

Studienrichtung Vermessungswesen
Technische Universität Wien

GEOWISSENSCHAFTLICHE MITTEILUNGEN

Heft 8

Veröffentlichungen
des

Institutes für Photogrammetrie

zum

XIII. Internationalen Kongreß für Photogrammetrie

Helsinki 1976

Geowiss. Mitt.,
8, 1976

Wien, im Juli 1976

Herausgeber und Verleger: o.Prof.Dr.-Ing.K.Kraus
Vorstand des Instituts für Photogrammetrie
der Technischen Universität Wien
A 1040 Wien, Gußhausstraße 27-29

Die Kosten für den Druck wurden größtenteils aus Förderungsmitteln
des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung bestritten .

Einband: Fa. F. Manhardt, Wien

Druck der Seiten 47, 48, 61: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Wien

Druck der Seiten 63, 77 - 79, 87, 88, 95 und 96: Fa. Lischkar & Co., Wien

Druck der übrigen Seiten: ÖHTUW - Vervielfältigung, Wien

Auflage: 800 Stück (+ Sonderdrucke)

VORWORT

In der Photogrammetrie bestimmt der 4-jährige Turnus der ISP-Kongresse das Arbeitsprogramm vieler wissenschaftlicher Institutionen. Das Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität Wien hat sich dieser Gepflogenheit angeschlossen und präsentiert anlässlich des XIII. ISP-Kongresses in Helsinki 1976 das vorliegende Heft.

Die Beiträge dieses Heftes können gleichzeitig als Bilanz der wissenschaftlichen Arbeiten des Instituts für Photogrammetrie seit meiner Berufung gewertet werden. Darüber hinaus gilt dieses Heft als Arbeitsgrundlage für den Themenkreis "Photogrammetrie" der Geodätischen Informationstage, die in der Zeit vom 13. - 15. Oktober 1976 an der Technischen Universität Wien stattfinden.

Die beiden ersten sowie der vierte und fünfte Beitrag dieses Heftes sind der digital gesteuerten Differentialumbildung gewidmet. Das Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität Wien hat Methoden und Computerprogramme für eines dieser neuartigen Differentialumbildegereäte erarbeitet. Der dritte Beitrag befaßt sich mit der digitalen Höhenlinienkartierung, ein Projekt, das der Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung durch die Bereitstellung eines elektronisch gesteuerten Zeichenautomaten unterstützt. Der vorletzte Beitrag demonstriert anhand einer Präzisionsfassadenvermessung den heutigen Leistungsstand der Nahbereichsphotogrammetrie. Die dazu notwendigen Aufnahme- und Auswertegeräte hat das Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung finanziert. Mit dem letzten Beitrag dieses Heftes bekunden wir unsere Absicht, in der nächsten Zeit ein universelles Computerprogramm zur Ausgleichung photogrammetrischer, geodätischer und fiktiver Beobachtungen zu entwickeln.

Die vorliegende, als eine Gemeinschaftsarbeit aller Mitarbeiter des photogrammetrischen Instituts anzusehende Veröffentlichung wurde unterstützt von österreichischen Behörden, von anderen Hochschul- und Forschungsinstituten sowie von in- und ausländischen Firmen. Ich danke für die bereitwillige Mitarbeit und die uneigennützigte Unterstützung.

Karl Kraus

PREFACE

In photogrammetry it is the quadrennial rotation of ISP-Congresses that determines the programme of work of many scientific institutions. The Institute of Photogrammetry of the Technical University of Vienna has taken up that practice and, on the occasion of the XIIIth ISP-Congress at Helsinki, 1976, presents this collection of papers.

The various contributions of this collection, may, besides, be regarded as an account of the scientific work done by the Institute of Photogrammetry since my appointment. Furthermore the present collection of papers constitutes the working basis for the thematic cycle "Photogrammetry" of the "Days on Geodetic Information" that will take place at Vienna Technical University from October 13th - 15th, 1976.

The first two contributions as well as the fourth and the fifth paper of this collection are devoted to digitally controlled differential image-transformation. The Institute of Photogrammetry of Vienna Technical University has elaborated methods and computer programmes for one of these novel differential transformation instruments. The third paper deals with digital contour plotting, a project supported by the Board of Funds for the Promotion of Scientific Research by providing our Institute with an electronically controlled automatic precision-plotter. The last paper but one deals with the present level of close range photogrammetry, illustrated by an example of precision façade surveying. The photographing and evaluation equipment necessary for the project were financed by the Federal Ministry of Science and Research. The last contribution of our collection of papers expresses our aim to develop an universal computer programme in the near future for the purpose of adjusting photogrammetric, geodetic and fictitious observations.

The present publication, which is to be regarded as the collective effort of all the members of the Institute of Photogrammetry, was supported by the Austrian authorities, by other university and research institutions as well as by Austrian and foreign firms. On behalf of all the authors of the contributors as well as on my own I wish to express my sincere gratitude for all the willing cooperation and disinterested support we have received.

Karl Kraus

INHALTSVERZEICHNIS:

KRAUS, K.:	Anwendungsmöglichkeiten eines digital gesteuerten Differentialumbildegerätes	1
OŠEPKA, G., LOITSCH, J.:	Ein Programm zur digital gesteuerten Orthophotoproduktion	23
ASSMUS, E.:	Berücksichtigung von Geländekanten im Stuttgarter Höhenlinienprogramm - Theorie und Ergebnisse	51
OŠEPKA, G.:	Praktische Erfahrung bei der Rektifikation von MSS-Bildern	65
KRAUS, K., TSCHANNERL, J.:	Die photographische Entzerrung abwickelbarer Regelflächen	81
KAGER, H., WALDHÄUSL, P.:	Fassadenvermessung - eine aktuelle Aufgabe der Ingenieurphotogrammetrie	89
KAGER, H., KRAUS, K.:	Gemeinsame Ausgleichung photogrammetrischer, geodätischer und fiktiver Beobachtungen	113

Geowiss. Mitt.

8, 1976, S. 1 - 21

ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN EINES DIGITAL GESTEUERTEN
DIFFERENTIALUMBILDEGERÄTES

von

Karl Kraus

Adresse des Autors :

Prof. Dr. K. Kraus, Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität
Wien, 1040 Wien, Gußhausstraße 27-29, Österreich

ZUSAMMENFASSUNG

Die Firma Wild Heerbrugg in der Schweiz hat zum Kongreß in Helsinki 1976 das digital gesteuerte Differentialumbildegerät Avioplan OR 1 mit optischer Bildübertragung angekündigt. In diesem Aufsatz werden Antworten auf die Frage gegeben, für welche Aufgabenstellungen dieses Umbildegerät eingesetzt werden kann.

Die Hauptanwendung ist die Herstellung von Orthophotos. Die dafür notwendigen Ausgangsdaten können entweder mit Hilfe einer Bild- oder Modellkoordinatenregistriereinrichtung erfaßt werden. Der vorliegende Aufsatz geht im wesentlichen von der Registrierung der Modellkoordinaten aus, die in der Form von Höhenlinien oder Profilen oder unregelmäßig verteilten Punkten erfolgen kann. In der anschließenden Datenaufbereitung ist im Off-line-Betrieb in einem mittelgroßen Computer ein Magnetband zur Steuerung des Avioplans zu erzeugen. Nachdem die digitale Erfassung der Geländeoberfläche von der eigentlichen Orthophotoherstellung völlig losgelöst ist, können - sofern sich die Oberflächenform nicht ändert - die einmal erfaßten Daten wiederholt zur Herstellung von Orthophotos aus Bildflügen verschiedenen Datums und verschiedener Aufnahmedispositionen herangezogen werden. Solche Zeitreihen von Orthophotos sind vor allem für die Fortführung der Orthophoto- und Strichkarten von besonderer Bedeutung. Zusätzlich zum Orthophoto kann aus den gleichen Ausgangsdaten auch der Stereopartner rechnerisch abgeleitet werden. Die auf diese Weise kostengünstig hergestellten Stereoorthophotos verbinden die Vorteile der Orthophotographie mit dem für Interpretationen besonders wertvollen Stereoeffekt.

Im zweiten Teil des Aufsatzes werden die methodischen Grundlagen für folgende Problemstellungen erarbeitet:

- Die photographische Abwicklung von Torsen (abwickelbare Regelflächen).
- Die Umbildung kleinmaßstäbiger Karten von einem Netzentwurf in einen anderen Netzentwurf.
- Die Entzerrung von Multispektral- und Radarbildern sowie von beliebig deformierten Vorlagen.

ABSTRACT

Wild Heerbrugg Ltd. has announced the presentation (at the Helsinki Congress of the I.S.P., 1976) of the digitally-controlled Avioplan OR 1 Orthophoto System. This paper shows the range of applications for which this instrument can be used.

The primary application is, of course, the production of orthophotos. The required data can be acquired via a coordinate registration system which measures either image coordinates or model coordinates. The paper deals essentially with data acquired in the form of model coordinates, which can be arranged in contour lines, profiles or irregularly distributed points. The necessary data for the Avioplan are computed offline in a medium-size, general-purpose computer and written out on magnetic tape. Since the acquisition of the digital data describing the ground surface is quite separate from the production of the orthophoto, these data can be used repeatedly for the production of orthophotos from aerial photographs at different dates and with various focal lengths (provided the ground surface does not change). A time-series of orthophotos produced in this way is particularly important for the revision of orthophoto- and line-maps. In addition to an orthophoto, a stereo-orthophoto can be produced from the same initial data. Such economically produced stereo-orthophotos combine the advantages of orthophotography with the stereo effect which is of special importance in interpretation.

The second part of the paper deals with the methodology of the following problems:

- the rectification of photographs of developable surfaces;
- the transformation of small-scale maps from one map projection to another;
- the rectification of multi-spectral and radar images and of arbitrarily deformed originals.

1. EINLEITUNG

Einige Firmen haben in letzter Zeit eine neue Generation von Differentialumbildegeräten angekündigt /12/ /14/ /16/ /17/. Diese Geräte arbeiten - wie die meisten bisher in der Praxis stehenden Umbildegeräte - auf der Grundlage einer optischen Bildübertragung. Bei der neuen Gerätegeneration werden die optischen Elemente der Bildübertragung aber nicht mehr mechanisch sondern mit Hilfe eines Prozeßrechners gesteuert.

In diesem Aufsatz sollen Antworten auf die Frage gefunden werden, für welche Aufgabenstellungen ein digital gesteuertes Umbildegerät eingesetzt werden kann. Dabei wird das von der Firma Wild, Heerbrugg in der Schweiz, angekündigte Umbildegerät Avioplan OR 1 /4/ /16/ in den Mittelpunkt der Überlegungen gestellt.

Das Grundprinzip des Avioplans veranschaulicht Bild 1:

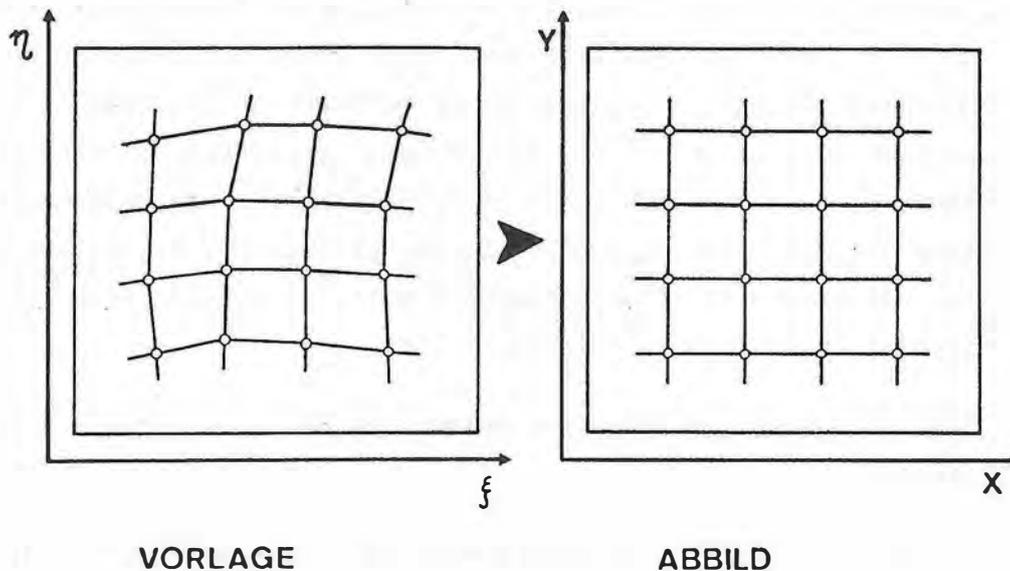


Bild 1: Grundprinzip der differentiellen Umbildung

Aus den beliebigen Vierecken der Vorlage entstehen im Abbild exakte Quadrate. Zur Steuerung der differentiellen Umbildung sind dem Prozeßrechner des Avioplans die Eckpunktkoordinaten ξ , η aller Vierecke zuzuführen. Der Leitgedanke für die Umbildung kann deshalb wie folgt formuliert werden: Man definiert sich im gewünschten Abbild ein quadratisches Raster und sucht sich in der Vorlage die korrespondierenden Eckpunkte. Der dazu notwendige funktionelle Zusammenhang zwischen den Koordinaten ξ , η der

ABSTRACT

Wild Heerbrugg Ltd. has announced the presentation (at the Helsinki Congress of the I.S.P., 1976) of the digitally-controlled Avioplan OR 1 Orthophoto System. This paper shows the range of applications for which this instrument can be used.

The primary application is, of course, the production of orthophotos. The required data can be acquired via a coordinate registration system which measures either image coordinates or model coordinates. The paper deals essentially with data acquired in the form of model coordinates, which can be arranged in contour lines, profiles or irregularly distributed points. The necessary data for the Avioplan are computed offline in a medium-size, general-purpose computer and written out on magnetic tape. Since the acquisition of the digital data describing the ground surface is quite separate from the production of the orthophoto, these data can be used repeatedly for the production of orthophotos from aerial photographs at different dates and with various focal lengths (provided the ground surface does not change). A time-series of orthophotos produced in this way is particularly important for the revision of orthophoto- and line-maps. In addition to an orthophoto, a stereo-orthophoto can be produced from the same initial data. Such economically produced stereo-orthophotos combine the advantages of orthophotography with the stereo effect which is of special importance in interpretation.

The second part of the paper deals with the methodology of the following problems:

- the rectification of photographs of developable surfaces;
- the transformation of small-scale maps from one map projection to another;
- the rectification of multi-spectral and radar images and of arbitrarily deformed originals.

1. EINLEITUNG

Einige Firmen haben in letzter Zeit eine neue Generation von Differentialumbildegeräten angekündigt /12/ /14/ /16/ /17/. Diese Geräte arbeiten - wie die meisten bisher in der Praxis stehenden Umbildegeräte - auf der Grundlage einer optischen Bildübertragung. Bei der neuen Gerätegeneration werden die optischen Elemente der Bildübertragung aber nicht mehr mechanisch sondern mit Hilfe eines Prozeßrechners gesteuert.

In diesem Aufsatz sollen Antworten auf die Frage gefunden werden, für welche Aufgabenstellungen ein digital gesteuertes Umbildegerät eingesetzt werden kann. Dabei wird das von der Firma Wild, Heerbrugg in der Schweiz, angekündigte Umbildegerät Avioplan OR 1 /4/ /16/ in den Mittelpunkt der Überlegungen gestellt.

