

ANALYTISCHE KAMMERKALIBRIERUNG

(ANALYTICAL CAMERA CALIBRATION)

W. Wester-Ebbinghaus

Institut für Photogrammetrie
Universität Hannover

ABSTRACT

Close-range applications often require high stability and precision of the interior orientation of the imaging system, which often cannot be guaranteed by the instrumental possibilities of available cameras. Simultaneous camera calibration is therefore essential in high precision close-range photogrammetry.

This paper presents arrangements and procedures for simultaneous camera calibration which use additional information in object space like distances, directions and convergent photos within a bundle adjustment.

EINLEITUNG - DIE PHOTOGRAMMETRISCHE AUFNAHMEKAMMER

Durch den Einsatz von photogrammetrischen Meßkammern wird die innere Orientierung der Aufnahmekammer instrumentell festgelegt. Bei einer Meßkammer (Abb. 1) ist die Bildfläche als Ebene ausgebildet, über der das Projektionszentrum in einem stabilen Kammergehäuse fest angebracht ist, so daß sich seine Lage im Bildraum in dem auf der Bildebene definierten Koordinatensystem durch Kammerkalibrierung reproduzierbar bestimmen läßt. Damit kann das Aufnahmestrahlenbündel aus den Bildpunkten wiederhergestellt werden, so daß nur noch seine äußere Orientierung zu bestimmen ist.

An die Genauigkeit der Parameter der inneren Orientierung sind der Aufnahmeordnung entsprechend unterschiedlich hohe Forderungen zu stellen. Im theoretischen Sonderfall der strengen Senkrechtaufnahme über streng ebenem Objekt (Abb. 2) könnte die innere Orientierung beliebig vorgegeben werden. Die Anforderungen an die Genauigkeit der Bildraumparameter steigen mit der Tiefenausdehnung des Objekts (Abb. 3). Bei nicht paralleler Aufnahmerichtung muß die innere Orientierung der Aufnahmekammer mit einer von der Größe der gegenseitigen Bildneigung abhängigen Genauigkeit gegeben sein (Abb. 4).

Große Objektiefe und stark konvergente Aufnahmerichtungen in räumlichen Bildverbänden sind typisch für Anwendungen der Photogrammetrie im Nahbereich, so daß bei gleichzeitig hoher Genauigkeitsforderung das Prinzip der Meßkammer, das Prinzip, die innere Orientierung der Aufnahmekammer über einen längeren Zeitraum als bekannt vorauszusetzen, kaum einzuhalten ist. Man kann unter diesen Umständen nach Abb. 5 eher vom Prinzip der Teil-Meßkammer sprechen. Bei einer Teil-Meßkammer sind Bildebene und Bildraum-Bezugssystem ausreichend genau definiert, die Anforderungen an die Lage des Projektzentrums im Bildraum aber übersteigen die instrumentellen Gegebenheiten der Kammer, die innere Orientierung kann bestenfalls für eine Aufnahmeserie als ausreichend konstant, nicht aber als a priori bekannt vorausgesetzt werden, sie ist simultan im Rahmen der Bildauswertung zu bestimmen (Simultan-Kalibrierung). Die Eigenschaften einer Meßkammer sind also nur zu Teil gegeben.

Bildebene und Bildraum-Bezugssystem werden klassisch durch einen Anlegerahmen realisiert, auf den bei einfachen älteren Kammern eine Photoglasplatte und bei neueren Kammern ein durch Vakuum auf einer Ansaugplatte gegebener Rollfilm gepreßt wird. Der Anlegerahmen trägt auch die Marken zur Definition des Bildraum-Bezugssystems (Rahmenmarken).

