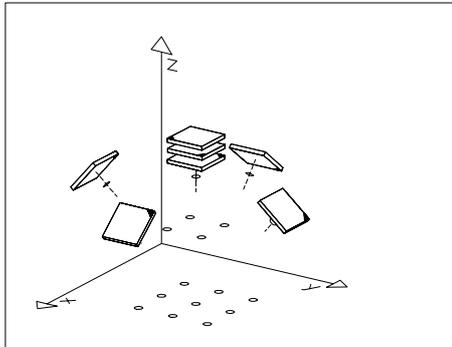


Abb. 9: Aufnahmeanordnung zur Kalibrierung [GODDING 1993]

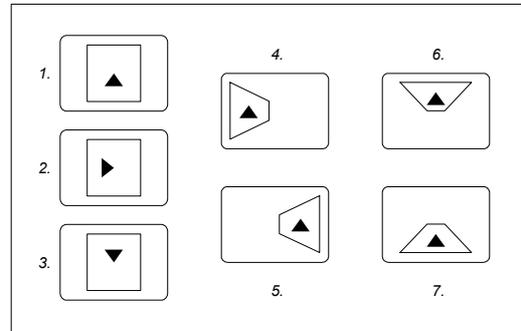


Abb. 10: Abbildung des Testfeldes

6.2.2 Kalibrierung und Orientierung mit Hilfe zusätzlicher Objektinformation

Ist ein Aufnahmesystem kalibriert, kann dessen Orientierung durch einen räumlichen Rückwärtsschnitt ermittelt werden. Der räumliche Rückwärtsschnitt kann als Sonderfall der Bündelausgleichung angesehen werden, wobei die Parameter der inneren Orientierung und die Objektkoordinaten bekannt sind. Voraussetzung sind damit also mindestens drei räumlich verteilte Passpunkte, deren Objektkoordinaten im Weltkoordinatensystem bekannt sind und deren Bildpunkte mit dem zu orientierenden Aufnahmesystem gemessen wurden.

Zusätzlich zur Orientierung ist auch die Kalibrierung eines Aufnahmesystems schon mit einem Bild möglich. Da mit einem Bild allerdings keine Bestimmung von Objektkoordinaten möglich ist, muss eine entsprechende Information im Objekt in Form eines räumlichen Passpunktfeldes vorhanden sein [WESTER-EBBINGHAUS, 1985b]. Die Herstellung, Unterhaltung und die ständige Kontrolle eines solchen Passpunktfeldes ist allerdings aufwendig, zumal das Feld auch transportabel sein sollte, damit es für verschiedene Anwendungen genutzt werden kann. Die Größe der Passpunktfigur sollte den Messbereich der zu kalibrierenden und orientierenden Kameras ausfüllen, damit eine weitgehende Übereinstimmung von Kalibrier- und Messvolumen besteht.

Wesentlich geringer wird der Aufwand, wenn mehrere Bilder zur Verfügung stehen. Für einen Zwei-Bild-Verband mit einer Kamera genügt ähnlich wie in Abschnitt 6.2.1 ein räumliches Punktfeld, dessen Punkte nur näherungsweise bekannt sein müssen, sowie als zusätzliche Information mehrere im Objektraum verteilte bekannte Strecken (Maßstäbe). Dabei sind im Idealfall je ein Maßstab in Aufnahme- und senkrecht zur Aufnahme- sowie zwei Schrägmaßstäbe in zwei zueinander senkrechten, zur Aufnahme- parallelen Ebenen notwendig (Abb. 11). Der im Objekt notwendige Aufwand wird damit erheblich reduziert, da die Herstellung und Kontrolle von Maßstäben im Gegensatz zu einem dreidimensional ausgedehnten Passpunktfeld erheblich einfacher ist.

Eine ähnliche Anordnung ist möglich, wenn statt eines Zwei-Bild-Verbandes mit einer Kamera dieser Verband mit verschiedenen Kameras aufgenommen wird. Dieser Fall ist prinzipiell im Fall eines On-Line Messsystems gegeben. Es ist dann zusätzlich noch ein Maßstab im Vordergrund des Objektraumes notwendig, so dass insgesamt fünf Maßstäbe notwendig sind (Abb. 12).

Falls mindestens eine der beiden Kameras wälzbar ist, kann auf die Schrägmaßstäbe verzichtet werden, wenn die gewälzte Aufnahme zur Kalibrierung genutzt wird [WESTER-EBBINGHAUS 1985b].