Das Grundprinzip des Avioplans veranschaulicht Bild 1:

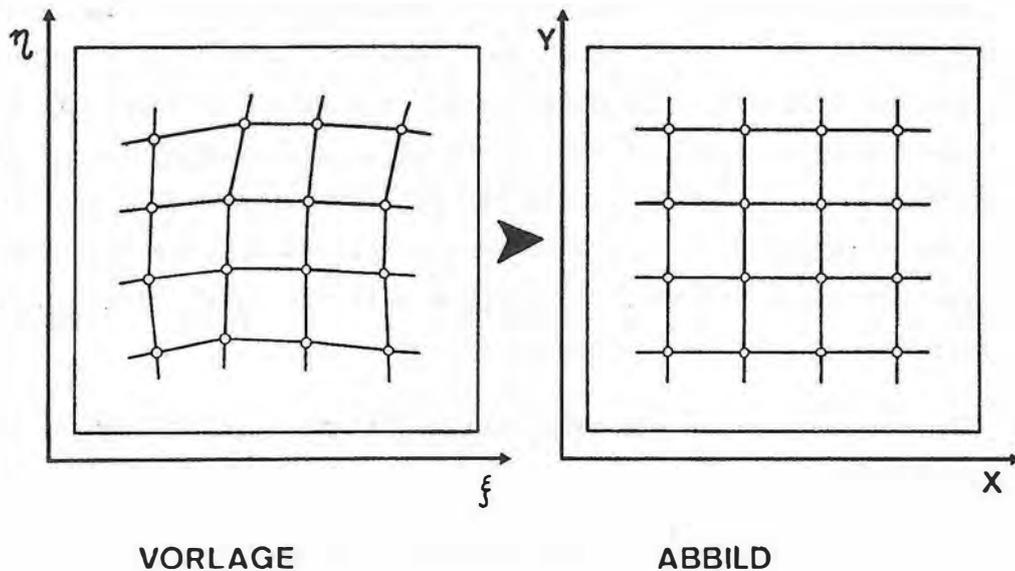


Bild 1: Grundprinzip der differentiellen Umbildung

Aus den beliebigen Vierecken der Vorlage entstehen im Abbild exakte Quadrate. Zur Steuerung der differentiellen Umbildung sind dem Prozeßrechner des Avioplans die Eckpunktkoordinaten ξ , η aller Vierecke zuzuführen. Der Leitgedanke für die Umbildung kann deshalb wie folgt formuliert werden: Man definiert sich im gewünschten Abbild ein quadratisches Raster und sucht sich in der Vorlage die korrespondierenden Eckpunkte. Der dazu notwendige funktionelle Zusammenhang zwischen den Koordinaten ξ , η der

Vorlage und den Koordinaten X, Y des Abbildes findet man in der Regel in zwei Schritten:

Einerseits ist der Zusammenhang

$$(X, Y) = f_a(x, y, z) \quad (1)$$

vorzugeben, wie das in den Koordinaten x, y, z festgelegte Objekt ins Abbild (X, Y) projiziert werden soll.

Andererseits muß der Zusammenhang

$$(\xi, \eta) = f_v(x, y, z) \quad (2)$$

bekannt sein, wie das Objekt (x, y, z) in die Vorlage (ξ, η) abgebildet wurde.

Entsprechend der Wahl der Beziehung f_v (2) können für die Umbildung verschiedene Vorlagen (photographische Aufnahmen mit Meß- und Amateurkamern, Radar- und Multispektralbilder, Karten in verschiedenen Netzentwürfen usw.) herangezogen werden. Die Variation der Beziehung f_a (1) bietet auf der anderen Seite die Möglichkeit, das Objekt in verschiedenen Projektionsarten (orthogonale und schiefe Parallelprojektion auf eine Horizontalebene oder auf abwickelbare Regelflächen usw.) abzubilden.

In den folgenden Abschnitten werden - in Abhängigkeit der Vorlage und der gewünschten geometrischen Eigenschaften des Abbildes - vier Gruppen von Anwendungsmöglichkeiten der digital gesteuerten Differentialumbildung besprochen.

2. ORTHOPHOTO- UND STEREOORTHOPHOTOGRAPHIE

Die Hauptanwendung der differentiellen Umbildung ist die Herstellung von Orthophotos aus Luftbildern. In diesem Fall wird - wie aus dem Bild 2 ersichtlich - in der X, Y -Ebene, in der das Abbild (Orthophoto) entstehen soll, das quadratische Raster definiert. Die Beziehungen f_a (1) zwischen den Geländekoordinaten x, y, z und den X, Y -Koordinaten des Abbildes lauten bei der Orthophotographie:

$$X = x, \quad Y = y \quad (3)$$

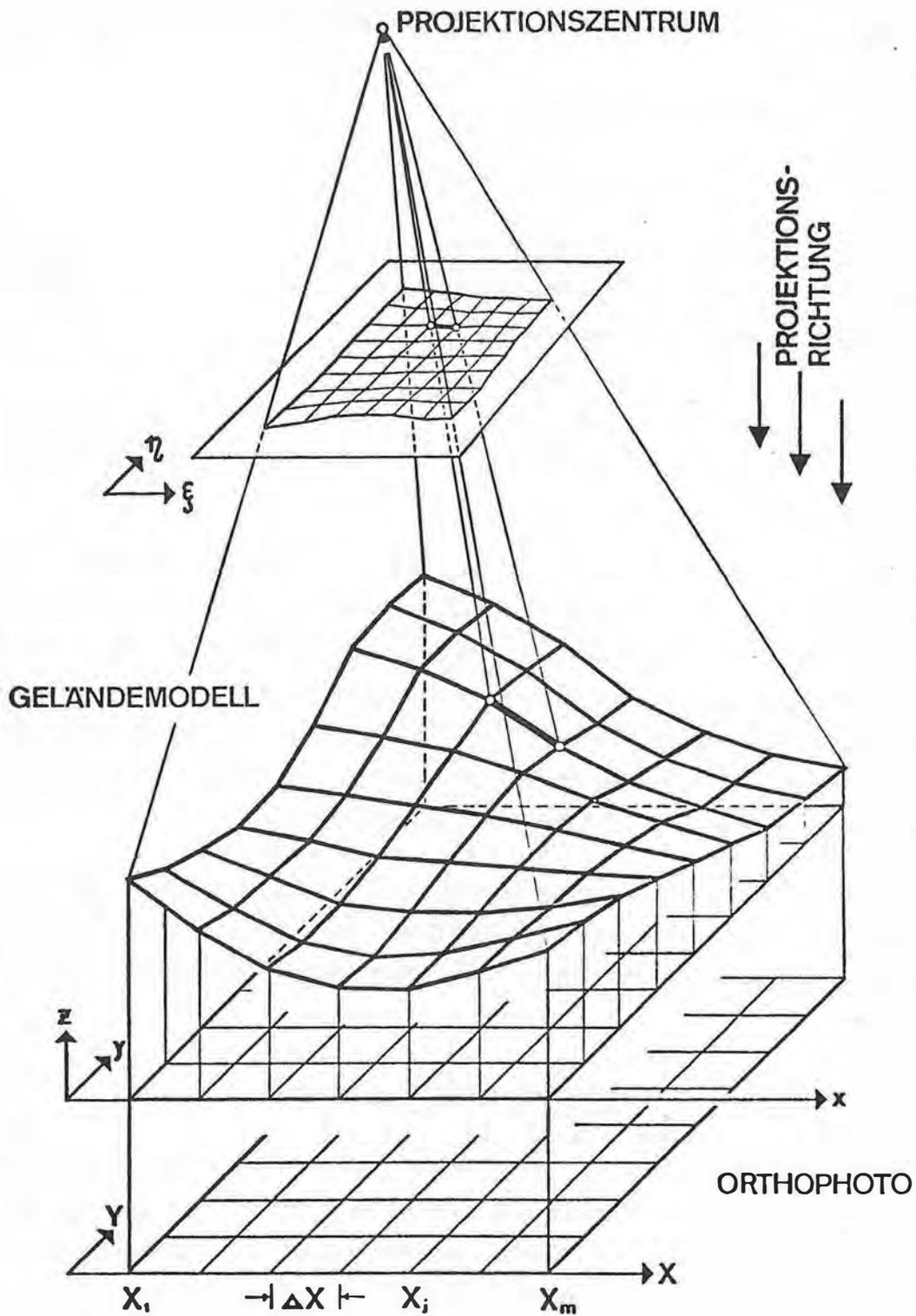


Bild 2: Zusammenhang zwischen Meßbild, Geländemodell und Orthophoto

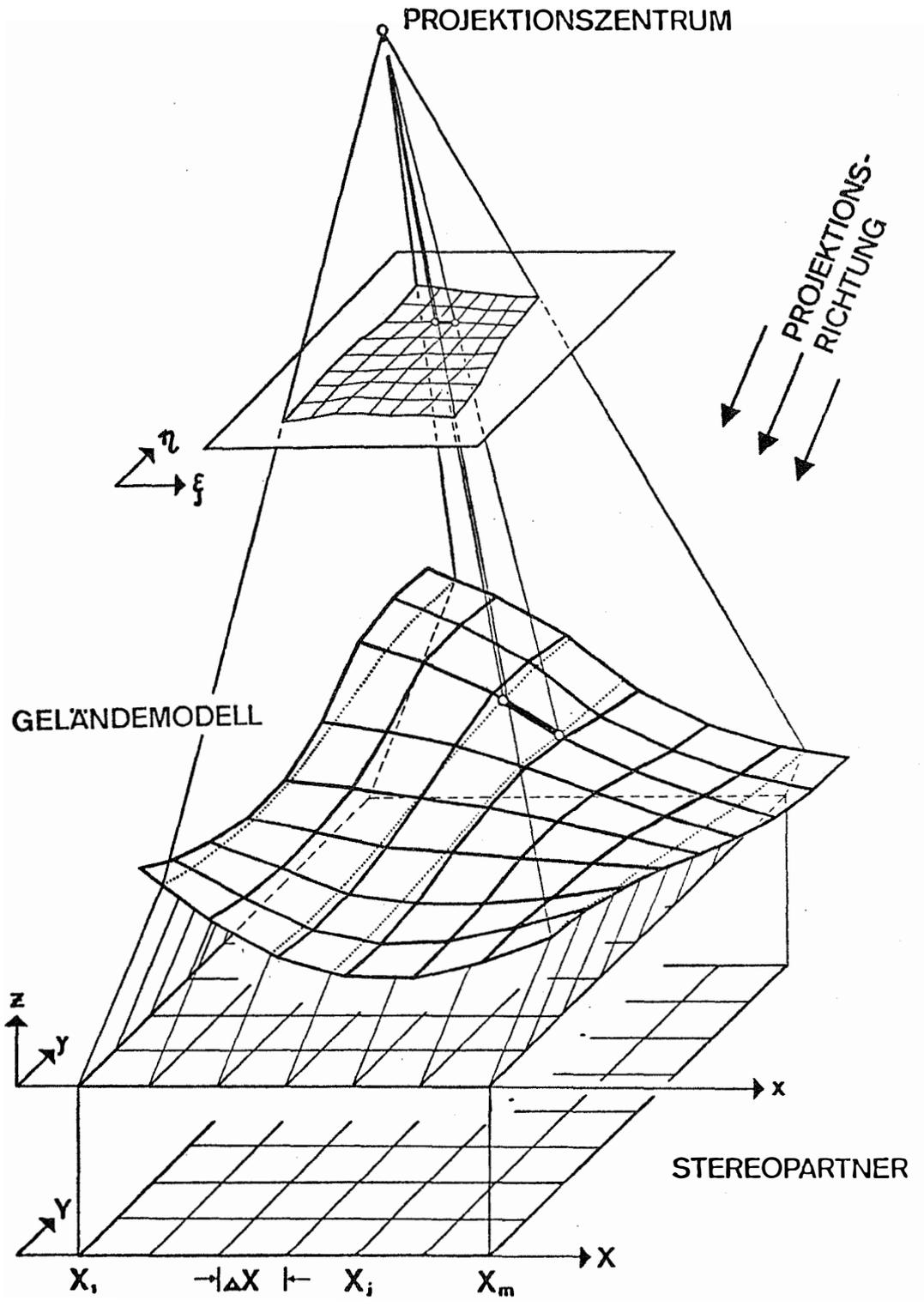


Bild 3: Zusammenhang zwischen Meßbild, Geländemodell und Stereopartner

Um die zu den Eckpunkten des quadratischen Rasters korrespondierenden Punkte im Meßbild zu bekommen, sind die mit den Koordinaten x, y, z festgelegten Rasterpunkte ins Bild (ξ, η) zu transformieren. Die dazu notwendigen Beziehungen $f_v(2)$ sind bei einem Meßbild die bekannten Abbildungsgleichungen der Zentralprojektion.

Projiziert man das Gelände nicht orthogonal sondern mit Hilfe der schiefen Parallelprojektion

$$X = x - kz, \quad Y = y \quad k = \text{Konstante} \quad (4)$$

auf die X, Y -Ebene, so erhält man ein Abbild, das gegenüber dem Orthophoto - linear von den Höhenunterschieden abhängige - x -Parallaxen aufweist. Dieses Abbild bezeichnet man als Stereopartner zum Orthophoto (Bild 3).

Zur Herstellung des Stereopartners ist zunächst in der X, Y -Ebene das quadratische Raster festzulegen. Daran anschließend sind die zu dem quadratischen Raster gehörigen Geländeoberflächenpunkte im x, y, z -System zu bestimmen. Im Bild 3 erkennt man diese Punkte als Schnittpunkte zwischen den punktierten Linien und den x -Profilen. Dabei wurde unterstellt, daß das Orthophoto und der Stereopartner von ein und demselben digitalen Geländemodell auf der Basis eines quadratischen Rasters hergestellt werden sollen.

Den Rechengang veranschaulicht Bild 4.

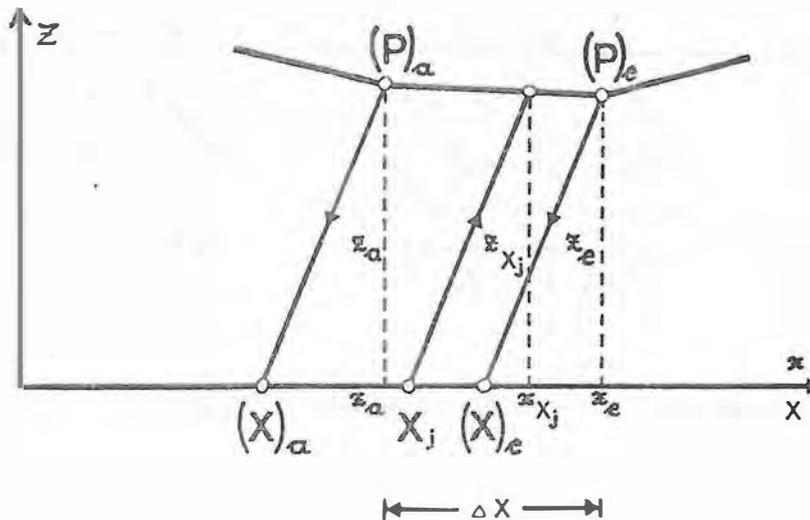


Bild 4: Rechengang zur Ableitung des Stereopartners aus dem Geländemodell

Zunächst wird für das jeweilige x-Profil jeder Eckpunkt $(P)_i$ des digitalen Geländemodells entsprechend der Gleichung (4) umgeformt.

$$(X)_i = x_i - kz_i \quad (5)$$

Im Anschluß daran sucht man sich für jede Rasterlinie X_j die beiden benachbarten Punkte $(P)_a$ und $(P)_e$. Damit lassen sich die gesuchten Koordinaten x_{X_j} und z_{X_j} berechnen (Bild 4):

$$x_{X_j} = \frac{\Delta X (X_j + k z_a) - x_a k (z_e - z_a)}{\Delta X - k (z_e - z_a)} \quad (6)$$

$$z_{X_j} = z_a + (z_e - z_a) \frac{x_{X_j} - x_a}{\Delta X} \quad (7)$$

$\Delta X = \text{Rasterweite}$

Die Gleichung (7) bringt zum Ausdruck, daß man im digitalen Geländemodell Zwischenpunkte durch lineare Interpolation einfügt. Die Gleichung (6) folgt aus der Abbildungsgleichung (4)

$$X_j = x_{X_j} - k z_{X_j}, \quad (8)$$

wobei die Größe z_{X_j} (7) zu substituieren und dann nach der gesuchten Koordinate x_{X_j} aufzulösen ist.