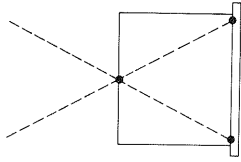


Abb. 1:
Meßkammer

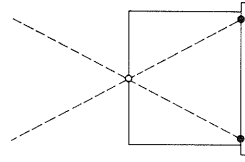


Abb. 5
Teil-Meßkammer

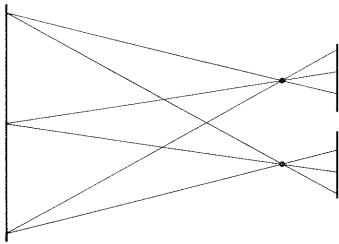


Abb. 2

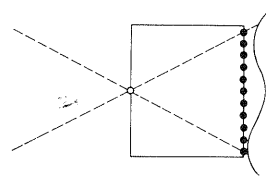


Abb. 6:
Teil-Meßkammer, Réseau-
anordnung nach Meier

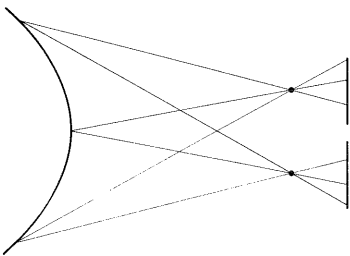


Abb. 3

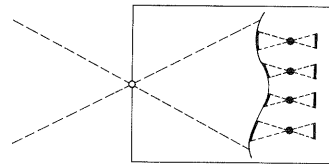


Abb. 7:
Teil-Meßkammer, Réseau-
anordnung nach Brown

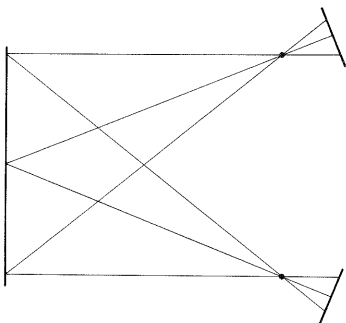


Abb. 4

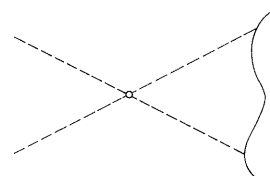


Abb. 8:
Nicht-Meßkammer

Eine sehr einfache und zugleich hochgenaue und zuverlässige Möglichkeit für eine Definition von Bildebene und Bildraum-Bezugssystem ist durch eine Glasgitterplatte, ein sogenanntes Réseau im Abbildungsstrahlengang gegeben (Abb. 6, Meier 1969). Die Punkte des Réseaus werden bei der Aufnahme mit auf die Bildfläche abgebildet, so daß der Bildinhalt durch Interpolation innerhalb der Réseaumaschen in die Ebene des Réseaus zurückprojiziert werden kann. Das Bild ist damit, numerisch, im Bezugssystem des Réseaus gegeben, befreit von den Auswirkungen von Bildunebenheiten zum Zeitpunkt der Aufnahme und von Bildverzug nach der Aufnahme (Kotowski 1984).

Bei dem in Abb. 7 dargestellten Prinzip werden die Réseaupunkte nicht gemeinsam von vorn durch die Zentralprojektion der Aufnahmekammer sondern einzeln von hinten durch den Schichtträger hindurch aufbelichtet (Brown et al., 1986) (vgl. Abb. 6). Da durch Projektoren Maßstäbe (in Form von Kreisen) abgebildet werden, kann auch bei dieser Technik die Unebenheit der Bildfläche erfaßt werden.

Als Gegensatz zur Meßkammer ist die Nicht-Meßkammer zu nennen. Diese Situation ist gegeben, wenn die Genauigkeitsforderung so hoch ist, daß weder Bildfeldebahnung und Bildraum-Bezugssystem noch die Lage des Projektionszentrums im Bildraum als ausreichend gegeben angesehen werden können (Abb. 8).

Das vorgeführte Begriffssystem beschreibt die Gegebenheiten der photogrammetrischen Aufnahmekammer allgemein. Grundsätzlich kann jeder photographische Aufnahmeapparat für den photogrammetrischen Einsatz in Betracht gezogen werden, die Einordnung als Meßkammer, Teil-Meßkammer oder Nicht-Meßkammer ist allein, aufgrund der instrumentellen Gegebenheiten, durch die von der photogrammetrischen Aufgabe gestellte Genauigkeitsforderung gegeben.

