

Technische Universität Graz
Institut für Angewandte Geodäsie und Photogrammetrie
K. Rinner / G. Schelling / G. Brandstätter (Hrsg.)

Ingenieurvermessung 84

Beiträge zum IX. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung

Graz, 6.–13. Sept. 1984

Veranstalter

Prof. Dr. Gerhard Eichhorn, TH Darmstadt
Prof. Dr. Fritz Kobold, Zürich
Prof. Dr. Herbert Matthias, ETH-Zürich
Prof. Dr. mult. Karl Rinner, TU Graz
Prof. Dr. Günther Schelling, TU Graz
Prof. Dr. Klaus Schnädelbach, TU München

Band 2

- Hochbau, Anlagenbau und Wasserbau
- Tiefbau und Untertagebau
- Gelände- und Bauwerksüberwachung, Beweissicherung
- Betriebliche Führung

DÜMMLERbuch 7894

FERD.  ÜMMLER^S VERLAG · BONN

HOCHPRÄZISE PHOTOGRAMMETRISCHE VERMESSUNG VON INDUSTRIEOBJEKTEN

Dieter FRITSCH, Hans KLENNERT, Franz MÖLLER, Roman REISER, Manfred STEPHANI

Zusammenfassung

Am Beispiel der Qualitätskontrolle des Subreflektors einer Nachrichten-antenne wird das Potential der analytischen Nahbereichsphotogrammetrie aufgezeigt. Insbesondere ist hierbei ein Vergleich von photogrammetrischer und geodätischer Punktbestimmung durchgeführt worden, der theoretische Genauigkeitsmaße bestätigt, und was weit wichtiger ist, die Substitution der einen durch die andere Meßmethode anhand der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse belegt.

Summary

The potential of the analytical close range photogrammetry is demonstrated in this paper with special application of a subreflector's quality control, which will be used as focus within parabolic satellite antennas. A comparison of geodetic and photogrammetric point determination confirms theoretical accuracies and moreover, most important, indicates substitution of the one method by the other one by means of the repeatability of results.

Résumé

L'application de la photogrammetrie analytique pour le contrôle d'une sub-reflecteur est discutée et comparée avec des méthodes géodésiques. Une interprétation des résultats confirment la substitution de la méthode photogrammetrie et géodésique à l'intérieur de la même précision.

1. Einleitung

Die stürmische Entwicklung der analytischen Photogrammetrie innerhalb der beiden letzten Jahrzehnte fördert ihren Einsatz heutzutage auch in Bereichen der Ingenieurvermessung, die früher ausschließlich geodätischen Meßmethoden vorbehalten waren. So werden zum Beispiel bei der Vermessung von Industrieobjekten häufig Theodolit und Basislatte eingesetzt, um die Punktlagegenauigkeit im Submillimeterbereich garantieren zu können, d.h. aus Richtungsmessungen werden Entfernungen bzw. Objektkoordinaten abgeleitet. Prinzipiell entspricht die analytische Photogrammetrie einer räumlichen Richtungsmessung und es gilt zu überprüfen, ob die Ermittlung der Bildkoordinaten aus *Photogrammen* qualitätsmäßig den Ablesungen am Teilkreis des Theodoliten äquivalent sind. Der geringe Zeitaufwand bei der photogrammetrischen Aufnahme ist außerdem vielfach gewichtig, jedoch liegen die gesamten Aufwendungen zur Erfassung und Auswertung bei den terrestrischen und photogrammetrischen Verfahren in gleicher Größenordnung, so daß es in hochpräzisen industriellen Anwendungen nicht so sehr auf zeit-

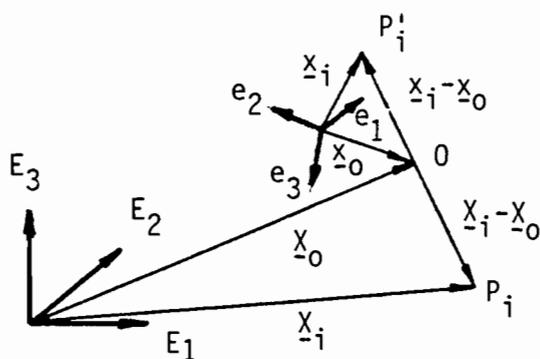
liche Begrenzung des Meß- und Auswerteaufwands, sondern viel mehr auf die Qualität der Aussagen ankommt.

Aus diesem Grund ist ein Vergleich von geodätischer und photogrammetrischer Punktbestimmung äußerst interessant, insofern, als auch theoretische Genauigkeitsmaße über geschätzte Parameter resultierend aus Parameterschätzungen auf ihren Aussagegehalt durch voneinander unabhängige Meßmethoden zu kontrollieren sind.