Schließlich sind die Geländepunkte x_{X_j} , y (bleibt unverändert), z_{X_j} mit Hilfe der bekannten Abbildungsgleichungen der Zentralprojektion ins Luftbild zu transformieren. Grundsätzlich kann man das gleiche Luftbild verwenden, aus dem bereits das Orthophoto abgeleitet wurde (Bild 2 und 3).

Um die im digitalen Geländemodell nicht erfaßten Details (Gebäude, Bäume usw.) ebenfalls stereoskopisch betrachten zu können, ist es allerdings vorteilhafter, das Orthophoto und den Stereopartner von zwei aufeinanderfolgenden Luftbildern des gemeinsam überdeckten Bereiches herzustellen.

Die Vorgabe der Konstanten k bestimmt die Plastizität des Stereoorthophotos. Wenn man für k das Basis-Höhenverhältnis b/h einführt, erhält man x -Parallaxen von der gleichen Größenordnung wie bei der stereoskopischen Betrachtung der ursprünglichen Luftbilder. Im flachen Gelände wird man

aber häufig einen wesentlich größeren Wert für k wählen.

Die meßtechnische Auswertung des Stereoorthophotos ist besonders einfach: Orthophoto und Stereopartner ergeben unter einem Spiegelstereoskop ein y-parallaxenfreies Modell. Eine auf dem Orthophoto geführte Meßmarke oder Markiereinrichtung beschreibt die abgefahrenen Linien lagerichtig und die x-Parallaxendifferenzen Δp_x können mit der einfachen Beziehung

$$\Delta z = \frac{\Delta p_x}{k}$$

- auch für beliebig weit auseinander liegende Punkte - in Höhenunterschiede Δz umgeformt werden /3/.

Stellt man Orthophoto und Stereopartner von zwei sich überlappenden Luftbildern her und sollen die bei der Stereoorthophotoherstellung eingeführten x-Parallaxen nach dem gleichen mathematischen Bildungsgesetz wie die x-Parallaxen der vom digitalen Geländemodell nicht erfaßten Details (Häuser, Bäume usw.) auswertbar sein, sind - nach einer Untersuchung von Collins /5/ - anstelle der Abbildungsgleichungen (4) die Beziehungen

$$X = x - b \ln \frac{h}{h - z}, \quad Y = y \quad \begin{array}{l} b = \text{Flugbasis} \\ h = \text{Flughöhe} \end{array} \quad (10)$$

einzuführen. Ausgehend von diesem Abbildungsgesetz erhält man die zu dem quadratischen Raster des Abbildes (= Stereopartner) korrespondierenden Geländeoberflächenpunkte im x, y, z-System aus folgenden Beziehungen:

$$x_{X_j} = X_j + b \ln \frac{h}{h - z_a - (z_e - z_a) (x_{X_j} - x_a) / \Delta X} \quad (11)$$

$$z_{X_j} = \text{wie (7)}$$

Die Gleichung (11) bekommt man nach dem selben Gedankengang wie die Gleichung (6). Allerdings läßt sich aus der Gleichung (11) die gesuchte Größe x_{X_j} nicht explizit herauslösen. Es ist deshalb eine iterative Auflösung, beginnend mit dem Näherungswert $x_{X_j}^0 = x_a$, anzuwenden. Die Transformation der Geländepunkte x_{X_j} , y. (bleibt unverändert), z_{X_j} in das

Luftbild (ξ, η) erfolgt wiederum nach dem bekannten Abbildungsgesetz der Zentralprojektion.

Zum Schluß dieses Abschnittes sind einige praxisbezogene Bemerkungen zur gerätetechnischen und programmtechnischen Realisierung dieser Gedanken angebracht:

2.1 Modellbildung im Analogauswertegerät und digitaler Abgriff der Bildkoordinaten

Die Firma Wild stellt für einige ihrer gängigen Analogauswertegeräte einen digitalen Abgriff jeweils für einen der beiden Bildträger her /16/. Die Registrierung der Bildkoordinaten wird während des profilweisen Abfahrens - mit konstantem Wegintervall - im Stereomodell ausgelöst. In diesem Fall ist das im Bild 2 skizzierte Prinzip gerätetechnisch nachgebildet. Die registrierten Bildkoordinaten können entweder on-line in den Prozeßrechner des Avioplanes geführt oder off-line auf Magnetband übergeben werden.

Der On-line-Betrieb scheidet in der Regel aus, denn der Avioplan erlaubt eine etwa 10-fach schnellere Abfahrzeit als die manuelle Profilabtastung.

Die unmittelbare Registrierung der Bildkoordinaten hat den großen Vorteil, daß für den gesamten Arbeitsprozeß der Orthophotoherstellung der kleine Prozeßrechner des Avioplanes ausreicht. Die Nachteile gegenüber den anschließend zu besprechenden Varianten bestehen vor allem darin, daß

- die Höhenlinien durch einen zweiten Auswertevorgang gewonnen werden müssen,
- kein Stereopartner zum Orthophoto abgeleitet werden kann,
- für das Profilieren im Modell und für die Orthophotoherstellung jeweils das gleiche Bildmaterial herangezogen werden muß,
- bei der Herstellung von Orthophotos aus Wiederholungsflügen die manuelle Profilabtastung der Stereomodelle wiederholt werden muß.

2.2 Modellbildung im Analogauswertegerät und Registrierung der Modellkoordinaten

In diesem Fall wird das Analogauswertegerät um eine Koordinatenregistrier-einrichtung (z.B. Wild EK 22, Zeiss Ecomat 11) mit einer Magnetbandaufzeichnung erweitert. Eine solche Gerätekonfiguration ist sehr vielseitig verwendbar. Sie ist die Grundausrüstung für die photogrammetrische Punktbestimmung auf der Basis unabhängiger Modelle und für die digitale Kartierung. Darüber hinaus können mit dieser Gerätekombination - wie im folgenden gezeigt wird - nun auch die Daten für Orthophotos und Stereoorthophotos erfaßt werden.

In starker Anlehnung an Bild 2 ergibt sich folgender Auswertemodus: Das Stereomodell wird nach der relativen und absoluten Orientierung profilweise abgefahren und gleichzeitig mit konstanten Wegintervallen registriert. Anschließend werden die Modellkoordinaten x, y, z rechnerisch in die Bildkoordinaten ξ, η überführt. Die dazu notwendigen Transformationsparameter (Lage des Projektionszentrums und räumliche Drehmatrix) können aus einer vorausgehenden Aerotriangulation oder aus einigen Paßpunkten rechnerisch ermittelt werden. Der gesamte hier anfallende Rechenaufwand kann von einem externen Digitalrechner mit einem Kernspeicher kleiner als 64 K bytes à 8 bit oder mit dem entsprechend erweiterten Prozeßrechner des Avio-plans bewältigt werden. Den Weg über den Prozeßrechner haben die Firmen OMI/Bendix für ihren Orthophoto-Printer /14/ realisiert und H.G. Jerie beabsichtigt, diesen Weg am ITC für den Wild-Avioplan zu verwirklichen.

Noch offensichtlicher werden die Vorteile der Modellkoordinatenregistrierung, wenn die Digitalisierung der Geländeoberfläche bereits nach der relativen Orientierung einsetzt. In diesem Fall sind im externen Digitalrechner die absolute Orientierung, die Interpolation der Höhen eines quadratischen Rasters und die Transformation der Rasterpunkte in die Bildebene durchzuführen. Die Digitalisierung im nur relativ orientierten Modell erfolgt vorzugsweise in Profilen mit konstantem Weg- oder Zeitintervall. Für bebauten Gebiete und in Waldbereichen bietet sich die Datenerfassung in unregelmäßig verteilten Einzelpunkten an. In fast ebenem Gelände sind nur sehr wenig Einzelpunkte zu erfassen. Für die anschließende Interpolation der Höhen des quadratischen Rasters aus den jeweils benachbarten Gelände-

punkten reicht ein einfaches Interpolationsverfahren aus /11/.

Sollen dagegen aus dem originären Datenmaterial sowohl das Orthophoto als auch ein Magnetband zur automatischen Kartierung der Höhenlinien an einem elektronisch gesteuerten Zeichenautomaten abgeleitet werden, sind komplexere Interpolationsalgorithmen einzusetzen /7/, /15/. Sie müssen vor allem die Elimination der unregelmäßigen Meßfehler und des systematischen Anteiles des Abtastfehlers der profilweisen Datenerfassung erlauben. Für höhere Qualitätsansprüche an das rechnerisch abgeleitete Höhenlinienbild ist zusätzlich eine besondere Behandlung der Geländekanten erforderlich. Über den heute erreichten Stand der automatischen Höhenlinienkartierung, den notwendigen Rechen- und Kernspeicheraufwand gibt eine Veröffentlichung von E. Abmus /1/ Aufschluß.

Auf der Basis der Modellkoordinatenregistrierung bietet der Avioplan aber auch die Möglichkeit, am Zeichentisch des Analogauswertegerätes die Höhenlinien direkt zu kartieren und sie zusätzlich simultan in digitaler Form auf Magnetband zu speichern. Diese digitalisierten Höhenlinien dienen als Eingabe für den externen Digitalrechner zur Interpolation der Höhen des quadratischen Rasters, das anschließend - wie bereits erwähnt - in die Bildebene zu transformieren ist. Die Höhen des quadratischen Rasters können in diesem Fall wiederum mit einem einfachen Algorithmus interpoliert werden /11/. Diese Variante, die unter anderem R. Finsterwalder /6/ propagiert, aber bisher im Routinebetrieb noch nicht realisiert werden konnte, hat folgende Vorteile:

- Das Höhenlinienbild entsteht durch direkte Messung verbunden mit einer geomorphologischen Interpretation der Geländeoberfläche.
- Das Raster für die Orthophotoherstellung läßt sich mit sehr kurzen Rechenzeiten und einem Kernspeicherbedarf von weniger als 128 K bytes à 8 bit ableiten /11/.

Ist man auf der anderen Seite bereit, den höheren Rechenaufwand der rechnerischen Höhenliniengewinnung /1/ zu tragen, hat man die folgenden Vorteile:

- Die profilweise Datenerfassung im relativ orientierten Modell geht etwa um den Faktor 3 schneller als die direkte Höhenlinienauswertung.
- Die Kartierung der Höhenlinien mit dem elektronisch gesteuerten

Präzisionszeichentisch automatisiert einen arbeitsintensiven Teil der Kartographie.

Grundsätzlich besteht künftig die Möglichkeit, die geringere geomorphologische Qualität der rechnerisch abgeleiteten Höhenlinien teilweise mit Hilfe des Stereoorthophotos zu beheben. Bei gemeinsamer Betrachtung des Stereoorthophotos und des rechnerisch abgeleiteten Höhenlinienbildes lassen sich nämlich verhältnismäßig einfach diesbezügliche Korrekturen anbringen.

Voraussichtlich werden in Zukunft - in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen - alle hier angedeuteten Auswertemethoden in der Praxis verwendet. Für den Praktiker ist es beruhigend, daß die gängigen Analogauswertegeräte erweitert um eine Modellkoordinatenregistrierung und das digital gesteuerte Differentialumbildegerät Avioplan OR 1 die Realisierung aller hier zur Diskussion gestellten Auswertevarianten erlauben.

2.3 Errichtung einer Geländedatenbank

Die auf die digitale Arbeitsweise ausgerichtete photogrammetrische Auswertetechnik kann ihr Potential erst voll ausspielen, wenn man einerseits die Datenerfassung völlig loslöst von der Orthophotoherstellung und zum anderen die erfaßten Daten in eine Geländedatenbank überführt.

Die Datenerfassung kann im absolut orientierten Modell in der Form von Höhenlinien oder im relativ orientierten Modell in der Form von Profilen erfolgen. Eine weitere Variante der Datenerfassung ist die Digitalisierung vorhandener Höhenlinienkarten. Schließlich kann auch die terrestrische Datenerfassung mit Hilfe moderner elektronischer Tachymeter in dieses System integriert werden.

Zunächst sind die originären Daten - in Abhängigkeit der Datenerfassungsmethode - in das Landeskoordinatensystem zu transformieren und in Einheiten, die im Blattschnitt des Landeskoordinatensystems definiert werden, zu archivieren. Für die Geländedatenbank wählt man zweckmäßigerweise den gleichen "Blattschnitt" wie für das Landeskartenwerk.

Nach der Interpolation der Höhen eines quadratischen Rasters können diese heterogenen Ausgangsdaten zur Herstellung von Orthophotos und Stereoorthophotos herangezogen werden. Die damit verbundenen Vorteile liegen auf der Hand: So kann man z.B. die Daten aus einem Überweitwinkelflug erfassen; das Orthophoto aber - vor allem im Stadtbereich - aus Normalwinkelaufnahmen herstellen. Für den Flug, aus dem die Orthophotos abgeleitet werden, genügen sogar 20 % Längs- und Querüberdeckung.

Der größte Gewinn, den die Einrichtung einer Geländedatenbank mit sich bringt, ist die jeweilige Verwendung dieser Daten zur rechnerischen Ableitung von Orthophotos aus Wiederholungsflügen. Mit diesen Zeitreihen von Orthophotos ist - nachdem sich die Oberfläche des Geländes nur wenig verändert - die Fortführung der Orthophotokarten weitgehend automatisiert. Mit Hilfe der Orthophotos und vor allem der Stereoorthophotos läßt sich auch die Fortführung der konventionellen Strichkarten wesentlich rationalisieren.

Das digital gesteuerte Differentialumbildeggerät Avioplan in Verbindung mit einer Geländedatenbank ist hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit mit dem Orthophotosystem der Firma Gestalt Ltd., Canada, vergleichbar. Beim Gestalt-System ersetzt der auf elektronischer Basis arbeitende Korrelator den manuellen Auswerter und beim Wild-Avioplan übernimmt diese Aufgabe die Geländedatenbank. Es liegen noch zu wenig Erfahrungen vor, um beide Systeme detailliert miteinander vergleichen zu können.

Zugunsten des Gesamtsystems Avioplan-Geländedatenbank sei hier nur vermerkt, daß erstens die Geländedatenbank nicht nur für die Orthophotographie eingesetzt werden kann, sondern für vielfältige andere Problemstellungen von großem Nutzen sein wird, und daß zweitens mit dem Avioplan auch aus "nichtkorrelationsfähigen" Luftbildern Orthophotos abgeleitet werden können. Die automatische Korrelation ist bekanntlich bei extrem großmaßstäbigen Bildern und bei Luftbildern mit geringer photographischer Qualität sowie im Hochgebirge beeinträchtigt.

Die am Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität Wien entwickelte Software für die digital gesteuerte Orthophotoproduktion im Off-line-Betrieb sowie die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems haben

G. Otepka und J. Loitsch beschrieben /11/. Diese im Auftrag der Firma Wild und in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen in Wien hergestellte Software eignet sich für die im Abschnitt 2.2 ange-deuteten verschiedenen Varianten der Datenerfassung. Darüber hinaus werden mit Hilfe einer einfachen Konzeption auch die Vorteile einer Geländedaten-bank demonstriert. Eine Veröffentlichung von J. Bernhard /2/, Leiter der Abteilung Photogrammetrie im Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen in Wien, enthält erste praktische Erfahrungen und die beabsichtigten Arbeits-einsätze des angesprochenen Geräte- und Software-Systems in der Ver-messungsverwaltung in Österreich.