Der Regelfall der Präzisionsphotogrammetrie im Nahbereich wird die Teil-Meßkammer sein, da wohl immer Bildebene und Bildraum-Bezugssystem (Abb. 5, 6 und 7), nur selten aber auch die Lage des Projektionszentrums im Bildraum ausreichend genau instrumentell definiert werden kann, so daß simultane Kalibrierung der Aufnahmekammer als Voraussetzung für photogrammetrische Präzisionsvermessung bei Ingenieur Anwendungen genannt werden muß.

SIMULTANE KALIBRIERUNG DES AUFNAHMESYSTEMS

Bei geeigneter Anordnung der Richtungsbündel und der Zusatzinformation im Objektraum kann auch die innere Orientierung der photogrammetrischen Aufnahmekammer simultan im Rahmen einer Bündeltriangulation bestimmt werden, die Kammer wird im Felde kalibriert, für einzelne Bilder getrennt (bildvariant) oder für mehrere Bilder einer Aufnahmeserie gemeinsam (bildinvariant). Damit ist das stochastische Modell bestmöglich den Eigenarten der photogrammetrischen Bündeltriangulation angepaßt, die Genauigkeit der Bildpunktmessung wird vollständig für die Richtungsdefinition der Strahlen genutzt werden, frei von systematischen Verfälschungen vorgegebener Parameter (Peipe 1985, Brown et al. 1986).

Die nachfolgenden Kalibrieranordnungen setzten eine Teil-Meßkammer voraus, bei der Bildebene und Bildraum-Bezugssystem instrumentell ausreichend genau gegeben sind und die Abweichung der optischen Abbildung von der strengen Kollinearität (Verzeichnung) als bekannt gelten kann (Abb. 5 bis 7), so daß sich nur die Aufgabe stellt, die Lage des Projektionszentrums im Bildraum zu bestimmen.

Über einem räumlichen Paßpunktfeld kann die Kalibrierung der Aufnahmekammer schon durch die Orientierung nur eines einzelnen Bildes gefunden werden (Abb. 9). Bei einem Verband aus mindestens zwei Bildern reicht ein ebenes Paßpunktfeld aus, wenn zusätzlich ein Maßstab und eine Richtung in Aufnahmerichtung gegeben sind (Abb. 10). Das ebene Paßpunktfeld kann nach Abb. 11 ersetzt werden durch einen zusätzlichen Maßstab und zwei zueinander senkrechte Richtungen, angeordnet in einer zur Aufnahmerichtung senkrechten Ebene. Die Richtungsbeobachtungen lassen sich nach Abb. 12

durch Schrägstrecken in zwei zueinander senkrechten, zur Aufnahmerichtung parallelen Ebenen ersetzen. Bei um 200 gon gegeneinander gekanteten Aufnahmen nach Abb. 13 (Zwei-Lagen-Aufnahmen) genügt zur Kalibrierung ein Maßstab in Aufnahmerichtung und, dazu senkrecht, je ein Maßstab im Hintergrund und im Vordergrund des Aufnahmeobjekts.

Die Anordnungen in Abb. 10, 11, 12 und 13 setzen bildinvariante innere Orientierung voraus, das heißt, Bilder aus derselben Kammer. Mit einem zusätzlichen Maßstab im Vordergrund kann mit den in Abb. 10, 11 und 12 dargestellten Anordnungen auch bildvariant kalibriert werden (z.B. Abb. 14 mit den Kammern K_1 und K_2 , vgl. Abb. 12). In einem Bildverband mit zwei zueinander senkrechten Bildbasen nach Abb. 15 kann der Maßstab im Vordergrund entfallen (vgl. Abb. 14). Bildvariante Kalibrierung ohne Richtungsinformation und auch ohne Schrägmaßstäbe im Objektraum wird möglich, wenn nach Abb. 16 (vgl. Abb. 13) mit einer der Kammern in einem der Aufnahmeorte eine Zwei-Lagen-Aufnahme ausgeführt wird. Eine solche Zwei-Lagen-Aufnahme legt für die betroffene Kammer (K_2 in Abb. 16) die Lage des Bildhauptpunktes und damit die Aufnahmerichtung im Bildraum fest, sie entspricht ganz der geodätischen Richtungsmessung in zwei Fernrohrlagen zur Erfassung des Zielachsenfehlers. Bei Zwei-Lagen-Aufnahmen mit beiden Kammern ist die Kalibrierung ohne Maßstab im Vordergrund möglich (Abb. 17).