Daher wird im folgenden am Beispiel der Qualitätskontrolle eines Subreflektors für eine Parabolantenne das Verfahren der analytischen Photogrammetrie herausgearbeitet und den Ergebnissen der geodätischen Punktbestimmung mittels Theodolit und Basislatte gegenübergestellt.

2. Modell zur photogrammetrischen Punktbestimmung

Ausgehend von den Abbildungsgleichungen der Zentralperspektive wird mit Hilfe der photogrammetrischen Aufnahme (*Photogramm*) der Positionsvektor



$\underline{x}_i = (x_i, y_i, z_i)'$ des abgebildeten Objektpunktes $P_i \forall i \in \{1, 2, \dots\}$ im durch das kartesische Dreibein $e = (e_1, e_2, e_3)$ definierten Bildkoordinatensystem ermittelt (vergl. Abb.1). Die als bekannt vorausgesetzte *innere Orientierung* der Aufnahmekammer 0, d.h. gegebene Lage des Bildhauptpunktes mit den Koordinaten x_0, y_0 und der Kammerkonstante c relativiert x_i unter Berücksichtigung von $z_0 = c$ und $z_i = 0$ zu

Abb.1: Aufnahmendisposition der Photogrammetrie

$$(\underline{x}_i - \underline{x}_0)' = [x_i - x_0, y_i - y_0, -c] e \quad (2.1)$$

und ist als Positionsvektor im Bildraum aufzufassen. Andererseits ergibt sich der Abstand \overline{OP}_i im Objektraum als Differenz der Ortsvektoren $\underline{X}_i = (X_i, Y_i, Z_i)'$ und $\underline{X}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)'$ zu

$$(\underline{X}_i - \underline{X}_0)' = [X_i - X_0, Y_i - Y_0, Z_i - Z_0] E \quad (2.2)$$

mit dem durch das Dreibein $E = (E_1, E_2, E_3)$ definierten Objektkoordinatensystem. Das raumfeste Koordinatensystem E läßt sich mit Hilfe der orthogonalen Matrix R in das bewegliche Bildkoordinatensystem e überführen, d.h. $e = RE$, so daß mittels des Maßstabs $s := \|\underline{x}_i - \underline{x}_0\| / \|\underline{X}_i - \underline{X}_0\|$ mit $\|\underline{a}\| = \sqrt{\underline{a}'\underline{a}}$ die bekannte Beziehung (K. Schwidersky/F. Ackermann, 1976, E.W. Grafarend, 1983)

$$\begin{bmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \\ -c \end{bmatrix} = s \underline{R} \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

erhalten wird. Wird nun der Maßstab s in der 3. Zeile von (2.3) aufgelöst und eingesetzt, ergeben sich die Funktionalen

$$\begin{aligned} \frac{x_i - x_0}{-c} &= \frac{r_{11}(X_i - X_0) + r_{12}(Y_i - Y_0) + r_{13}(Z_i - Z_0)}{r_{31}(X_i - X_0) + r_{32}(Y_i - Y_0) + r_{33}(Z_i - Z_0)} \\ \frac{y_i - y_0}{-c} &= \frac{r_{21}(X_i - X_0) + r_{22}(Y_i - Y_0) + r_{23}(Z_i - Z_0)}{r_{31}(X_i - X_0) + r_{32}(Y_i - Y_0) + r_{33}(Z_i - Z_0)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

worin die linke Seite als zu *beobachtende Winkel* aufgefaßt werden kann, aus denen die unbekannt Objektkoordinaten X_i, Y_i, Z_i , der Standort der Projektionszentren X_0, Y_0, Z_0 und die Information über die Rotation von Objekt- in Bildkoordinatensystem abzuleiten sind.

Die Rotationsmatrix R wird vielfach als Drehung um die drei Cardan'schen Winkel ϕ, ω, κ definiert

$$\underline{R} := \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \underline{R}_3(\kappa) \underline{R}_2(\omega) \underline{R}_1(\phi) \quad (2.5)$$

mit den individuellen Drehmatrizen

$$\underline{R}_1(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix}, \quad \underline{R}_2(\omega) = \begin{bmatrix} \cos\omega & 0 & -\sin\omega \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\omega & 0 & \cos\omega \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\underline{R}_3(\kappa) = \begin{bmatrix} \cos\kappa & \sin\kappa & 0 \\ -\sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Unter der Voraussetzung einer gegebenen inneren Orientierung verbleiben in (2.4) noch 9 zu ermittelnde Unbekannte, nämlich gerade die Parameter der *äußeren Orientierung* $X_0, Y_0, Z_0, \phi, \omega, \kappa$ und die Objektkoordinaten X_i, Y_i, Z_i . Bezeichnet g die Anzahl der Objektpunkte und h die Anzahl der Photographie, ergibt sich die Anzahl der zu schätzenden Parameter