3. PROJEKTION AUF ABWICKELBARE REGELFLÄCHEN

Bisher wurde das zur Steuerung der Umbildung notwendige quadratische Raster in einer ebenen Abbildungsfläche definiert. Das quadratische Raster kann aber auch auf einer abwickelbaren Regelfläche festgelegt werden. Auf diese Weise kann mit Hilfe des Avioplans ein photographisches Bild erzeugt werden, das einer Projektion des Objektes auf einen Zylinder, einen Kegel usw. entspricht. Die jeweils gewünschte Projektionsart kann durch die Wahl der Beziehung $f_a(1)$, die den Zusammenhang zwischen den Oberflächenkoordinaten X, Y der abwickelbaren Regelfläche und den in einem carte-sischen Koordinatensystem x, y, z festgelegten Objekt beschreibt, gesteuert werden. Etwas ausführlicher soll der gesamte Umbildevorgang an dem spezi-ellen Beispiel des Bildes 5 besprochen werden: Als Vorlage steht ein Meß-bild zur Verfügung. Gesucht ist die Orthogonalprojektion der Objektober-fläche auf einen vorgegebenen Zylinder. Die Form der Objektoberfläche muß in dem cartesischen Koordinatensystem x, y, z bekannt sein. Im allgemeinen gewinnt man diese Daten durch Profilieren in einem Stereo-modell.

Die rechnerische Gewinnung der Steuerdaten für den Avioplan beginnt für dieses Umbildepblem mit der Definition eines quadratischen Rasters X, Y auf der Zylinderoberfläche (Bild 5). Anschließend sind die in den Rastereckpunkten zu errichtenden Normalen des Zylinders mit der Objekt-oberfläche zu verschneiden. Diese Schnittpunkte sind zum Schluß mit Hilfe der bekannten Gleichungen der Zentralprojektion in die Bildebene (ξ, η) zu transformieren.

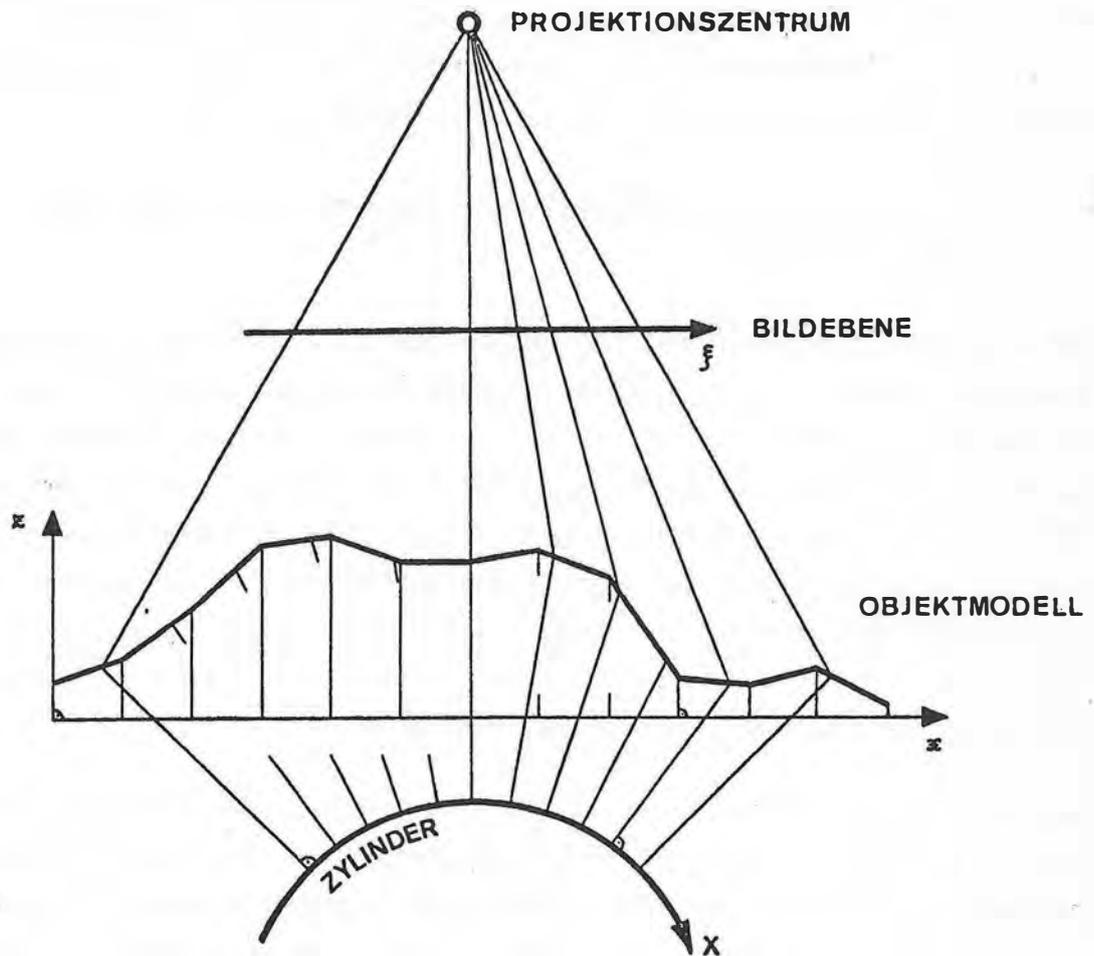


Bild 5: Orthogonale Projektion des Objektmodells auf einen Zylinder

Die photographische Projektion von Objekten auf abwickelbare Regelflächen ist ein neues Hilfsmittel, um die vielfältigen Aufgabenstellungen in der Ingenieurvermessung und anderen Sonderanwendungen der Photogrammetrie zu lösen. Die zuweilen in diesem Anwendungsbereich anzutreffenden Amateur- aufnahmen können ebenfalls als Vorlage für eine solche Umbildung dienen. Bei der Transformation der Oberflächenpunkte in die Bildebene lassen sich in der bekannten Weise die Abweichungen von der exakten Zentralprojektion rechnerisch berücksichtigen.

Ein für die Architektur und Denkmalpflege besonders interessanter Spezialfall liegt vor, wenn die Oberfläche des Objektes mit der abwickelbaren Regelfläche zusammenfällt. Das im Avioplan erzeugte Abbild ist nämlich in diesem Fall eine geometrisch exakte Abwicklung der gekrümmten Ober-

fläche. Nach diesem Verfahren hat das Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität Wien die Deckenfresken des Bibliothekssaales des Wiener Schotten-Stiftes "photographisch" abgewickelt /9/.

4. DIE UMBILDUNG KLEINMASZSTÄBIGER KARTEN VON EINEM NETZENTWURF
IN EINEN ANDEREN

Ist eine topographische Übersichtskarte oder eine kleinmaßstäbige geographische Karte von einem Kartennetzentwurf in einen anderen Netzentwurf zu überführen, tritt nach Berechnung des neuen Grad- bzw. Koordinatengitters das Problem der Übertragung des Karteninhaltes auf. Dieses Problem läßt sich mit Hilfe des digital gesteuerten Differentialumbildegerätes Avioplan elegant lösen. Man legt in das Differentialumbildegerät - nach Farbauszügen getrennt - die jeweilige, aus Formatgründen eventuell vorher verkleinerte Folie der alten Karte ein und man erhält nach der automatischen Umbildung die Druckvorlage für die neue Karte.

Wie man die Steuerbefehle für eine solche automatische Umbildung berechnet, soll an der von K. Ramsayer /13/ vorgeschlagenen Umformung der internationalen Luftfahrkarten von winkeltreuen Kegelprojektionen in eine "abgestufte Mercatorprojektion" erläutert werden. Für die Erklärung des Prinzips werden folgende vereinfachte Verhältnisse angenommen:

- R = Radius der Erdkugel
- ϕ = geographische Breite
- λ = geographische Länge

Vorlage: Winkeltreue Kegelprojektion mit δ_0 ($\delta = 90^\circ - \phi$) als Berührungsparellelkreis;

Radius r der konzentrischen Kreise:

$$r = \frac{R \operatorname{tg} \delta_0}{\left(\operatorname{tg} \frac{\delta}{2} \right) \cos \delta_0} \cos \delta_0 \quad (12)$$

Schnittwinkel α des Geradenbüschels der Meridiane:

$$\alpha = (\cos \delta_0) \lambda \quad (13)$$

Abbild: Mercatorprojektion

X-Koordinaten (Abstände der Meridiane):

$$X = R\lambda \quad (14)$$

Y-Koordinaten (Abstände der Breitenkreise vom Äquator):

$$Y = R \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \quad (15)$$

Die Rechnung beginnt mit der Definition des quadratischen Rasters X, Y in der Mercatorprojektion. Aus den Gleichungen (14) und (15) erhält man die zu den Rastereckpunkten korrespondierenden geographischen Koordinaten ϕ und λ auf der Erdkugel. Die dazu entsprechenden Koordinaten r und α der winkeltreuen Kegelprojektion ergeben sich daran anschließend aus den Beziehungen (12) und (13). Zum Schluß sind die Polarkoordinaten r und α noch in die rechtwinkligen Koordinaten ξ und η der Vorlage umzuformen.

Dieses Verfahren der Umbildung einer winkeltreuen Kegelprojektion in eine Mercatorprojektion kann grundsätzlich auf alle bekannte Projektionsarten übertragen werden. So lassen sich z.B. die spektakulären Hasselblad-Aufnahmen der bemannten Erdmissionen und Aufklärungssatelliten ohne nennenswerten Verlust der Farbtintensitäten in die gängigen Projektionsarten der Atlanten umbilden.

5. DIE REKTIFIZIERUNG BELIEBIG VERZERRTER VORLAGEN

Bei den bisher behandelten Problemstellungen war jeweils die Geometrie der Vorlage in der Form von mathematischen Abbildungsgleichungen bekannt. In diesem Abschnitt wird von der genannten Voraussetzung abgegangen und versucht, wie beliebig verzerrte Vorlagen in geometrisch richtige Abbildungen überführt werden können. Die Rektifizierung von multispektralen Scanner- und Radaraufnahmen sind solche Aufgabenstellungen.

Als Grundlage für die Umbildung benötigt man die Deformationswerte in mehr oder weniger gleichmäßig verteilten Referenzpunkten. Man kann diese Deformationswerte sehr zweckmäßig in einem Stereokomparator messen, indem man in den einen Bildträger die deformierte Vorlage (z.B. ein multispek-

trales Scannerbild) und in den anderen die Referenzgrundlage (z.B. ein Orthophoto) einlegt. Aus den an den unregelmäßig verteilten Punkten gemessenen Deformationswerten lassen sich dann die auf ein quadratisches Raster bezogenen Deformationsgrößen interpolieren. Damit ist der für die digital gesteuerte Differentialumbildung notwendige Zusammenhang zwischen dem quadratischen Raster des Abbildes und dem beliebig geformten Raster der Vorlage gefunden.

Dieses Verfahren, das in der Veröffentlichung /8/ detaillierter beschrieben ist, wird seit einiger Zeit zur Rektifizierung von multispektralen Scanneraufnahmen am Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität Wien angewandt. Die inzwischen gesammelten Erfahrungen beschreibt die Veröffentlichung /10/.

Grundsätzlich läßt sich diese Methode auch zur Rektifizierung von deformierten Strichkarten verwenden. Die Deformationen der Strichkarten erkennt man häufig nach der Erstellung eines neuzeitlichen geodätischen Festpunktfeldes. Für die Praxis ist es unerlässlich, veraltete Strichkarte und neuzeitliches Festpunktfeld in Einklang zu bringen.

6. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Parallel zur Konstruktion und Fertigung eines neuen Gerätes müssen Überlegungen über seine künftige Anwendungsmöglichkeiten angestellt werden. In diesem Aufsatz wurden einige Gedanken zur Anwendung des zum ISP-Kongreß in Helsinki (1976) auf den Markt kommenden Umbildegerätes Wild-Avioplan OR 1 geäußert. Dabei wurde das Ziel verfolgt, einerseits an Hand von typischen Anwendungsbeispielen die Universalität dieses neuartigen, digital gesteuerten Differentialumbildegerätes aufzuzeigen und zum anderen die Wissenschaft und Praxis zur Ausarbeitung weiterer Anwendungsmöglichkeiten zu stimulieren.

SCHRIFTTUM

- /1/ ASSMUS, E.: Berücksichtigung von Geländekanten im Stuttgarter Höhenlinienprogramm - Theorie und Ergebnisse, Geowissenschaftliche Mitteilungen, TU Wien, Heft 8, 1976, presented paper, XIII.ISP-Kongreß, 1976
- /2/ BERNHARD, J.: Ein Bericht über erste Erfahrungen mit der Datenerfassung für den Avioplan OR 1 und geplante Arbeitseinsätze am Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, erscheint in der ÖZfVuPh, presented paper, XIII.ISP-Kongreß, 1976
- /3/ BLACHUT, T.J.: Mapping and Photointerpretation System Based on Stereo-Orthophotos, NRC (Ottawa) 12281, 1971
- /4/ BORMANN, G.: Zur Drehung und Maßstabsänderung von linienförmigen Bildelementen bei Orthophotoprojektoren mit frontaler Bildabtastung, Festschrift Dr. Bertele, 39-47, Wild Heerbrugg, 1975
- /5/ COLLINS, S.H.: The Ideal Mechanical Parallax for Stereoorthophotos, Canad. Surveyor 24, 561-568, 1970
- /6/ FINSTERWALDER, R.: Zur Gewinnung von Profilen aus Schichtlinien zum Zwecke der Differentialentzerrung, ZfV 97, 193-196, 1972
- /7/ KRAUS, K.: Ein allgemeines digitales Geländemodell - Theorie und Anwendungsmöglichkeiten, Beitrag in "Numerische Photogrammetrie" von F.Ackermann, Neue Folge - Buchreihe, Band 5, Wichmann-Verlag, 225-253, 1973
- /8/ KRAUS, K.: Die Entzerrung von Multispektralbildern, BuL 43, 129-134, 1975
- /9/ KRAUS, K. und TSCHANNERL, J.: Die photographische Entzerrung abwickelbarer Regelflächen, Geowissenschaftl.Mitteilungen, TU Wien, Heft 8, 1976
- /10/ OTEPKA, G.: Praktische Erfahrungen bei der Rektifizierung von MSS-Bildern, Geowissenschaftliche Mitteilungen, TU Wien, Heft 8, 1976, presented paper, XIII.ISP-Kongreß, 1976
- /11/ OTEPKA, G. und LOITSCH, J.: Ein Programm zur digital gesteuerten Orthophotoproduktion, Geowissenschaftliche Mitteilungen, TU Wien, Heft 8, 1976, presented paper, XIII.ISP-Kongreß, 1976
- /12/ PÖLZLEITNER, F.: Orthophotoherstellung mittels Bildkoordinaten im Universalorthophotosystem, ZfV 100, 42-47, 1975
- /13/ RAMSAYER, K.: Großräumige Flugkarten, AVN 83, 37-47, 1976
- /14/ SCARANO, F. und JERIC, A.: Off-line Orthophoto Printer, Photogr. Eng. XLI, 977-991, 1975
- /15/ STANGER, W.: Das Stuttgarter Höhenlinienprogramm - Beschreibung und Ergebnisse, Beitrag in "Numerische Photogrammetrie" von F.Ackermann, Neue Folge - Buchreihe, Band 5, Wichmann-Verlag, 255-282, 1973
- /16/ STEWARDSON, P.: The Wild Avioplan OR 1 Orthophoto System, presented paper, XIII.ISP-Kongreß, 1976
- /17/ VIGNERON, C.: MATRA Type 910 Automatic Third Camera, Photogr.Eng. XLI, 1285-1289, 1975

Geowiss. Mitt.