Ein Bildverband aus drei Bildern über räumlichem Punktfeld mit mindestens einer gegen die übrigen Aufnahmen geneigten Aufnahme (Abb. 18) erlaubt die Kalibrierung der Aufnahmekammer ganz ohne Beobachtungen im Objektraum allein aus der Bildinformation. Dabei wird gleichsinnige Ausrichtung der Bildkoordinatenachsen vorausgesetzt.

Gegeneinander geneigte Aufnahmen können auch in einem Aufnahmeort gegeben sein (Abb. 19). Das Bildformat kann dann zwar nur noch zum Teil genutzt werden, es ergeben sich jedoch auch unter diesen Umständen zwischen den geneigten Bildern perspektive Beziehungen, die wie in Abb. 18 Informationen für die Kammerkalibrierung liefern. Sind gegeneinander geneigte Aufnahmen in einem Aufnahmeort durch ein gemeinsames Drehzentrum instrumentell miteinander verbunden, so ist keine räumliche Objektausdehnung erforderlich (Abb. 20, vgl. Abb. 19). Gegeneinander geneigte Aufnahmen mit gemeinsamem Projektionszentrum (Abb. 21) erlauben eine analytische Formulierung zur Kammerkalibrierung ausschließlich mit Bildraumparametern ("Einzelstandpunkt-Selbstkalibrierung", Wester-Ebbinghaus 1983 b).

Eine geneigte Zwei-Lagen-Aufnahme nach Abb. 22 erlaubt, im Vergleich zu der in Abb. 19 dargestellten Anordnung, die Kalibrierung der Kammer über ebenem Objektfeld. Bei mit zwei verschiedenen Kammern bildvarianter innerer Orientierung gibt Abb. 23 als minimale Anordnung einen Vier-Bildverband über räumlichem Objektfeld an, bestehend aus je zwei gegeneinander geneigten Aufnahmen. Abb. 24 zeigt, Abb. 22 entsprechend, eine Zwei-Lagen-Anordnung für ebenes Objektfeld.

Auch in einem räumlichen Bildverband nach Abb. 25 ist die Kalibrierung der Aufnahmekammer ohne Informationen im Objektraum möglich, allein aus den perspektiven Bedingungen zwischen den gegeneinander geneigten Aufnahmen und ohne Vorgabe für die Ausrichtung der Kammerachsen. Nach Abb. 26 gleichsinnig ausgerichtete Kammerachsen erlauben eine Kalibrierung über ebenem Objektfeld.

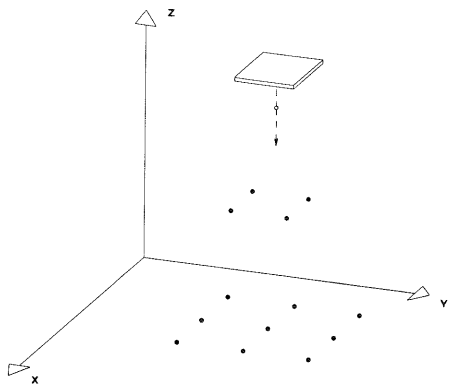


Abb. 9:
Kammerkalibrierung über räumlichem
Testfeld

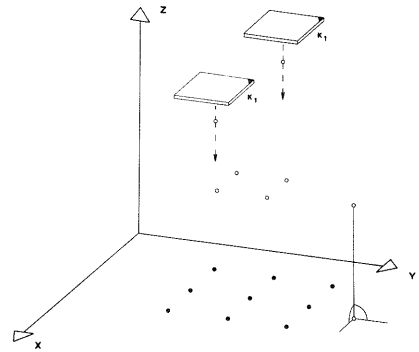


Abb. 10:
Kammerkalibrierung im Zweibildverband,
bildinvariante innere Orientierung,
ebenes
Paßpunktfeld und Maßstabs-
und Richtungs-
information in Aufnahme-
richtung