$$u = 3g + 6h - 7 \quad (2.7)$$

da (2.4) invariant ist gegenüber einer Ähnlichkeitstransformation (S-Transformation) im \mathbb{R}^3 , d.h. der photogrammetrische zu ermittelnde Punkthaufen kann verschoben, gedreht und skaliert werden, ohne daß die Beobachtungen sich ändern. Die Anzahl der nicht schätzbaren Parameter beläuft sich in diesem Fall auf 7; das sind 3 Translationen, 3 Rotationen und 1 Maßstab, die das *Datum* des Punkthaufens definieren.

Um nun u unbekannte Parameter schätzen zu können, ist es erforderlich, daß n Beobachtungen mit $n > u$ in mehreren Photographien für identische Punkte ermittelt werden; als Minimallösung gilt $h=2$, da dann mindestens 5 Punkte die Konfiguration des Punkthaufens festlegen.

3. Ermittlung der Objektkoordinaten

Nach der Linearisierung der Beobachtungsgleichungen (2.4) (vergl. hierzu K.Schwidersky/F.Ackermann, 1976, S.34ff) werden die unbekanntes Objektkoordinaten durch Ausgleichung ermittelt. Ausgangspunkt hierzu sei das *Gauß-Markoff-Modell mit nicht vollem Rang* (K.R.Koch, 1980, S.167ff), welches für photogrammetrische Anwendungen lauten möge

$$E(\underline{y}) = \begin{bmatrix} \underline{A}_1 & \underline{A}_2 & \underline{A}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{x}_1 \\ \underline{x}_2 \\ \underline{x}_3 \end{bmatrix} \quad \text{mit } D(\underline{y}) = \sigma^2 \underline{P}^{-1} \quad (3.1)$$

unter $\begin{bmatrix} \underline{H} \\ \underline{B} \end{bmatrix} \underline{x} = \begin{bmatrix} \underline{w} \\ \underline{0} \end{bmatrix}$ wenn $\underline{x} := [\underline{x}'_1, \underline{x}'_2, \underline{x}'_3]'$

in dem der $r \times 1$ Vektor \underline{x}_1 die unbekanntes Parameter der Objektkoordinaten, der $s \times 1$ Vektor \underline{x}_2 die unbekanntes Parameter der Projektionszentren und der $t \times 1$ Vektor \underline{x}_3 Koordinatenparameter von Zusatzinformationen wie Meßmarken einer Basislatte, Punkten auf einer realisierten Lotline etc. enthalten sollen samt ihren zugehörigen Koeffizientenmatrizen $\underline{A}_1, \underline{A}_2$ und \underline{A}_3 mit $\text{rg}(\underline{A}_1, \underline{A}_2, \underline{A}_3) = q < u$, wenn $u := r+s+t$, und dem Format $n \times r(s)(t)$, je nach Verknüpfung mit den unbekanntes Parametern. Die $v \times u$ Matrix \underline{H} mit dem $v \times 1$ Absolutgliedvektor \underline{w} bewirkt die Einhaltung von Restriktionen über diese Zusatzinformationen wie z.B. Länge der Basislatte = 2,00 [m] oder Punkte auf Lotlinien liegen auf Geraden, wohingegen die $(u-q) \times u$ Matrix \underline{B} den Datumsdefekt behebt. Mit den Operatoren E und D sind Erwartungswert und Dispersion des $n \times 1$ Beobachtungsvektors \underline{y} gekennzeichnet, letzteres wird dargestellt als Produkt der unbekanntes Varianz der Gewichtseinheit σ^2 und der gegebenen $n \times n$ positiv definiten Kofaktormatrix \underline{P}^{-1} .