8, 1976, S.23 - 49

EIN PROGRAMM ZUR DIGITAL GESTEUERTEN ORTHOPHOTOPRODUKTION

von

G. Otepka und J. Loitsch

Adresse der Autoren:

Dr. G. Otepka und J. Loitsch, Institut für Photogrammetrie der
Technischen Universität Wien, 1040 Wien, Gußhausstraße 27-29, Österreich

ZUSAMMENFASSUNG

Am Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität Wien wird seit dem Herbst 1974 das Programmsystem SORA (Software für die Offline-Rekti-fikation mit dem Avioplan) im Auftrage der Fa. Wild Heerbrugg entwickelt.

Im ersten Teil des vorliegenden Aufsatzes wird aus diesem System das ein-
satzfertige Programm SORA-OP (SORA-OrthoPhoto) vorgestellt. Für die Ortho-
photoherstellung sind Geländehöheninformationen notwendig. Vom Programm
SORA-OP können alle praktischen Fälle der Datenerfassung (Höhenlinien,
Profile, unregelmäßig verteilte Punkte) in einem absolut oder nur gegen-
seitig orientierten Modell verarbeitet werden. Dazu müssen diese Daten,
die im Regelfall in photogrammetrischen Analogauswertegeräten gewonnen
werden, auf einem Magnetband vorliegen. Selbstverständlich kann dieses
Datenband auch in einem Digitizer, durch das Abfahren vorhandener Höhenlinien -
pläne, erstellt werden. Bei der Programmerstellung wurde besonders darauf
geachtet, daß die Datenerfassung für den Operateur möglichst einfach und
praxisnahe erfolgen kann. So können z.B. vom Programm Fehlregistrierungen
automatisch eliminiert werden.

Das in FORTRAN IV geschriebene Programm ist in seiner derzeitigen Version
auf eine Rechenanlage mit einem Kernspeicher von 128 K bytes ausgelegt.
An Peripheriegeräten benötigt das Programm - neben den üblichen Ein- und
Ausgabemedien - eine Plattenstation und eine, vorzüglicherweise zwei
Bandstationen.

Das Programm selbst zerfällt in 2 Teile: Im Teil 1 wird mit Hilfe eines
einfachen Interpolationsverfahrens ein Digitales Höhenmodell (DHM) eines
Einzel- oder Doppelmodells mit rechteckigem Raster erstellt.

Im Teil 2 werden die DHM-Werte ins Bild transformiert und die Avioflan-
steuerdaten daraus abgeleitet. Die für die Transformation notwendigen
Elemente der äußeren Orientierung des Bildes können eingegeben oder vom
Programm über Paßpunkte bestimmt werden. Dabei wird ein allgemeiner Ansatz
verwendet, der keine genäherten Senkrechtaufnahmen voraussetzt. Dadurch
ist auch die Bearbeitung allgemeiner Aufnahmedispositionen, wie sie z.B.
in der terrestrischen Photogrammetrie vorkommen, mit diesem Programm
möglich.

Durch die Zweiteilung des Programms kann das einmal berechnete Raster, das grundsätzlich auch von einem anderen DHM-Programm erstellt sein kann, für Orthophotozeitreihen von gezielten Bildflügen verwendet werden.

Der zweite Teil des Aufsatzes zeigt Beispiele, die mit dem Programm SORA-OP bearbeitet wurden. An Hand von Genauigkeitsuntersuchungen wird die Güte, durch die Angabe der Rechenzeiten die Wirtschaftlichkeit und durch die Bearbeitung von Doppelmodellen und einer Orthophotozeitreihe die Universalität des Geräte-Programmsystems gezeigt. Bei der erwähnten Orthophotozeitreihe wurden Bilder verwendet, deren Brennweiten, Fluganordnungen und Bildmaßstäbe sich von jenen unterscheiden, die zur Datenerfassung herangezogen wurden.

Der dritte Teil der Arbeit bringt schließlich Ausblicke auf Erweiterungsmöglichkeiten des Programmsystems SORA. Dazu gehört das Programm SORA-ST (SORA-Stereo-Orthophoto), für das bereits erste Beispiele vorliegen. Weiters werden Gedanken über den Einsatz von SORA-OP innerhalb einer Geländedatenbank aufgezeigt.

ABSTRACT

The Institute for Photogrammetry of the Technical University of Vienna has been engaged since autumn, 1974, in the development of a computerprogram system for Wild Heerbrugg Ltd. The name of the system is SORA (Software for Offline Rectification, Avioplan).

The first part of the paper presents the program SORA-OP (SORA-OrthoPhoto) which is fully developed and ready for use. Terrain height information is necessary for the production of an orthophoto. The SORA-OP program permits the use of all practical forms of digital terrain data - digitized contours, profiles, irregularly distributed points - in an absolutely oriented or even merely relatively oriented model. These data, usually acquired in a stereo-plotter, must be available on magnetic-tape. The data can also, of course, be acquired by digitizing an existing contour map on a digitizing table. Special attention has been paid in the development of the program to the practical problems involved in data acquisition. For example, faulty registrations can be automatically eliminated.

The program, written in FORTRAN IV, is designed, in the present version, for a medium-size, general-purpose computer of 128 K bytes storage capacity. Apart from standard input and output devices, a magnetic-disc unit and at least one magnetic-tape unit (preferably two) are needed.

The program is divided into two parts. In part 1 a simple interpolation procedure is used to produce a digital terrain height model (DHM), with a rectangular grid, of a part or the whole of the area covered by one aerial photo (i.e. a single or a double model).

In part 2 the DHM data are transformed into the plane of the aerial photograph and the required data for the OR 1 are derived. The elements of outer orientation of the camera needed in this process can be input or can be computed by the program from control points. A quite general procedure is used for the latter computation, which does not require an assumption of near-vertical camera axis. Thus any camera tilt may be employed, as, for example, in terrestrial photogrammetry.

This division into two parts makes it possible to use the data from part 1 (or from some other DHM program) as the basic data for a timeseries of orthophotos from aimed photographs.

The second part of the paper discusses some examples of orthophotos produced via the SORA-OP program. The quality of the method is shown by tests of accuracy, the economy by typical computing times, and the universality of the combination of instrument and computer-program system is demonstrated by the production of double-model and time-series orthophotos. For the latter, aerial photographs were used whose focal lengths, flight arrangements and scales all differed, all with the same basic data.

Finally, the third part of the paper presents the possibilities of extensions of the program system SORA, including a program SORA-ST (STereo-orthophoto), from which first examples have already been produced. Some thoughts on the use of SORA-OP in conjunction with a terrain data bank are also presented.

1. EINLEITUNG

Die Firma Wild Heerbrugg stellt zum XIII. Internationalen Kongreß für Photogrammetrie ihr neues Orthophotosystem Avioplan OR 1 /16/ vor. Gesteuert wird dieses universelle Differentialumbildeggerät von einem kleinen Prozeßrechner. Die dazu notwendigen Daten werden von einem Magnetband gelesen. Seit dem Herbst 1974 wird am Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität Wien im Auftrag der Fa. Wild Heerbrugg das Programmsystem SORA (Software für die Offline-Rektifikation mit dem Avioplan) entwickelt, das die universelle Anwendungsmöglichkeit dieses Differentialumbildeggerätes ausschöpfen soll /10/.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist es, aus diesem Programmsystem das selbständige Programm SORA-OP (SORA-OrhoPhoto), das zur Herstellung von Orthophotos im Offline-Betrieb dient, vorzustellen und weitere Ergebnisse zu zeigen, die mit dem Programm SORA-ST (SORA-Stereo-Orthophoto) bearbeitet wurden. Das zuletzt genannte Programm gestattet die Berechnung der Steuerdaten, die eine Erstellung von Stereopartnern zu Orthophotos ermöglichen.

Bei der Realisierung der beiden Programme SORA-OP und SORA-ST sollten die nachfolgenden Bedingungen und Anforderungen verwirklicht werden:

1.1 Bei der Datenerfassung

- Alle sinnvollen und in der Praxis benutzten Möglichkeiten der Geländehöhenerfassung sollen auch für Orthophotoherstellungen verarbeitbar sein.
- Trotzdem sollte der Operateur bei der Datenerfassung kaum von seinen bisherigen Gewohnheiten abweichen und möglichst wenig Zusatzinformationen registrieren, bestimmen oder aufschreiben müssen.
- Die einmal erfaßten Daten müssen zur Herstellung sowohl des Orthophotos als auch des Stereopartners verwendbar sein.
- Die bei der Datenerfassung begangenen Fehler sollten korrigierbar sein.
- Wegen notwendiger Arbeitsunterbrechungen muß es möglich sein, die Daten, in beliebig viele Files unterteilt, auf Magnetband zu schreiben.
- Neben Registrierungen in metrischen Einheiten muß auch eine solche in Fußeinheiten möglich sein.

1.2 Bei der Programmbenutzung

- Die Rechenkosten sollten so gering sein, daß künftig die Herstellung der Orthophotos und Stereo-Orthophotos wirtschaftlich sehr attraktiv wird.
- Die über Lochkarten einzugebenden Werte sollten ein einheitliches Eingabeformat besitzen und es sollten möglichst nur solche Werte einzugeben sein, die auch bei einer herkömmlichen Orthophotoherstellung bekannt sein müssen.
- Das Programm sollte automatisch Datenfehler eliminieren, wo dies möglich ist. Andernfalls sollen klare Fehlerhinweise helfen, die vorhandenen Fehler zu beheben.

1.3 Bei den Programmergebnissen

- Es müssen Orthophotos nach einem vorgegebenen Blattschnitt oder entsprechend einem angegebenen Bereich herstellbar sein.
- Das Programm muß die Steuerdaten für die Orthophotoherstellung von Doppelmodellen, die als zwei Einzelmodelle registriert wurden, berechnen können.
- Die Möglichkeit einer Orthophotoherstellung aus Wiederholungsflügen ohne neuerliche Geländehöhenauswertung muß gegeben sein.
- Die Bearbeitung allgemein angeordneter Meßbilder, d.h. nicht nur genäherte Senkrechtaufnahmen, soll möglich sein.

1.4 Bei der Rechenanlage

- Die Programmierung hat in der völlig maschinenunabhängigen Programmiersprache FORTRAN IV entsprechend der ASA-Norm zu erfolgen.
- Die Standardversion des Programms muß an einem mittelgroßen Rechner mit einem Kernspeicher von etwa 128 K bytes einer Magnetband- und einer Magnetplattenstation installierbar sein.
- Im Bedarfsfall soll für kleinere Rechenanlagen der Kernspeicherbedarf des Programms reduzierbar sein, ohne daß sich dadurch eine überproportionale Änderung in den Rechenzeiten ergibt.

2. DATENERFASSUNG

Mit den nachfolgenden Ausführungen wird zu beweisen versucht, daß die unter 1.1 angegebenen Forderungen tatsächlich realisiert werden konnten. Es war klar, daß die für die Orthophotoherstellung nötigen Geländehöheninformationen primär in einem photogrammetrischen Analogauswertegerät mit entsprechendem Registriergerät (z.B. Wild EK 22, Zeiss Ecomat 11) gewonnen werden sollten. Aber auch die Digitalisierung von Höhenlinien vorhandener Pläne und Karten mit einem von Hand aus gesteuerten Digitizer oder einem automatisch arbeitenden Liniennachfahrgerät kann die entsprechenden Höheninformationen liefern. Diese Geräte /14/ müssen dann aber Einrichtungen wie Punktnummerntastatur, Vertauschbarkeit der Koordinatenrichtungen usw. besitzen, wie sie bei den photogrammetrischen Koordinatenregistriergeräten vorhanden sind. Als Datenträger für die Registrierung wird bei beiden Möglichkeiten eine Magnetbandstation benötigt.

Der Operateur hat vor Beginn der Auswertung einige Steuerdaten über das Registriergerät einzugeben und danach Massenpunkte und im Bedarfsfall noch markante Höhenpunkte zu digitalisieren. Selbstverständlich kann es nicht Aufgabe dieser Arbeit sein, eine detaillierte Meßanleitung zu geben. Zur Illustration, daß das Programm für den Operateur an einem Auswertegerät oder einem Digitizer neben dem Abfahren von Profilen oder Höhenlinien wirklich nur ein Mindestmaß an zusätzlichem Registrieraufwand verlangt, ist im folgenden die Eingabe der Steuerdaten im Detail angeführt:

- Modellnummer.
- Modellmaßstabszahl in der die Lage- bzw. Höhenkoordinaten registriert werden.
- Angabe der Einheiten der letzten registrierten Koordinatenstelle der Lage- bzw. Höhenwerte.
- Minimale und maximale Flughöhe über Grund falls sie bekannt sind. Andernfalls sind dafür die Werte Null zu registrieren.
- Paßpunktnummer und die entsprechenden Modellkoordinaten, falls diese für eine absolute Orientierung (Fall 1 und 3) bzw. eine rechnerische Bestimmung des Projektionszentrums (Fall 2 und 4) notwendig sind. Was unter den Fällen 1 bis 4 zu verstehen ist, wird im nächsten Abschnitt (2.1) angegeben.

2.1 Möglichkeiten der Datenerfassung der Geländehöhenpunkte

Vom Programm können die nachfolgenden vier Fälle der Registrierung von Geländehöhenpunkten bearbeitet werden.

Fall 1

In einem absolut orientierten Modell werden mit einem photogrammetrischen Analogauswertegerät Höhenlinien oder ein beliebiges, regelmäßiges oder unregelmäßiges Punktraster im Landeskoordinatensystem (Meter- oder Fußeinheiten) abgefahren und auf Magnetband registriert.

Die Datenerfassung entsprechend dem vorliegenden Fall 1 kann auch durch das Digitalisieren von vorhandenen Strichauswertungen im Landeskoordinatensystem mit einem Digitizer erfolgen. Das Orthophotokoordinatensystem ist mit dem Landeskoordinatensystem identisch.

Fall 2

Das Datenerfassungsgerät verfügt in diesem Fall nur über Einrichtungen, die eine Registrierung der Maschinenkoordinaten erlauben. Da im Gegensatz zum folgenden Fall 3 keine rechnerische absolute Orientierung im Programm vorgesehen ist (siehe 3.1), muß das Modell im Auswertegerät exakt absolut orientiert werden. Die Erfassung der Geländehöhen kann - wie im Fall 1 - in verschiedener Weise erfolgen. Sofern das Datenerfassungsgerät mit einer Profiliereinrichtung (z.B. Wild PEB 8) ausgestattet ist, wird man jedoch das Modell vorzugsweise in Profilen abfahren. Die Begrenzungslinien des Orthophotos sind im Maschinenkoordinatensystem zu definieren.

Fall 3

Zum Unterschied zu Fall 1 und 2 kann hier die Datenerfassung im relativ oder absolut orientierten Modell erfolgen. Im relativ orientierten Modell registriert man Profile (z.B. Wild PEB 8, Meßeinrichtung DTM von Zeiss) und/oder ein unregelmäßiges Punktraster und/oder Formlinien. Das absolut orientierte Modell wird vorzugsweise in Höhenlinien abgefahren, wobei die Lagekoordinaten im Maschinensystem und die Höhenwerte entweder im Maschinen- oder im Landeskoordinatensystem registriert werden können. Die Registrierung der Höhen im Landessystem kommt dem Vorgang der absoluten Orientierung und der konventionellen

Höhenlinienauswertung in vielen Analogauswertegeräten (z.B. Wild A 7) sehr entgegen. Die Begrenzungen des Orthophotos werden im Landeskoordinatensystem definiert.