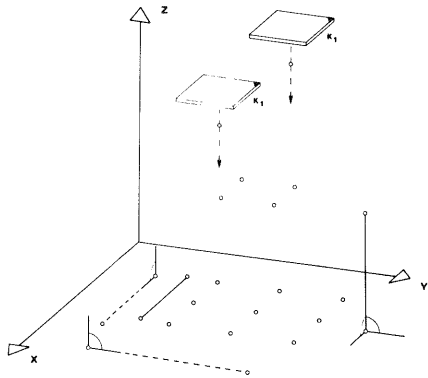


Abb. 11:
Wie Abb. 10, jedoch zusätzlich Maßstabs-
und Richtungsinformation senkrecht zur
Aufnahmerichtung

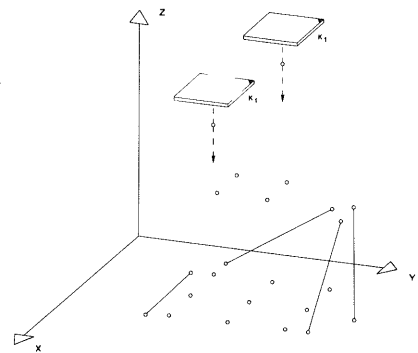


Abb. 12:
Wie Abb. 11, jedoch zusätzlich mit Schräg-
Maßstäben in zwei zueinander senkrechten,
zur Aufnahmerichtung parallelen Ebenen
statt Richtungs-
information

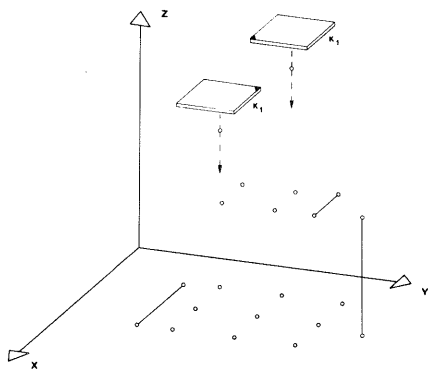


Abb. 13:
Wie Abb. 12, jedoch mit um die Aufnahme-
richtung gegeneinander um 200 gon
gekanteten Aufnahmen und zusätzlichem
Maßstab im Vordergrund statt
Schräg-
strecken

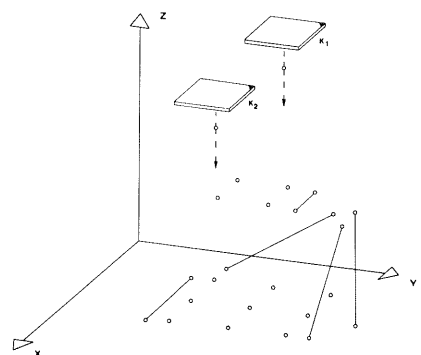


Abb. 14:
Wie Abb. 12, jedoch zusätzlich mit
Maßstab im Vordergrund für
bildvariante innere Orientierung

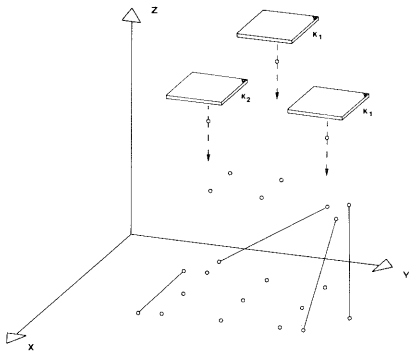


Abb. 15:
Wie Abb. 14, jedoch mit zwei zueinander senkrechten Bildbasen statt Maßstab im Vordergrund

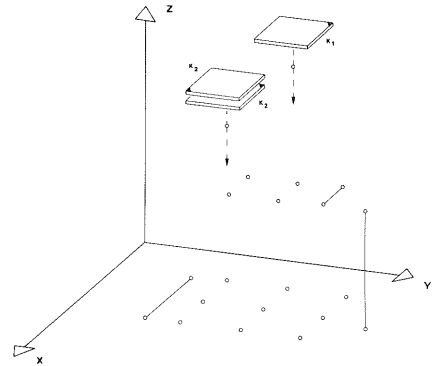


Abb. 16:
Wie Abb. 14, jedoch mit Zwei-Lagen-Aufnahme für eine der Kammern statt Schrägstrecken