Das zu (3.1) äquivalente Modell mit den Beobachtungen als Eingangsgrößen

ist gegeben durch

$$\begin{array}{l}
 \underline{y} + \underline{e} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad \text{mit } D(\underline{y}) = \sigma^2 \underline{P}^{-1} \\
 \text{unter } \begin{bmatrix} H \\ B \\ - \end{bmatrix} \underline{x} = \begin{bmatrix} w \\ 0 \\ - \end{bmatrix} \quad \text{wenn } \underline{x} := \begin{bmatrix} x_1' & x_2' & x_3' \end{bmatrix} '
 \end{array} \quad (3.2)$$

und führt durch Minimierung der quadratischen Form des nx1 Residuenvektors e

$$\underline{e}' \underline{P} \underline{e} = \min \quad \text{unter } \begin{bmatrix} H \\ B \\ - \end{bmatrix} \underline{x} = \begin{bmatrix} w \\ 0 \\ - \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

mit $N_{ij} := A_i' P A_j$ sowie $b_i := A_i' P y$ zu den Normalgleichungen

$$\begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} & H'_1 & B'_1 \\ N_{21} & N_{22} & N_{23} & H'_2 & B'_2 \\ N_{31} & N_{32} & N_{33} & H'_3 & B'_3 \\ H_1 & H_2 & H_3 & 0 & 0 \\ B_1 & B_2 & B_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \hat{\lambda}_h \\ \hat{\lambda}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ w \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Die Restriktionen $Bx = 0$ bewirken eine Minimierung der quadratischen Form des Lösungsvektors und sorgen für minimale Spur der Kofaktormatrix der in diese quadratische Form einbezogenen Parameter (D.Fritsch/B.Schaffrin, 1982, K.R.Koch, 1983b).

Um nun minimalen Varianzen der Objektkoordinaten bei der photogrammetrischen Punktbestimmung Rechnung zu tragen, wird der Datumsdefekt behoben durch

$$\boxed{x_1' x_1 = \min} \quad (3.5)$$

d.h. die Matrix B bewirkt (differentielle) Änderungen lediglich der Objektkoordinaten, ohne daß die Beobachtungen sich ändern.

Mit $B := [B_1, B_2, B_3]$ folgt sofort $B_2 = B_3 = 0$ und

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & \dots & \dots & \dots \\ 0 & -z_{10} & y_{10} & 0 & -z_{20} & y_{20} & \dots & \dots & \dots \\ z_{10} & 0 & -x_{10} & z_{20} & 0 & -x_{20} & \dots & \dots & \dots \\ -y_{10} & x_{10} & 0 & -y_{20} & x_{20} & 0 & \dots & \dots & \dots \\ x_{10} & y_{10} & z_{10} & x_{20} & y_{20} & z_{20} & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

falls voller Rangdefekt $u-q=7$ vorliegt; die Koeffizienten x_{10} , y_{10} , und z_{10} sind die Näherungskordinaten der Objektpunkte und werden zur Ausführung der 3 differentiellen Rotationen und der Maßstabsänderung benötigt.

Die Matrix H soll nach Voraussetzung Restriktionen über Zusatzinformationen beinhalten, so daß daraus für $\underline{H} := [\underline{H}_1, \underline{H}_2, \underline{H}_3]$ sich ergibt: $\underline{H}_1 = \underline{H}_2 = \underline{0}$.

Da die $r \times r$ Matrix \underline{N}_{11} mit $\text{rg } \underline{N}_{11} = r$ Blockdiagonalstruktur vom Format 3×3 und die $s \times s$ Matrix \underline{N}_{22} mit $\text{rg } \underline{N}_{22} = s-7$ Blockdiagonalstruktur des Formats 6×6 aufweisen, wobei i.a. für photogrammetrische Anwendungen $r \gg s$ gilt, empfiehlt es sich, die Objektparameter durch Elimination und Rückrechnung zu ermitteln. Das teilreduzierte Normalgleichungssystem lautet

$$\begin{bmatrix} \underline{N}_{22} - \underline{N}_{21} \underline{N}_{11}^{-1} \underline{N}_{12}, & \underline{N}_{32} - \underline{N}_{21} \underline{N}_{11}^{-1} \underline{N}_{13}, & \underline{0}, & -\underline{N}_{21} \underline{N}_{11}^{-1} \underline{B}'_1 \\ \underline{N}_{32} - \underline{N}_{31} \underline{N}_{11}^{-1} \underline{N}_{12}, & \underline{N}_{33} - \underline{N}_{31} \underline{N}_{11}^{-1} \underline{N}_{13}, & \underline{H}'_3, & -\underline{N}_{31} \underline{N}_{11}^{-1} \underline{B}'_1 \\ \underline{0}, & \underline{H}_3, & \underline{0}, & \underline{0} \\ -\underline{B}'_1 \underline{N}_{11}^{-1} \underline{N}_{12}, & -\underline{B}'_1 \underline{N}_{11}^{-1} \underline{N}_{13}, & \underline{0}, & -\underline{B}'_1 \underline{N}_{11}^{-1} \underline{B}'_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \hat{\lambda}_h \\ \hat{\lambda}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{b}_2 - \underline{N}_{21} \underline{N}_{11}^{-1} \underline{b}_1 \\ \underline{b}_3 - \underline{N}_{31} \underline{N}_{11}^{-1} \underline{b}_1 \\ \underline{w} \\ -\underline{B}'_1 \underline{N}_{11}^{-1} \underline{b}_1 \end{bmatrix}$$