Fall 4

In Anlehnung an den von P. Stewardson /16/ beschriebenen Online-Betrieb, wird im Fall 4 das absolut orientierte Modell in parallelen Profilen abgefahren und gleichzeitig die Maschinenkoordinaten registriert. Dazu muß der im Auswertegerät gewählte Profilabstand bis auf ein bekanntes Maßstabsverhältnis zwischen Modell und Orthophoto im Avioplan abfahrbar sein. Diese Variante der Datenerfassung erlaubt mit sehr geringem Rechenaufwand (siehe Tabelle 1) die Steuerbefehle für das Orthophoto, das im Maschinenkoordinatensystem zu begrenzen ist, abzuleiten.

Die Datenerfassung für Orthophotos von Einzelmodellen ist nach allen 4 angegebenen Fällen möglich. Doppelmodelle hingegen können nur über die nach Fall 1 oder 3 erfaßten Daten vom Programm abgeleitet werden. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, daß nur bei diesen beiden Möglichkeiten beide Orthophotos in einem gemeinsamen Koordinatensystem (z.B. Landeskoordinatensystem) entstehen.

2.2 Korrekturmöglichkeiten bei der Datenerfassung von Massenpunkten

Im Zuge des Abfahrens und Digitalisierens von Schichtenlinien oder Profilen kann der Operateur feststellen, daß entweder die Meßmarke nicht mehr am Gelände aufsitzt oder die Linie falsch nachgefahren wurde. Daher stehen falsche Werte auf dem Magnetband. Durch die Eingabe einer Kenngröße und neuerlichem Abfahren der falschen Linie oder des falschen Profils wird erreicht, daß das Programm die zuerst erfaßten Werte negiert.

3. PROGRAMMAUFBAU UND DETAILPROBLEME DES RECHENPROGRAMMS

Das Programm SORA-OP zerfällt in zwei Programmteile:

Im Teil 1 wird aus den auf einem Magnetband vorliegenden Ausgangsinformationen und einigen über Lochkarten eingegebenen Größen ein digitales Höhenmodell (DHM) erstellt. Unter einem DHM werden die Höhenwerte für ein

rechteckiges oder quadratisches Grundrißraaster verstanden.

Im Teil 2 wird dieses DHM in Bildkoordinaten jenes Meßbildes umgerechnet, von dem das Orthophoto erstellt werden soll. Danach werden diese Werte auf ein Magnetband ausgegeben, das zur Steuerung des Avioplans dient.

In den Flußdiagrammen (Abb.1 und 4) sind die wesentlichen Programmschritte angegeben. An Hand dieser Abbildungen werden in den Abschnitten 3.1 und 3.2 die beiden Programmteile erläutert.

3.1 Programmteil 1

Neben den Werten der Datenkarten, d.s. Modellnummern, Orthophotomaßstab, Orthophotobegrenzungen, Rasterintervall des DHM im Rechts- und Hochrichtung und, falls notwendig, Paßpunktskoordinaten, wird vom Magnetband der Steuerdatenblock eingelesen.

Da es in der Folge unwirtschaftlich oder manchmal auch unmöglich wäre bis zu 100 000 registrierte Geländepunkte eines Modells gleichzeitig im Kern der Rechenanlage zu haben und damit zu operieren, ist es notwendig, das Orthophoto in Subblöcke und diese wiederum in Recheneinheiten zu unterteilen.

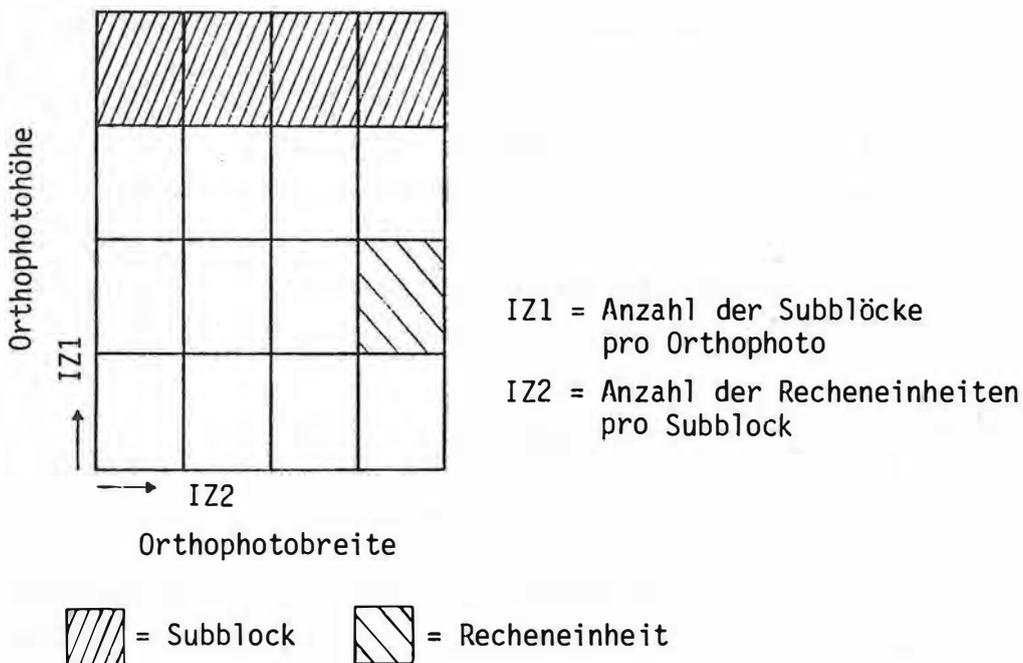


Abb. 2: Einteilung eines Orthophotos in Subblöcke und Recheneinheiten

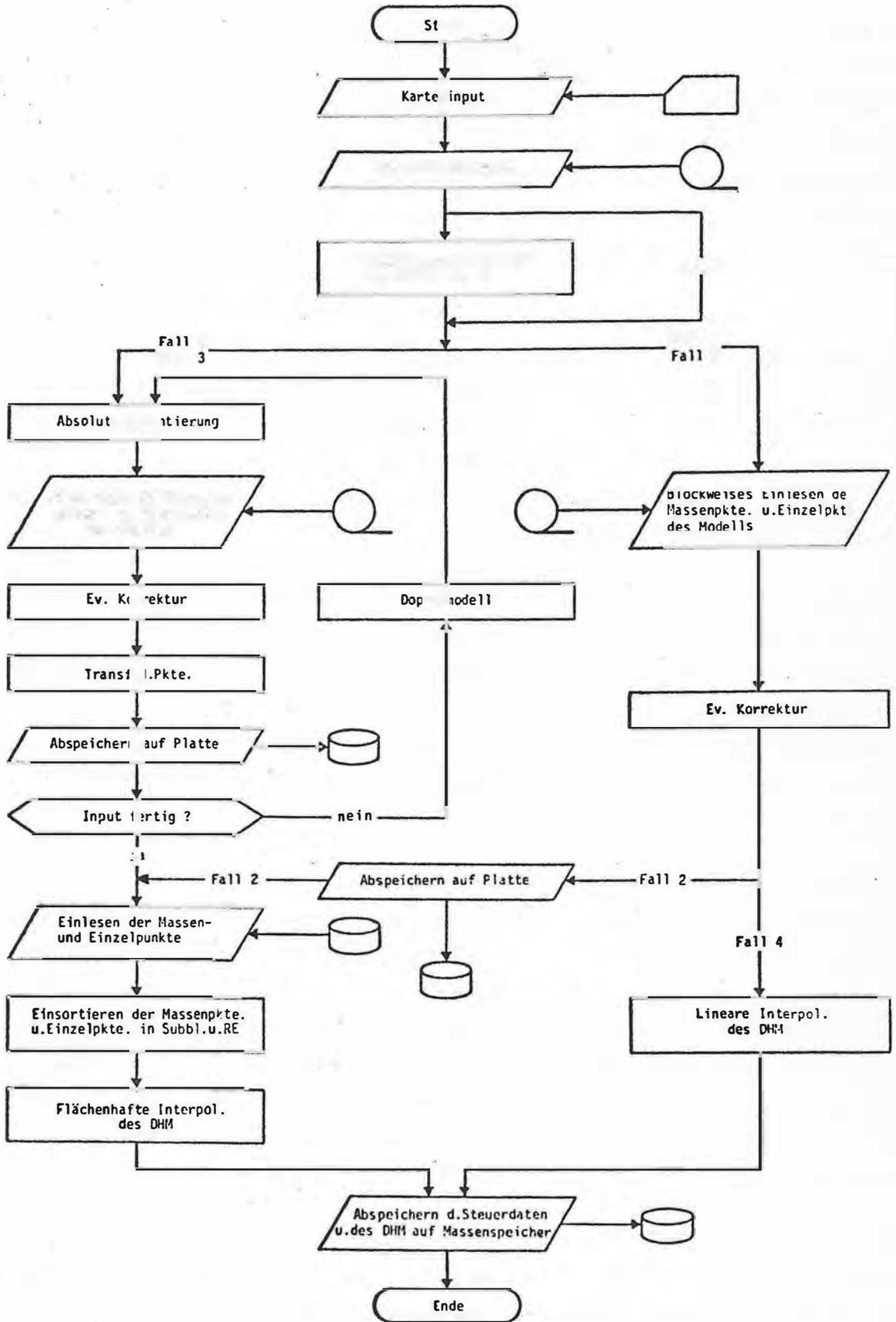


Abb.1: Ablaufdiagramm des Programtteiles 1 von SORA-OP

Über die Datenkarten kann die Anzahl der Subblöcke (IZ1) und die der Recheneinheiten (IZ2) eingegeben werden. Will man diese Festlegung jedoch der Rechenanlage überlassen, so leitet diese, aus dem - mit Lochkarten eingegebenen - Format des Orthophotos und aus der Zahl der registrierten Geländepunkte Werte für IZ1 und IZ2 ab. Für den Fall 4 (2.1) ist eine Einteilung in Recheneinheiten nicht notwendig. Die Begründung dafür wird bei der Erläuterung des Interpolationsvorganges des DHM gegeben.

Für die Fälle 1 und 3 wird nun immer versucht, eine räumliche absolute Orientierung zu rechnen. Dieses nicht lineare Problem wird iterativ durch einen Wechsel von Lage- und Höhenausgleichungen gelöst. Die Sollwerte der Paßpunkte können Voll-, Lage- oder Höhenpunkte sein. Als Abbruchkriterium für die Beendigung des Orientierungsvorganges dienen Absolutwerte der Änderungen bei den Transformationsparametern zwischen zwei aufeinanderfolgenden Lage- bzw. Höheniterationen.

Wie K.Kraus /8/ für die ebene Ähnlichkeitstransformationen gezeigt hat, sind die Werte der Restfehler in den Paßpunkten nach der Ausgleichung kein hinreichendes Kriterium zur Lokalisierung grober Datenfehler. Daher werden in diesem Programm, nach Abschluß des Iterationsvorganges oder bei Programmabbruch die in /8/ angegebenen K-Faktoren ausgegeben, wobei die Berechnung dieser Indikatoren auch auf die Höhenausgleichung ausgedehnt wurde.

Der nächste Programmschritt wird von jedem Fall durchlaufen. Dabei werden die Massen- und Einzelpunkte von dem Inputband blockweise eingelesen und eventuell falsch registrierte Punkte eliminiert. In den Fällen, in denen Transformationsparameter bestimmt wurden, folgt eine Transformation der als richtig erkannten Punkte. Anschließend werden immer die transformierten bzw. ursprünglichen Werte auf Platte ausgegeben. Wird ein Doppelmodell bearbeitet, so sind die zuletzt angegebenen Programmteile für das zweite Einzelmodell, dessen Daten nicht unmittelbar hinter denen des ersten Modells auf dem Inputband stehen müssen, nochmals durchzuführen.

Zur Erstellung des DHM ist eine Interpolation von Höhenwerten für bestimmte Grundrißkoordinaten notwendig. Wie aus der Abbildung 1 zu entnehmen ist, werden vom Programm nach zwei verschiedene Verfahren die Höhen in den Rasterpunkten interpoliert:

- a) linear in den profilweise erfaßten Daten des Falles 4
- b) flächenhaft mit den in Recheneinheiten abgelegten Punkten der Fälle 1, 2 und 3.

Während die für den Fall 4 angegebene Vorgangsweise keinerlei weiterer Vorarbeiten und Erläuterungen bedarf, wird jener Programmzweig, der von den Fällen 1, 2 und 3 durchlaufen wird, kurz behandelt. Nachdem die Anzahl der Subblöcke und die der Recheneinheiten pro Subblock bekannt ist, liegen auch die Koordinatenbegrenzungen dieser Unterteilungen des Orthophotos vor. Damit können die Geländepunkte zunächst in die einzelnen Subblöcke und danach in die Recheneinheiten eingeteilt werden. In der derzeitigen Programmversion werden sehr große Recheneinheiten gebildet, sodaß bis 1 000 Geländepunkte in die Bruttoeinheit eingeordnet werden können. Das Programm verwendet eine Indexsortieroutine, um die Punkte innerhalb der Recheneinheiten nach aufsteigendem Rechts- und Hochwert zu sortieren. Für die Bestimmung der Grundrißkoordinaten des DHM ist neben den Begrenzungen, die sich aus dem eingegebenen Format des zu erstellenden Orthophotos ableiten lassen, der Rasterabstand in Rechts- und Hochrichtung festzulegen. Dabei ist der Abstand der DHM-Profile in Rechtsrichtung von der Breite der Schlitze /16/ abhängig, die im Avioplan für die Orthophotoherstellung Verwendung finden soll, und muß deshalb, wie schon oben angeführt wurde, eingegeben werden. In Hochrichtung wird, falls kein anderer Wert eingelesen wurde, derselbe Betrag angenommen, wodurch im Normalfall ein quadratisches Grundrißraster des DHM berechnet wird. Mit diesen vorbereitenden Programmschritten sind die Grundrißkoordinaten des DHM gegeben, womit die für die Interpolation jedes Rasterpunktes nächstgelegenen Geländepunkte in beiden Koordinatenrichtungen angegeben werden können. Durch den Vergleich von Grundrißkoordinatendifferenzen zwischen dem jeweiligen Rasterpunkt und seinen nächstgelegenen Geländepunkten werden pro Rasterpunkt 4 Sektoren bestimmt. Für die Interpolation kann die Punktzahl pro Sektor vorgegeben werden. Durch diesen Algorithmus ist gewährleistet, daß die zum Rasterpunkt jeweils n nächsten Punkte pro Sektor verwendet werden (siehe Abb.3).