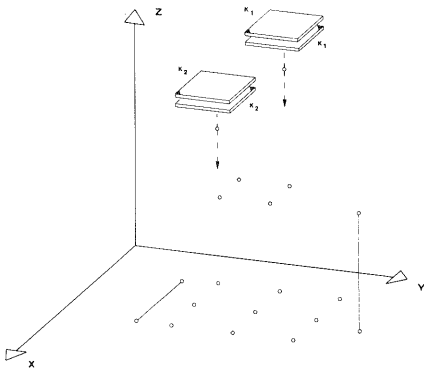


Abb. 17:
Wie Abb. 16, jedoch Zwei-Lagen-Aufnahmen mit beiden Kammern statt Maßstab im Vordergrund

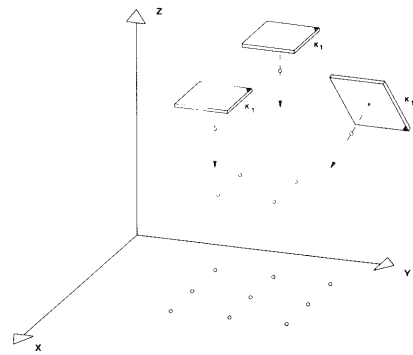


Abb. 18:
Kammerkalibrierung mit rein photogrammetrischer Information durch zusätzliche Schrägaufnahme, bildinvariante innere Orientierung

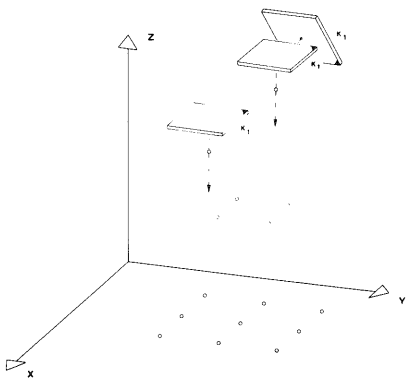


Abb. 19:
Wie Abb. 18, jedoch gegeneinander geneigte Aufnahmen in einem Aufnahmeort

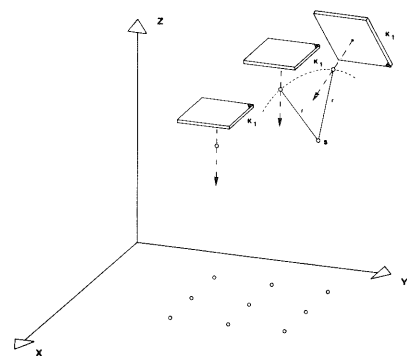


Abb. 20:
Wie Abb. 19, jedoch gegeneinander geneigte Aufnahmen mit gemeinsamem Drehzentrum, daher ebenes Objektfeld

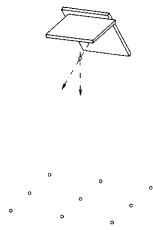


Abb. 21:
Gegeneinander geneigte Aufnahmen
mit gemeinsamem Projektionszentrum,
daher analytische Beschreibung der
Kammerkalibrierung ausschließlich
mit Bildraumparametern

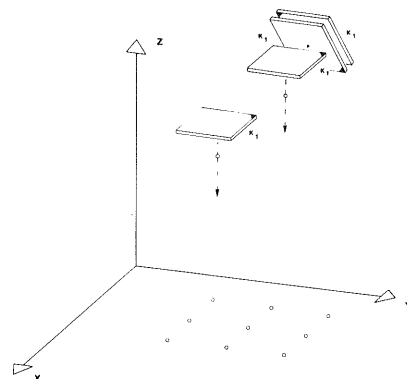


Abb. 22:
Wie Abb. 19, jedoch geneigte
Aufnahme in zwei Lagen,
daher ebenes Objektfeld