$$\implies \underline{M} \hat{\underline{z}} = \underline{c} \quad (3.7)$$

und kann mittels Pivotisierung leicht zu $\hat{\underline{z}} = \underline{M}^{-1} \underline{c}$ aufgelöst werden. Die Berechnung der Objektkordinaten samt ihrer Kofaktormatrix geschieht dann durch Rückrechnung

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= \underline{N}_{11}^{-1} \underline{b}_1 - \underline{N}_{12} \hat{x}_2 - \underline{N}_{13} \hat{x}_3 - \underline{B}'_1 \hat{\lambda}_b \\ D(\hat{x}_1)/\sigma^2 &= \underline{N}_{11}^{-1} \{ \underline{I} + [\underline{N}_{12}, \underline{N}_{13}, \underline{0}, \underline{B}'_1] \underline{M}^{-1} [\underline{N}_{12}, \underline{N}_{13}, \underline{0}, \underline{B}'_1]' \underline{N}_{11}^{-1} \} \end{aligned} \quad (3.8)$$

wobei $D(\hat{x}_1)/\sigma^2$ per definitionem minimale Spur besitzt. Eine Umgehung der Pivotisierung ist durch S-Transformationen (W.Baarda, 1973) möglich, indem minimale Datuminformation zur Beseitigung des Rangdefekts eingeführt wird und dadurch Datumrestriktionen der Form $\underline{B}\underline{x} = \underline{0}$ entfallen. Nach Ermittlung der unbekannt Parameter kann dann in das gewünschte Datum transformiert werden (K.R.Koch, 1983a, D.Fritsch/K.R.Koch, 1984).

4. Beispiel

Zur Feststellung von Abweichungen zwischen Istkontur und Sollkontur eines Subreflektors für eine Nachrichtenantenne wurde seine Oberfläche durch das Auftragen von Meridianen und Parallelkreisen diskretisiert, deren Schnitte die Meßpunkte signalisierten. Der Reflektor besitzt die Form eines Rotationshyperboloides von ca. 2 [m] Durchmesser und 0.65 [m] Höhe; seine Kontur ist aus Aluminiumblechen gefertigt worden und durfte als Spitzenabweichungen im inneren Bereich höchstens 0,3 [mm] und für den äußeren Bereich nicht mehr als 0,5 [mm] von der Sollkontur aufweisen.

Durch Präzisionspolygonzug und räumliche Vorwärtsschnitte sind die x,y,z-Koordinaten für insgesamt 90 Objektpunkte mittels Theodolit und Basislatte mit einer Genauigkeit von

$$\hat{\sigma}_x = 0.056 [\text{mm}], \quad \hat{\sigma}_y = 0.064 [\text{mm}], \quad \hat{\sigma}_z = 0.013 [\text{mm}] \quad (4.1)$$

bestimmt worden.

4.1 Photogrammetrische Aufnahme

Für die photogrammetrische Aufnahme des Subreflektors wurde die Universalmeßkammer WILD P31 mit Weitwinkelobjektiv ($c=99.56 [\text{mm}]$) und einem zusätz-

lichen Zwischenring zur Fokussierung auf nahezu 2,5 m Aufnahmeentfernung ($\Delta c=+3.78 [\text{mm}]$) eingesetzt. Als Informationsträger der

Photogramme haben sich Glasplatten im Format $102 [\text{mm}] \times 127 [\text{mm}]$ gegenüber dem Film bewährt, da hier mit weit weniger systematischen Einflüssen zu rechnen ist. Die photogrammetrische

Aufnahmeanordnung ist aus Abb. 2 zu entnehmen. Zu den Horizontal-

aufnahmen von den Polygonpunkten $P_i, \forall i \in \{1, \dots, 6\}$ wurden zusätzliche Schräg-

aufnahmen ($\alpha=-50 [\text{gon}]$) zur Stabilisierung des Bildverbandes von den

Punkten $P_i, \forall i \in \{7, \dots, 10\}$ durchgeführt. Als Zu-

satzpaßinformation dient die 2[m]Basislatte von ZEISS, mit der auch die Abstände der Polygonpunkte abgeleitet worden sind. Die Abb. 3 und 4 geben

jeweils ein Photogramm in horizontaler und geneigter Aufnahmerichtung mit variierendem

Bildmaßstab von

$\approx 1:30-1:20$ wieder.