Mit den Auswirkungen verschiedener Interpolationsverfahren für die Erstellung eines DHM hat sich Leberl /12/ beschäftigt. Dabei fand er, daß mathematisch einfachere Methoden durchaus zufriedenstellende Ergebnisse liefern und andererseits den großen Vorteil des geringen Rechenaufwandes gegenüber mathematisch aufwendigeren Verfahren haben. Bedenkt man, daß

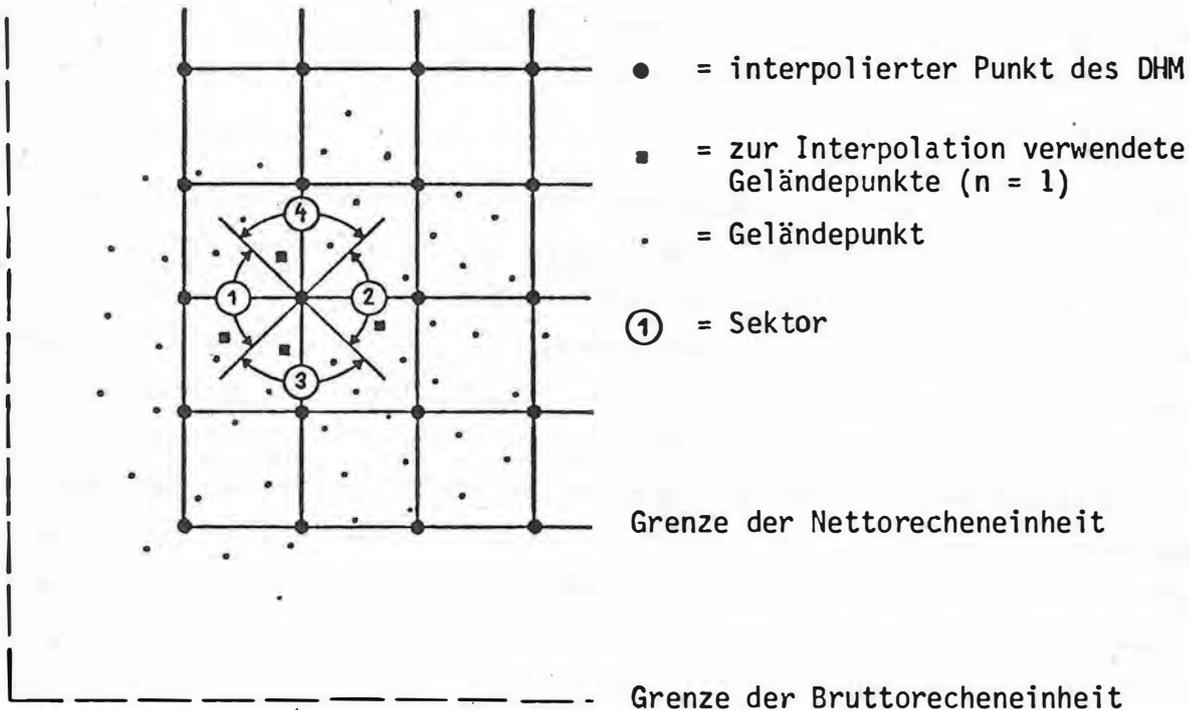


Abb. 3: Auswahl der für die Interpolation verwendeten Punkte

die Höhenwerte des DHM nur so genau sein müssen, daß die vorhandenen Höhenfehler keine, in dem Endprodukt Orthophoto sichtbaren Lagefehler verursachen und berücksichtigt man die oben skizzierte Punkteauswahl nach Sektoren, so erscheint die derzeit im Programm SORA-OP realisierte Interpolationsmethode des allgemeinen arithmetischen Mittels mit dem Gewicht $1/s^2$ als der Problemstellung entsprechend. Sollte sich aber in Zukunft herausstellen, daß doch ein aufwendigerer Interpolationsalgorithmus notwendig ist, so kann dies durch das Auswechseln eines einzigen Unterprogramms erreicht werden.

Als letzter Schritt des Programmteiles 1 müssen einige, für den Programmteil 2 benötigte Steuerdaten, und die Werte des DHM auf Massenspeicher abgelegt werden.

Bei der Bearbeitung eines Orthophotos kann sich herausstellen, daß der Steuerdatenblock fehlerhaft registriert wurde, oder es zeigt sich, daß die Berechnung nach einem anderen Fall der Datenerfassung (2.1) notwendig ist. Durch das Einlesen von zusätzlichen Lochkarten ist es - ohne aufwendige Bandmanipulationen - möglich, Werte des Steuerdatenblocks für den jeweiligen Programmablauf zu ändern, zu eliminieren oder gegebenenfalls fehlende Daten einzufügen.

In der derzeitigen Version benötigt der Programmteil 1 bei IBM-Anlagen 110 K bytes (à 8 bit), bei CDC-Rechnern 32 K Worte Kernspeicher.

3.2 Programmteil 2

Über die Datenkarten müssen die Elemente oder zumindest Näherungswerte der Inneren Orientierung des Meßbildes und die Bildkoordinaten wenigstens dreier Punkte eingegeben werden. Sind die Parameter der äußeren Orientierung bekannt, so werden sie über Lochkarten eingelesen. Ist der Orthophotoherstellung eine Blockausgleichung für die Paßpunktbestimmung vorgegangen, so sind auch die mittleren Fehler der oben erwähnten Größen bekannt und können ebenfalls mit Karten eingegeben werden. Nach Eingabe dieser, für den zweiten Programmteil notwendigen Daten, liest das Programm die auf Massenspeicher stehenden Steuerdaten, die dort im Programmteil 1 abgelegt worden sind.

Falls die Elemente der äußeren Orientierung nicht eingelesen wurden, so werden sie vom Programm bestimmt. Dazu müssen für die Berechnung des Projektionszentrums mittels räumlichen Rückwärtsschnittes die Koordinaten von vier identen Punkten im Bild- und Gelände- (Fall 1 und 3) bzw. Modellkoordinatensystem (Fall 2 und 4) vorgegeben sein. Für die Bestimmung der Drehmatrix genügen drei dieser Punktepaare.

Von den vielen Möglichkeiten zur Lösung des räumlichen Rückwärtsschnittes /17/ wurde die von K. Killian /7/ ausgewählt. Der Grund für die Verwendung dieses eleganten Verfahrens lag darin, daß damit auch bei beliebiger Aufnahmeanordnung sofort ein eindeutiges Ergebnis angebar ist.

Für die Bestimmung der orthogonalen Drehmatrix wurde ein Verfahren programmiert, das H. Kager abgeleitet hat.

Ist wenigstens ein Punktepaar vorhanden, dessen Bild- und Geländekoordinaten gegeben sind, so können, nachdem alle dazu notwendigen Größen vorhanden sind, mit den bekannten Projektionsgleichungen die Geländewerte ins Bild transformiert werden. Ist die Abweichung zu den gemessenen Werten $\leq 0,2$ mm im Orthophoto, so werden alle Rasterpunkte des DHM in Koordinaten des Meßbildes umgerechnet. Wenn hingegen in zumindest einem Punkt der Fehlervektor größer als der oben angegebene Wert ist, so versucht das

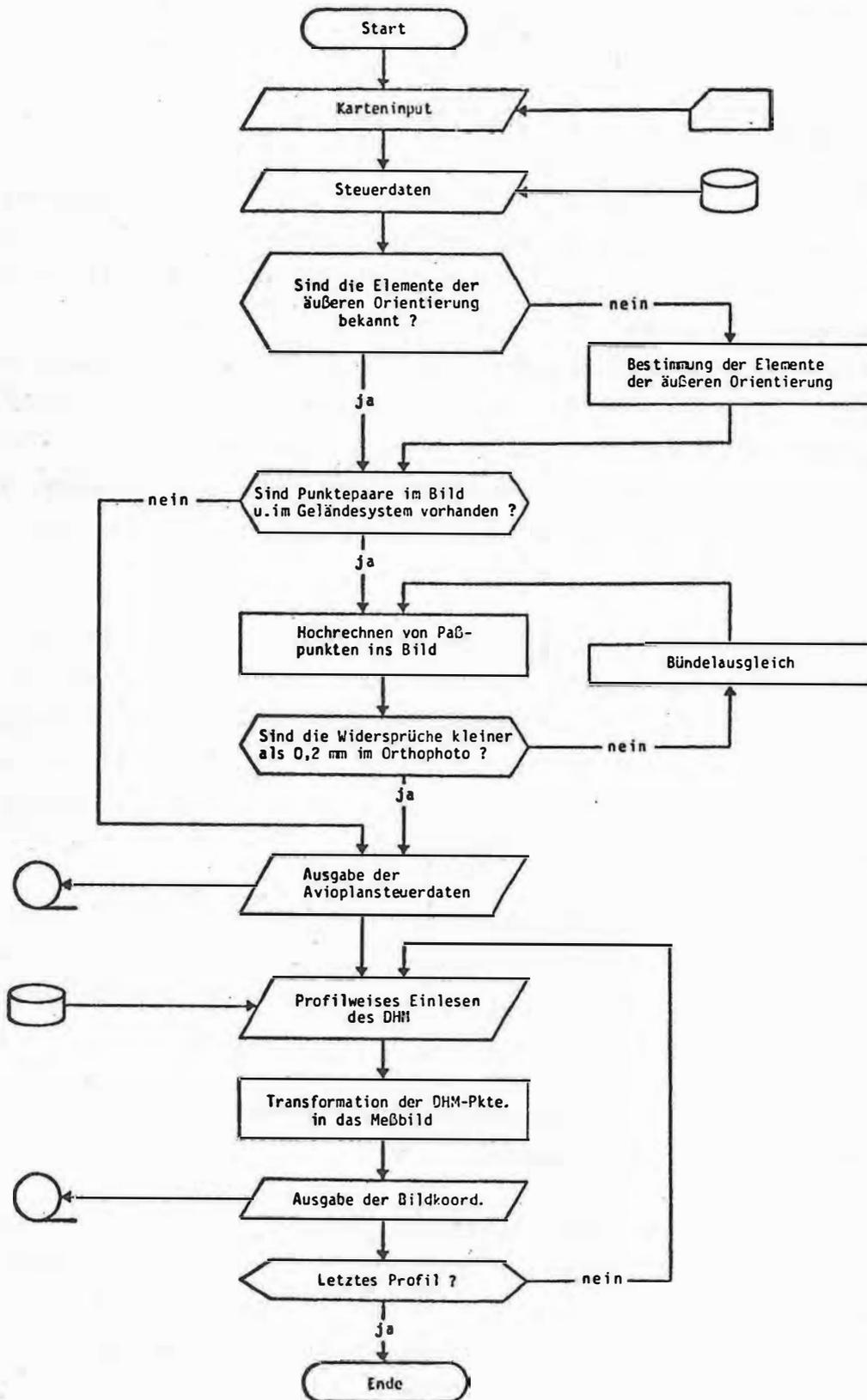


Abb.4: Ablaufdiagramm des Programmteiles 2 von SORA-OP

Programm einen Bündelausgleich /6/ durchzuführen. Dabei werden die Koeffizienten der Verbesserungsgleichungen bei jeder Iteration neu bestimmt, wodurch das Verfahren sehr rasch konvergiert.

Im letzten Programmschritt wird das Steuerband für die Orthophotoherstellung im Avioplan beschrieben. Der 1.Block dieses Bandes beinhaltet Steuerdaten für die Orientierung der Orthophotovorlage im Avioplan und den Betrieb des Gerätes. Daran anschließend werden die DHM-Profile ins Bild hochgerechnet und zwischen ihnen in Profilrichtung linear interpoliert, um den für die Avioplansteuerung notwendigen Punktabstand zu erhalten. Die Bildkoordinaten dieser Punkte werden zuletzt blockweise auf das Magnetband geschrieben.

Der Programmteil 2 von SORA-OP benötigt in seiner derzeitigen Version einen Kernspeicher von 85 K bytes (à 8 bit) für IBM-Anlagen oder 21 K Worte für CDC-Rechner.

4. ERGEBNISSE PRAKTISCHER ARBEITEN

4.1 Datenerfassung

Im Juli 1975 konnte die Firma Wild Heerbrugg das erste Orthophoto erzeugen, dessen Steuerdaten mit dem Programm SORA-OP berechnet worden sind. In der Zwischenzeit hat die Programmentwicklung einen Stand erreicht, der eine routinemäßige Bearbeitung von Orthophotosteuerdaten gestattet. Über Erfahrungen und Probleme bei der Datenerfassung der ersten Testoperate an einem Autograph Wild A 7 durch das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen wird in /3/ berichtet, sodaß hier darauf nicht eingegangen werden muß. Es darf aber festgestellt werden, daß aufgetretene Anfangsschwierigkeiten inzwischen überwunden sind. So konnten nach einer persönlichen Unterweisung von etwa zwei Stunden und mit der beigegebenen Meßanleitung die Modelle des Operates Nockgebiet (siehe Tabelle 1) an einem Zeiss-Planimat (Institut für Geodäsie und Fernerkundung, Universität für Bodenkultur in Wien) problemlos vom dortigen Auswerter bearbeitet werden.

4.2 Berechnung

Die Programmentwicklung und die erste Bearbeitung der in der Tabelle 1 angegebenen Operate erfolgte an der Rechenanlage CDC Cyber 74 der Abteilung Digitalrechenanlage des Rechenzentrums der Technischen Universität Wien.

Nr.	Projektname	Gelände- höhenunter- schiede in % der Flug- höhe	mittlerer Bildmaß- stab	Aufnahme- objektiv	Orthophoto- maßstab	Orthophoto- filmformat in mm	Scann- breite im Orthophoto in mm	Modell- nummer	Datener- fassung in Höhenlin./ in Profilen	Datener- fassung für	Anzahl der registrier- ten Punkte	Anzahl der berechneten DMM-Punkte	Rechenzeiten für Programmteil 1 in Sekunden		Rechenkosten in ö.S.	Rechenzeiten für Programmteil 2 in Sekunden		Rechenkosten in ö.S.	Gesamtrechen- kosten in ö.S.
													CP	IO		an der CDC Cyber 74			
													14	15	16	17	18	19	20
1	Waldhofen	7,8	1:29 000	15UAg	1:10 000	520 x 504	8	488/489	in Höhenlin.	Fall 3	62 000	4 290	140	107	1 884.-	31	2	201.-	2 085.-
													241	230	630.-	111	78	390.-	1 020.- 1)
2	Waldhofen	7,8	1:29 000	15UAg	1:10 000	520 x 504	8	488/489	in Höhenlin.	Fall 3	21 000	4 290	49	28	585.-	31	2	201.-	786.-
3	Waldhofen	7,8	1:29 000	15UAg	1:10 000	520 x 264	8	488	in Höhenlin.	Fall 3	32 500	2 278	91	66	1 197.-	16	2	108.-	1 305.-
4	Waldhofen	7,8	1:29 000	15UAg	1:10 000	520 x 264	8	489	in Höhenlin.	Fall 3	29 500	2 278	62	43	801.-	16	2	108.-	909.-
5	Innsbruck 74	10,8	1:18 000	15Ag	1: 5 000	720 x 728	8	210/211	in Profilen	Fall 3	45 400	8 464	108	109	1 539.-	57	3	366.-	1 905.-
													202	195	500.-	199	103	680.-	1 180.- 1)
6	Innsbruck 74	10,8	1:18 000	15Ag	1: 5 000	720 x 352	8	210	in Profilen	Fall 3	23 450	4 140	52	76	852.-	29	3	180.-	1 032.-
7	Innsbruck 74	10,8	1:18 000	15Ag	1: 5 000	720 x 408	8	211	in Profilen	Fall 3	21 950	4 784	85	101	1 410.-	32	3	204.-	1 614.-
8	Innsbruck 74	10,8	1:18 000	15Ag	1: 5 000	720 x 352	8	210	in Profilen	Fall 2	23 450	3 910	52	73	831.-	28	3	177.-	1 008.-
9	Innsbruck 74	10,8	1:18 000	15Ag	1: 5 000	720 x 728	8	210/211	in Profilen	Fall 3	20 850	8 464	55	28	627.-	57	3	366.-	993.-
10	Innsbruck 66	8,9	1:17 000	21At	1: 5 000	520 x 480	8	221	in Profilen	Fall 3	45 400	4 087	80	102	1 350.-	28	3	183.-	1 533.-
11	Innsbruck 66	8,9	1:17 000	21At	1: 5 000	224 x 376	8	213	in Profilen	Fall 3	45 400	1 440	56	87	1 083.-	11	2	84.-	1 167.-
12	Innsbruck 66	8,9	1:17 000	21At	1: 5 000	520 x 304	8	223	in Profilen	Fall 3	45 400	2 613	70	98	1 152.-	18	2	126.-	1 278.-
13	Innsbruck 66	8,9	1:17 000	21At	1: 5 000	224 x 424	8	211	in Profilen	Fall 3	45 400	1 620	58	87	1 098.-	13	2	90.-	1 188.-
14	Innsbruck 60	7,4	1:35 000	11,5Ag	1: 5 000	720 x 728	8	942	in Profilen	Fall 3	45 400	8 464	stehe Flug 1974 (Nr. 5)			53	4	345.-	1 884.-
15	Hohe Wand	17,6	1:14 000	15Ag	1:10 000	295 x 165	5	369	in Höhenlin.	Fall 3	7 800	2 400	23	16	297.-	9	2	63.-	360.-
16	Hohe Wand	17,6	1:14 000	15Ag	1:10 000	290 x 145	5	368	in Höhenlin.	Fall 3	4 200	1 800	21	13	261.-	8	2	60.-	321.-
17	Hohe Wand	17,6	1:14 000	15Ag	1:10 000	290 x 300	5	368/369	in Höhenlin.	Fall 3	12 000	3 660	31	16	363.-	16	2	105.-	468.-
18	Hohe Wand	17,6	1:14 000	15Ag	1:10 000	295 x 165	5	369	in Höhenlin.	Fall 1	7 800	1 326	18	15	246.-	8	1	54.-	300.-
19	Hockgebiet	22,1	1:29 000	15UAg	1:10 000	520 x 464	8	401/402	in Profilen	Fall 3	18 000	3 953	40	24	513.-	20	3	149.-	662.-
20	Hockgebiet	22,1	1:29 000	15UAg	1:10 000	504 x 208	8	401	in Profilen	Fall 3	8 900	1 728	19	11	225.-	14	2	90.-	315.-
21	Hockgebiet	22,1	1:29 000	15UAg	1: 5 000	512 x 400	8	401	in Profilen	Fall 4	8 900	3 315	9	6	216.-	19	2	115.-	331.-
22	Hockgebiet	22,1	1:29 000	15UAg	1:10 000	504 x 208	8	401	in Profilen	Fall 2	8 900	1 728	17	11	207.-	14	2	90.-	297.-
23	Hockgebiet	22,1	1:29 000	15UAg	1:10 000	528 x 208	8	402	in Profilen	Fall 3	9 100	1 809	26	15	315.-	13	2	88.-	403.-