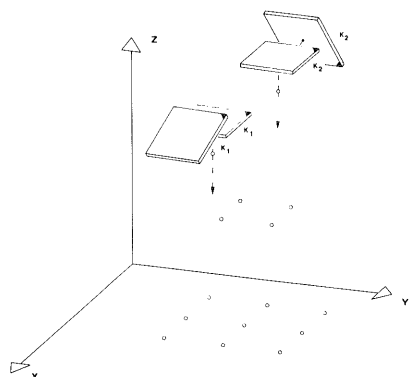


Abb. 23:
Wie Abb. 19, jedoch bildvariant
für zwei Kammeren

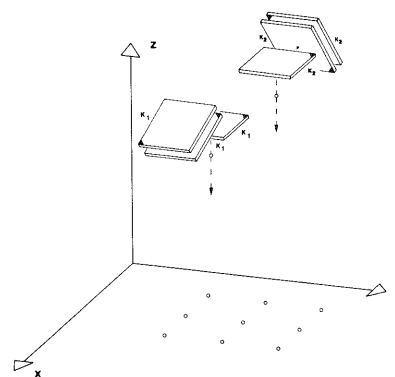


Abb. 24:
Wie Abb. 22, jedoch bildvariant
für zwei Kammeren

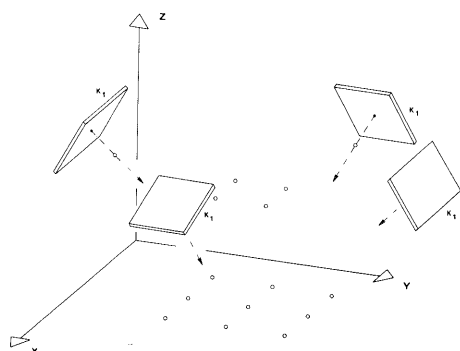


Abb. 25:
Kammerkalibrierung mit rein
photogrammetrischen Informationen
im räumlichen Bildverband

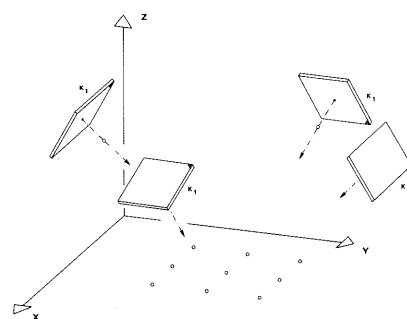


Abb. 26:
Wie Abb. 25, jedoch gleichsinnig
ausgerichtete Kammerachsen, daher
ebenes Objektfeld

ZUSAMMENFASSUNG

Die simultane Kalibrierung der Aufnahmekammer muß für Präzisionsanwendungen der Photogrammetrie im Nahbereich als unerläßliche Voraussetzung genannt werden. Die hier vorgestellten Anordnungen stellen systematisierend Möglichkeiten dar, die im Zuge einer Bündeltriangulation genutzt werden können. Die erforderliche Information zur simultanen Kammerkalibrierung ist häufig im räumlichen Netz des Bildverbandes bereits vorhanden oder kann, den hier genannten Regeln folgend, mit geringen zusätzlichem Aufwand bereitgestellt werden.

LITERATUR

- Brown, D.C., Fraser, C., 1986: Industrial-Photogrammetry - New developments and recent applications. The Photogrammetric Record.
- Kotowski, R., 1984: Zur Réseaukorrektur von systematischen Bildfehlern. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 2/84.
- Meier, H.-K., 1969: Réseauanordnung in Reihenmeßkammern. Deutsches Patentamt, Patentschrift Nr. 127 8342.
- Peipe, J., 1985: Simultankalibrierung einer Teil-Meßkammer - Ein Anwendungsbeispiel aus dem Fahrzeugbau. Tagung "Kammerkalibrierung in der photogrammetrischen Praxis", Bonn 1985. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Nr. 275, München.
- Wester-Ebbinghaus, W., 1983 a: Ein photogrammetrisches System für Sonderanwendungen. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 3/83.
- Wester-Ebbinghaus, W., 1983 b: Einzelstandpunkt-Selbstkalibrierung - Ein Beitrag zur Feldkalibrierung von Aufnahmekammern. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 289, München.