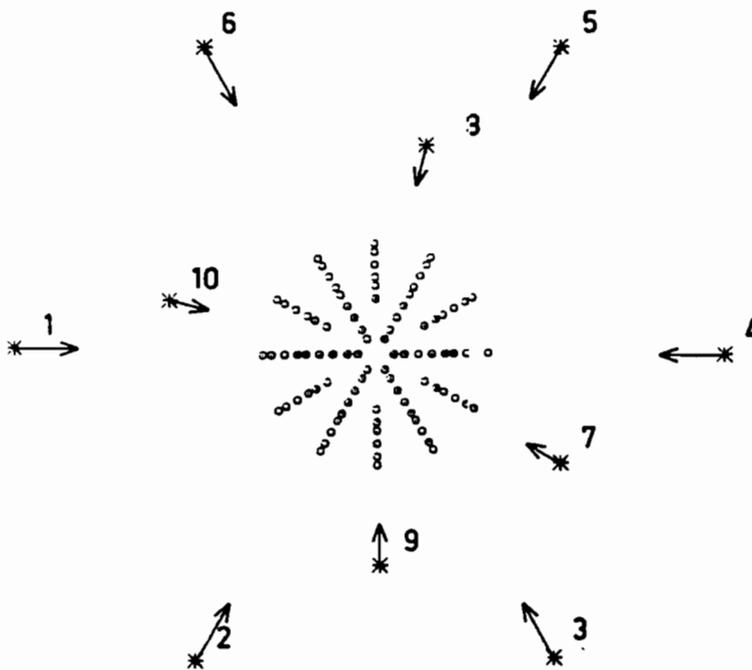


Abb.2: Photogrammetrische Aufnahmeanordnung Vermessung Subreflektor

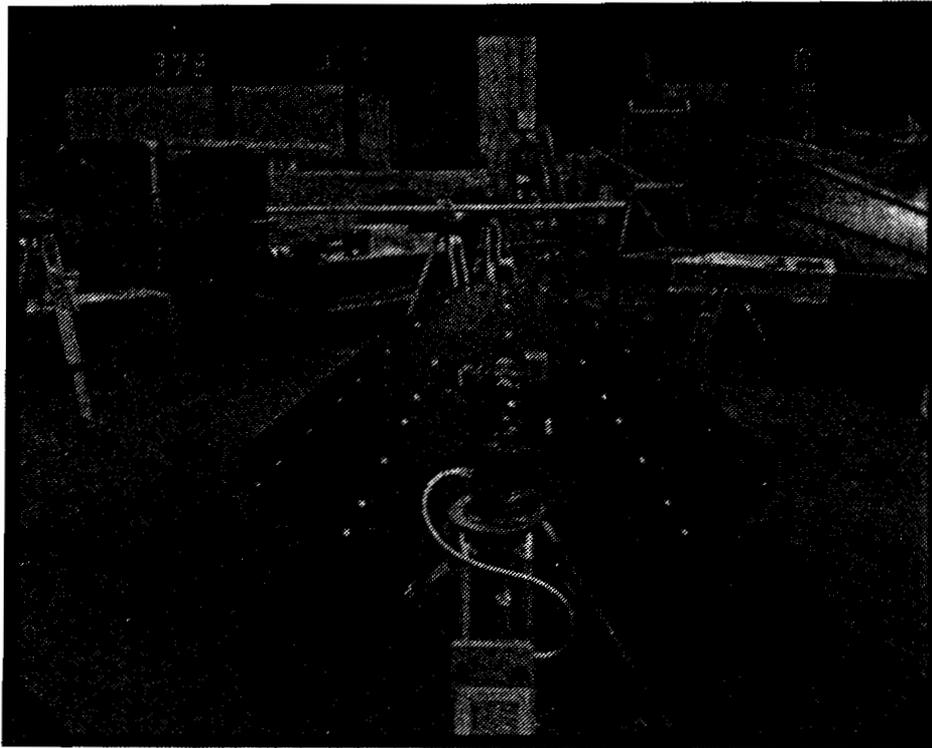


Abb.3: Horizontale Aufnahmeichtung

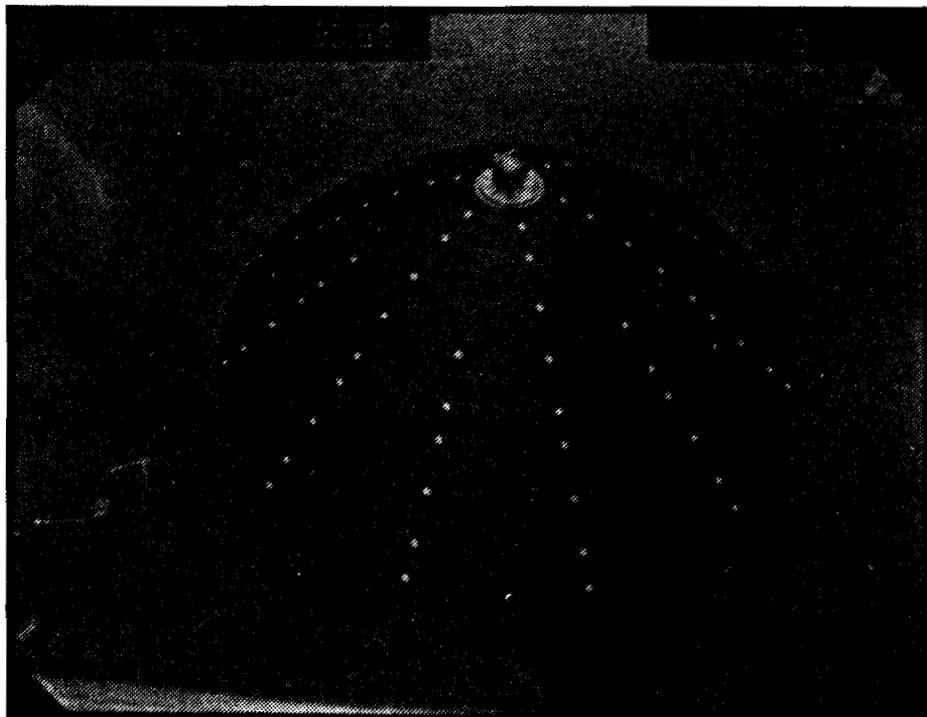


Abb.4: Geneigte Aufnahmeichtung

4.2 Photogrammetrische Auswertung

Zur Erfassung der Bildkoordinaten wurde der Präzisionsmonokomparator ZEISS PK1 eingesetzt, mit dem die Objektpunkte der Photogramme in Doppelmessungen digitalisiert worden sind. Als Standardabweichungen ergaben sich für die Mittelwerte $\hat{\sigma}_x = 0.0015$ [mm] und $\hat{\sigma}_y = 0.0018$ [mm]. Die bisherige Parameterschätzung im Gauß-Markoff-Modell mit nicht vollem Rang ohne Zusatzpaßinformation von dem in F.Müller (1982), F.Müller/M.Stephani (1984) beschriebenen Rechenprogramm basierend auf H.Ebner (1984) ergibt folgende Genauigkeitsmaße für die photogrammetrisch ermittelten Objektkoordinaten:

$$\hat{\sigma}_x = 0.053 \text{ [mm]}, \quad \hat{\sigma}_y = 0.054 \text{ [mm]}, \quad \hat{\sigma}_z = 0.057 \text{ [mm]} \quad (4.2)$$

Die Auswertung bestätigt den Mehraufwand für die Schrägaufnahmen durch einen 1¹/₂-2fachen Genauigkeitsgewinn in den Objektkoordinaten.

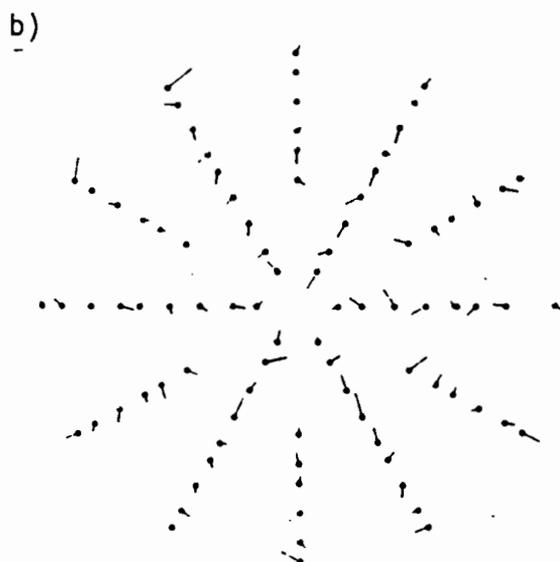
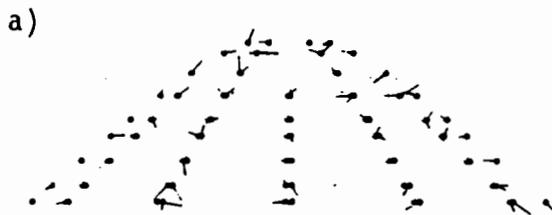
Der Vergleich geodätische - photogrammetrische Punktbestimmung wird nach einer Ähnlichkeitstransformation durchgeführt, um Datumseffekte zu egalieren. Hierfür ergeben sich im quadratischen Mittel folgende Abweichungen