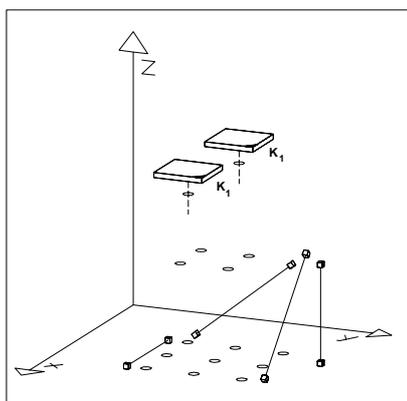


Abb. 11: Maßstabsanordnung zur -
Kalibrierung einer Kamera

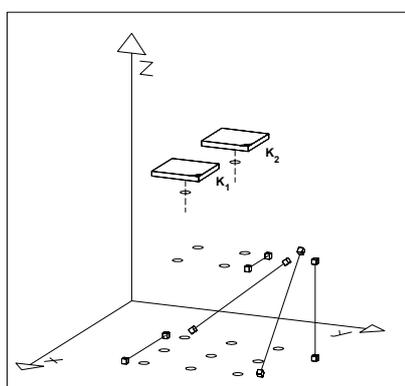


Abb. 12: Maßstabsanordnung zur-
Kalibrierung von zwei Kameras

Die beschriebenen Anordnungen sind natürlich ebenfalls für mehr als zwei Kameras gültig, d.h. eine Kalibrierung aller Kameras innerhalb eines Messsystems wird möglich, wenn für alle Kameras Bedingungen geschaffen werden, die den oben genannten entsprechen. Es müssen also mindestens jeweils zwei Kameras gemeinsam kalibriert werden, wobei die Maßstäbe wie beschrieben angeordnet sein müssen. Möglich ist auch eine gleichzeitige Kalibrierung aller Kameras, dann muss allerdings auch die Maßstabsinformation allen Kameras gleichzeitig zur Verfügung stehen. Sollen alle Kameras auch gemeinsam orientiert werden, muss dies über gemeinsame Punkte geschehen.



6.2.3 Systemkalibrierung.

Aus den Abschnitten 6.2.1 und 6.2.2 wird bereits deutlich, dass eine gemeinsame Kalibrierung und Orientierung aller beteiligten Kameras und damit eine vollständige Systemkalibrierung möglich ist, wenn bestimmte Bedingungen erfüllt sind. Grundsätzlich sind mit einem geeigneten Passpunktfeld bzw. mit einem räumlichen Punktfeld nicht bekannter Koordinaten und zusätzlichen Maßstäben beide Aufgaben unter Nutzung der Möglichkeiten der Bündelausgleichung gemeinsam lösbar. Dabei befinden sich die Kameras bei der Kalibrierung schon in ihrer Messposition. Etwaige Korrelationen zwischen den zu bestimmenden äußeren und inneren Orientierungen werden damit unschädlich, da die Kalibrieranordnung der Messanordnung entspricht.

Neben den Aufnahmesystemen können im Rahmen der Systemkalibrierung auch weitere Komponenten kalibriert und orientiert werden. [LUHMANN u. GODDING 1992] beschreiben ein Verfahren, mit dem durch einen geeigneten Messablauf in einem Online-Messsystem sowohl die innere und äußere Orientierung der beteiligten Kameras als auch die Orientierung eines Drehtisches mittels eines räumlichen Punktfeldes und zusätzlichen Maßstäben ermittelt wird. Die Kalibrierung eines Linienprojektors innerhalb eines Messsystems mittels photogrammetrischer Methoden wird von [STRUTZ 1993] vorgestellt.

7 Literatur

- ABDEL-AZIZ, Y. J., KARARA, H. M. 1971:** Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close Range Photogrammetry, Symposium of the American Society of Photogrammetry on Close Range Photogrammetry, Fall Church, Virginia 1971.
- BEYER, H., 1992:** Advances in Characterisation and Calibration of Digital Imaging Systems, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Com. V, Vol. XXIX, pp. 545 - 555, 17. ISPRS Kongress Washington 1992.
- BÖSEMANN, W., GODDING, R., RIECHMANN, W. 1990:** Photogrammetric Investigation of CCD Cameras. ISPRS Symposium Com. V. Close Range Photogrammetry meets Machine Vision, Zürich, Proc. SPIE 1395, pp. 119 - 126.
- BOPP, H., KRAUS, H. 1978:** Ein Orientierungs- und Kalibrierungsverfahren für nichttopographische Anwendungen der Photogrammetrie, Allgemeine Vermessungs Nachrichten (AVN) 5/87, pp. 182 - 188.
- BROWN, D. C. 1966:** Decentering distortion of lenses. Photogrammetric Engineering 1966, pp. 444 - 462.
- BROWN, D. C. 1976:** The Bundle Adjustment - Progress and Prospectives, International Archives of Photogrammetry 21(III), paper 303041, Helsinki
- BROWN, D.C., 1982:** STARS. A turnkey system for close range photogrammetry. International Archives of Photogrammetry, 24(V/1), 1982.
- CONRADY, A. 1919:** Decentered Lens Systems. Royal Astronomical Society. Monthly Notices. Vol. 79, 1919, pp. 384-390.
- DOLD, J. 1994:** Photogrammetrie in: Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau, Hrsg. W. Schwarz, Schriftenreihe des Deutschen Vereins für Vermessungswesen DVW, im Druck (1994)
- FRASER, C., SHORTIS, M. 1992:** Variation of Distortion within the Photographic Field. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Vol. 58 1992/6, pp. 851-855.
- FRYER, J., BROWN, D. C. 1986:** Lense Distortion for Close-Range Photogrammetry Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Vol. 52 1986/1, pp. 51-58.
- FRYER, J. 1989:** Camera Calibration in Non Topographic Photogrammetry. in: Handbook of Non Topographic Photogrammetry, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2. Auflage, pp. 51 - 69.
- GODDING, R., LUHMANN, T. 1992:** Calibration and Accuracy Assessment of a Multi-Sensor Online- Photogrammetric System, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Com. V, Vol. XXIX, pp. 24 - 29, 17. ISPRS Kongress Washington 1992.
- GODDING, R. 1993:** Ein photogrammetrisches Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 2/93, pp. 82 - 90.
- GERDES, R. OTTERBACH,R., KAMMÜLLER, R. 1993:** Kalibrierung eines digitalen Bildverarbeitungssystems mit CCD-Kamera. Technisches Messen 60 1993/6, pp. 256 - 261



HINSKEN L., 1989: CAP: Ein Programm zur kombinierten Bündelausgleichung auf Personal-Computern. Bildmessung und Luftbildwesen 57, 1989.

HOLDORF, M. 1993: Höchstaflösende digitale Aufnahmesysteme mit Réseau Scanning und Line Scan Kameras. Symposium Bildverarbeitung '93, Technische Akademie Esslingen, pp. 45 -51.

KAGER, H. 1989: Orient: A Universal Photogrammetric Adjustment System. Optical 3D-Measurement Techniques 1989, Wichmann Verlag, pp. 447-455.

KRUCK, E. 1984: BINGO: Ein Bündelprogramm zur Simultanausgleichung für Ingenieur-anwendungen - Möglichkeiten und praktische Ergebnisse. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 25(AS), 1984.

LENZ, R. 1987: Linsenfehlerkorrigierte Eichung von Halbleiterkameras mit Standardobjektiven für hochgenaue 3D-Messungen in Echtzeit. Informatik Fachberichte 149, 9. DAGM-Symposium Braunschweig, pp. 212-216

LENZ, R. 1988: Zur Genauigkeit der Videometrie mit CCD- Sensoren. Informatik Fachbe-richte 180. 10. DAGM-Symposium Zürich, pp. 179-189.

LENZ, R., LENZ, U. 1990: Calibration of a color CCD camera with 3000*2300 picture ele-ments. ISPRS Symposium Com. V. Close Range Photogrammetry meets Machine Vision, Zürich, Proc. SPIE 1395, pp. 104 - 111.

LENZ, R., LENZ, U. 1993 New developments in high resolution image acquisition with CCD area sensors, Optical 3D Measurement Techniques II, Wichmann Verlag, Karlsruhe 1993, pp. 53 - 62.

POITZ, H., 1993: Die UMK SCAN von Carl Zeiss Jena, ein neues System für die digitale Industrie-Photogrammetrie. Tagungsband zur DGPF- Jahrestagung 1992 in Jena, DGPF, Berlin 1993.

RICHTER, U. 1993: Hardwarekomponenten für die Bildaufnahme mit höchster örtlicher Auflösung. Tagungsband zur DGPF- Jahrestagung 1992 in Jena, DGPF, Berlin 1993.

RIECHMANN, W. 1992: Hochgenaue photogrammetrische on-line Objekterfassung. Dissertation Braunschweig, 1993

RÜGER, PIETSCHNER, REGENSBURGER 1978: Photogrammetrie - Verfahren und Ge-räte. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1978.

STRUTZ, T. 1993 Ein genaues aktives optisches Triangulationsverfahren zur Oberflächenvermessung. Dissertation TU Magdeburg, 1993.

WESTER- EBBINGHAUS, W. 1980: Photographisch-numerische Bestimmung der geometrischen Abbildungseigenschaften eines optischen Systems. Optik 3/1980, pp. 253-259.

WESTER- EBBINGHAUS, W. 1985a: Bündeltriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen. Zeitschrift für Vermessungswesen 3/1985, pp. 101 - 111.

WESTER- EBBINGHAUS, W. 1985b: Verfahren zur Feldkalibrierung von photogramme-trischen Aufnahmekammern im Nahbereich, DGK Reihe B, Heft Nr. 275, pp. 106 - 114.

WESTER- EBBINGHAUS, W. 1989: Mehrbild-Photogrammetrie - Räumliche Triangu-lation mit Richtungsbündeln. Symposium Bildverarbeitung '89 Technische Akademie Esslin-gen. pp. 25.1- 25.13