$$\hat{s}_x = 0.025 \text{ [mm]}, \quad \hat{s}_y = 0.026 \text{ [mm]}, \quad \hat{s}_z = 0.018 \text{ [mm]} \quad (4.3)$$

wenn beide Meßmethoden als Doppelmessungen aufgefaßt werden und

$s_i, \forall i \in \{x, y, z\}$ als Standardabweichung einer Einzelmessung zu betrachten ist. Die Gesamtheit aller Abweichungen ist in der Abb.5 dargestellt.

Weitere photogrammetrische Auswertungen mit Zusatzpaßinformation dürften diese Aussagen kräftigen.



o Objektpunkt

— Abweichung

Maßstab der Abweichungen:

0 30 60 90 [mm/100]

Abb.5: Abweichungen geodätische - photogrammetrische Punktbestimmung a) z-Richtung b) x,y-Richtung

5. Schluß und Ausblick

In dem vorliegenden Beitrag wird die Leistungsfähigkeit klassisch geodätischer und photogrammetrischer Punktbestimmung in hochpräzisen Anwendungen aufgezeigt. Der Vergleich der Ergebnisse bestätigt die Substituierbarkeit der einen durch die andere Meßmethode, so daß zukünftigen Entwicklungen der hochpräzisen Nahbereichsphotogrammetrie in Aufnahme- und Auswertetechnik die gleiche Aufmerksamkeit gebührt wie es dem geodätischen Bereich zukommt. Analogien sind hier gleichermaßen vorhanden: entspricht doch die Digitalisierung und elektronische Abtastung von Theodolitteilkreisen einem digitalen photogrammetrischen Aufnahmesystem; beider Daten können in Echtzeit vermittlels Ausgleichungsprogrammen implementiert auf Mini- und Mikrorechnern vor Ort direkt zu den gesuchten Objektinformationen führen.

6. Literatur

- BAARDA, W. (1973): S-Transformations and Criterion Matrices. Neth.Geod. Comm., Publ. on Geod., New Series 5, No.1, Delft.
- EBNER, H. (1984): Combined Adjustment of Photogrammetric and Non-Photogrammetric Information. Invited Paper, XV. ISPRS Congress, Rio de Janeiro.
- FRITSCH, D./B. SCHAFFRIN (1982): The 'Choice of Norm' Problem for the Free Net Adjustment with Orientation Parameters. Boll. Geodesia e Science Aff. 41: pp.259-282.
- FRITSCH, D./K.R. KOCH (1984): Methods of Datum's Definition and of Statistical Tests for the Densification of Networks. Survey Review (in print).
- GRAFAREND, E.W. (1983): Stochastic Models for Point Manifolds. DGK Reihe A Nr.98, München.
- KOCH, K.R. (1980): Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen. Dümmler, Bonn.
- KOCH, K.R. (1983a): Rechenverfahren bei der Einschaltung von Punkten in ein freies Netz. Allgem. Verm. Nachr., 90: S.99-107.
- KOCH, K.R. (1983b): Die Wahl des Datums eines trigonometrischen Netzes bei Punkteinschaltungen. Zeitschr. Verm. Wesen, 108: S.104-111.
- MOLLER, F. (1982): Konzept und Teilrealisierung eines Programmpaketes zur Bündelausgleichung. Diplomarbeit Technische Universität München (nicht veröffentlicht).
- MOLLER, F./M. STEPHANI (1984): Effiziente Berücksichtigung geodätischer Beobachtungen und Objektinformationen in der Bündelblockausgleichung. Presented Paper, XV. ISPRS Congress, Rio de Janeiro.
- SCHWIDEFSKY, K./F. ACKERMANN (1976): Photogrammetrie. Teubner, Stuttgart.

Adresse der Autoren:

Dr.-Ing. D.Fritsch, Dipl.-Ing. F.Müller, Dr.-Ing. M.Stephani,
Lehrstuhl für Photogrammetrie, Technische Universität München,
Arcisstraße 21, D-8000 München 2

Prof. Dr.-Ing. H. Klennert, Prof. Dr.-Ing. R.Reiser,
Fachhochschule Rheinland-Pfalz, Abt. Mainz I, Fachrichtung
Vermessungswesen, Holzstraße 36, D-6500 Mainz 1.