1) diese Werte gelten für die IBM 370/158 des Bundesrechenzentrums in Wien

Tabelle 1
Technische Daten der mit SORA-OP bearbeiteten Operate

Nach der Installation von SORA-OP an dem Großrechner IBM 370/158 des Bundesrechenzentrums in Wien wurden dort 2 Beispiele berechnet. Dabei handelt es sich um Operate, deren Bearbeitung an der Cyber 74 zu einem früheren Zeitpunkt erfolgte. Die bei den Bearbeitungen aufgelaufenen Rechenzeiten und derzeit dafür geltenden Rechenkosten sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

4.3 Orthophotogenauigkeit

Die ersten durchgreifenden Genauigkeitsuntersuchungen hinsichtlich Programm und Avioplan, wurden am Beispiel Hohe Wand (Tabelle 1) durchgeführt. Dazu wurden nach der Datenerfassung für die Orthophotoherstellung 23 Naturpunkte in den beiden Modellen ausgemessen. Nach der Fertigstellung des Orthophotos wurden diese Kontrollpunkte digitalisiert und auf die Lagewerte der Modellauswertung transformiert. Dabei ergab sich ein mittlerer Punktlagefehler von 0,076 mm im Orthophoto oder 54 μ im Bild. Da die Geländehöhenunterschiede in dem Doppelmodell Hohe Wand doch 17,6 % der Flughöhe betragen und sich außerdem am Nordrand des Gebietes eine etwa 200 m hohe Felswand über das halbe Orthophoto erstreckt, geben selbst diese ersten Zahlen einen Eindruck der Güte des Gesamtsystems SORA-OP und Avioplan OR 1. Ein Vergleich dieser Werte mit Ergebnissen ähnlicher Untersuchungen /13/ unterstreicht diese Aussage.

Die Ergebnisse bei der Interpolation des DHM werden sicherlich besser, je mehr Geländepunkte in dem photogrammetrischen Auswertegerät erfaßt wurden. Andererseits erhöhen große Punktmengen die Rechenzeiten und damit die Kosten der Orthophotoherstellung. Für die Praxis ist daher dieses Problem zu optimieren. Entsprechende systematische Untersuchungen sind geplant. Nach den Ausführungen in /5/ würden für die Orthophotoherstellung des Doppelmodells Waidhofen rund 20 600 registrierte Geländepunkte genügen. Wie aus der Tabelle 1 hervorgeht, wurden in diesen Testmodellen etwa 62 000 Punkte registriert. Eine Datenreduktion um 67 % brachte in den beiden Orthophotos keine sichtbaren Unterschiede, senkte aber die Rechenkosten des Programmteiles 1 um etwa 70 %.

4.4 Orthophotozeitreihe

Für die Herstellung von Orthophotozeitreihen ohne neuerliche Geländehöhenerfassung bietet SORA-OP zwei Möglichkeiten:

1. Start mit Programmteil 2
2. Start mit Programmteil 1.

Für die erste der beiden Varianten ist ein gezielter Punktflug Voraussetzung. Es muß dabei gewährleistet sein, daß die neue Orthophotovorlage jenen Geländeteil zur Gänze beinhaltet, von dem früher über den Programmteil 1 ein DHM erstellt wurde. Trifft diese Bedingung zu, so sind für die Orthophotoherstellung nur die Rechenkosten des Programmteiles 2 zu veranschlagen (siehe Tabelle 1).

Handelt es sich bei dem Wiederholungsflug um ein beliebig angeordnetes Bildmaterial, so ist für diesen neuen Bildausschnitt zuerst mit dem Programmteil 1 das zugehörige DHM zu erstellen und anschließend sind über den Programmteil 2 die Avioplansteuerdaten zu berechnen. Dieser mögliche, aber etwas aufwendigere Weg wird nach Fertigstellung des Programmes SORA-DB (siehe 5.3) überflüssig.

Zur Illustration der beiden aufgezeigten Möglichkeiten dient das Beispiel "Orthophotozeitreihe Innsbruck". Die Fluganordnung dieser drei Bildflüge ist in der Abbildung 5 dargestellt. Die dazugehörigen technischen Details sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

Gerade in Gebieten mit reger Bautätigkeit können Orthophotozeitreihen für verschiedene Planungsaufgaben von großer Bedeutung sein. Der dafür gewünschte Orthophotomaßstab sollte keinesfalls kleiner als 1:5 000 sein. Aus Gründen der notwendigen Höhengenaugigkeit schied damit das Bildmaterial 1960 - mittlerer Bildmaßstab 1:35 000 - zur Geländehöhenerfassung aus. Die Datenerfassung erfolgte aus dem Bildmaterial 1974 (Bildmaßstab 1:18 000). Für die photogrammetrische Paßpunktbestimmung wurde mit dem in Wien zur Verfügung stehenden Blockausgleichsprogramm PAT-M43 /1/ das Bildmaterial 1960 und 1974 miteinander verknüpft. Dabei wurden auch für die vier Luftbilder aus dem Jahre 1966 jeweils 4 Paßpunkte bestimmt, sodaß vom Programm SORA-OP das Projektionszentrum und die Drehmatrix jedes Meßbildes bestimmbar war (vgl.3.2).

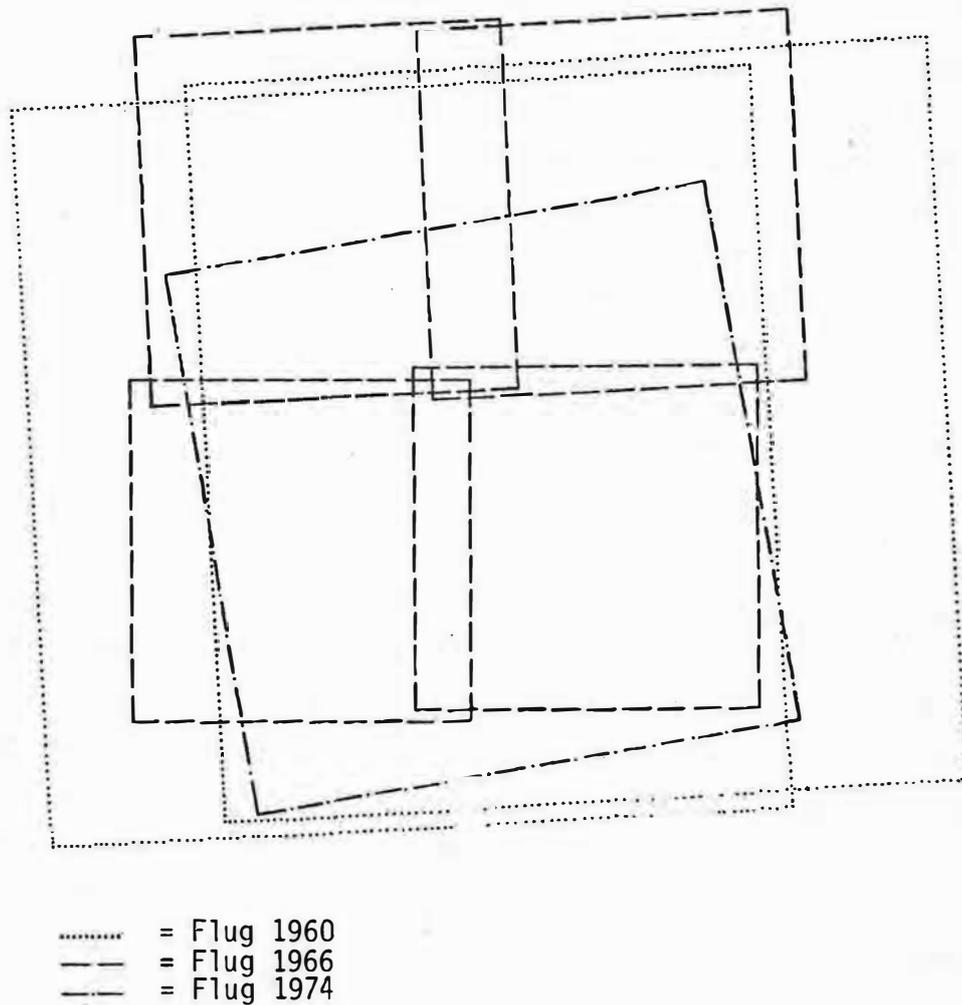


Abb.5: *Fluganordnung der Orthophotozeitreihe Innsbruck*

Ähnlich dem Doppelmodell Waidhofen, wo etwa dreimal so viele Punkte registriert wurden, als nach /5/ für die Orthophotoherstellung notwendig ist, wurden beim Operat Innsbruck mehr als doppelt so viele Punkte erfaßt. Auch hier liegt der Grund dieser hohen Punktdichte in der beabsichtigten Genauigkeitsuntersuchung.

Mit den aus dem Flug 1974 vorhandenen DHM, d.h. Start mit Programmteil 2, wurde das Orthophoto 1960 erstellt. Für die Produktion jedes der 4 Orthophotos des Fluges 1966 mußte dagegen mit den am Analogauswertegerät registrierten Werten aus 1974, d.h. Start mit Programmteil 1, begonnen werden. Die Abbildung auf Seite 47 zeigt zwei Orthophotoausschnitte der Flüge 1966 und 1974.

5. ERWEITERUNGSMÖGLICHKEITEN DES PROGRAMMSYSTEMS SORA

Mögliche Anwendungsgebiete des Avioplans als Differentialumbildegerät im Offline-Betrieb wurden von K.Kraus /10/ angegeben. Neben dem, im vorliegenden Artikel vorgestellten Programm SORA-OP, das voll operationell vorliegt, existieren vorläufige Versionen von

- a) SORA-MS (SORA-Multispectral scans /9/, /15/)
- b) SORA-DS (SORA-Developable surfaces /11/)
- c) SORA-ST (SORA-Stereo-Orthophoto) und
- d) SORA-SCOP (SORA-Stuttgart Contour Programm).

5.1 Programm SORA-ST

Die Grundidee zur Erstellung und Anwendung von Stereo-Orthophotos kommt aus Kanada /4/ und besteht darin, daß die Geländeoberfläche mittels einer schiefen Parallelprojektion auf die Grundrißebene abgebildet wird. Dadurch ergeben sich gegenüber dem Ergebnis einer Orthogonalprojektion Bildversetzungen in Flugrichtung, die proportional dem Geländehöhenunterschied sind. Der prinzipielle Lösungsweg zur Erstellung der Avioplansteuerdaten von Stereo-Orthophotos, der auch in SORA-ST verwirklicht ist, kann aus /10/ entnommen werden.

Bisher sind zu den Doppelmodellen Waidhofen und Hohe Wand (siehe Tabelle 1) die jeweiligen linken und rechten Stereopartner erzeugt worden. Ein Ausschnitt des Orthophotos Waidhofen und seines linken Stereopartners ist die Abb.7. Die beiden Bilder wurden so montiert, daß sie mit einem Spiegelstereoskop räumlich betrachtet werden können.

5.2 Programm SORA-SCOP

Es gibt Rechenprogramme, die für andere Zwecke als die Orthophotoherstellung ein DHM produzieren. Will man von einer Gegend, von der bereits ein solches DHM existiert, ein Orthophoto erstellen, so wäre es wünschenswert, das vorhandene Raster auch für diese neue Aufgabe verwenden zu können.

Mit dem Programm SORA-SCOP wurde eine solche Möglichkeit geschaffen. Aus-

gehend von dem DHM, das bei dem Stuttgarter Höhenlinienprogramm (SCOP) anfällt, wurden diese Werte so umgeformt, daß damit der Programmteil 2 von SORA-OP gerechnet werden kann. Als praktisches Beispiel wurde das Operat WIG gewählt, für das E. Aßmus, mit seiner Bruchlinienversion von SCOP die Schichten aus Profilen berechnet hat. Ein Ausschnitt dieses Orthophotos mit einkopierten Schichten ist in /2/ enthalten.

5.3 Programm SORA-DB (SORA-Datenbank)

In vielen Fällen sollen aus beliebig angeordneten Wiederholungsflügen Orthophotos eines Gebietes erstellt werden, dessen Fläche größer als die eines Doppelmodells ist. Der Gedanke, die bei der Erstauswertung erstellten DHM's zu einer Geländedatenbank zu verknüpfen, liegt auf der Hand. Ist es nämlich gelungen, ein solches Raster über ein Gebiet zu erstellen und dieses so zu organisieren, daß daraus jederzeit beliebige Ausschnitte abgerufen, Profile verdichtet oder anders gerichtete Profile erstellt werden können, so sind die Voraussetzungen geschaffen, daß von jedem Luftbild dieses Gebietes, mit Hilfe des Programmteiles 2 von SORA-OP, die Avioplansteuerdaten berechnet werden können (vgl.4.4).

Die hier skizzierten Gedanken sollen mit dem Programm SORA-DB realisiert werden. Es ist klar, daß diese Programmentwicklung einen erheblichen Entwicklungsaufwand verlangen wird. Ist allerdings dieses System einmal realisiert, bietet es die Möglichkeit in sehr kurzer Zeit und mit geringen Kosten aktuelle Karten zu erstellen.

6. SCHLUSS

In der vorliegenden Arbeit wurden aus dem Programmpaket SORA das Programm SORA-OP vorgestellt und damit, sowie mit SORA-ST erzielte Ergebnisse aufgezeigt. Zusammenfassend wird festgestellt, daß mit dem in etwa 3-Mannjahren entwickelten und nun einsatzfertig vorliegenden Programm SORA-OP eine äußerst wirtschaftliche und anwenderfreundliche Möglichkeit geschaffen wurde, die Steuerdaten für den Offline-Betrieb des Avioplans OR 1 zu berechnen. So belaufen sich bei dem üblichen Verhältnis von 1:3 zwischen Bild- und Orthophotomaßstab und einer für die Aufgabe notwendigen Anzahl von registrierten Geländepunkten, die reinen Rechenkosten für ein

Doppelmodell (Programmteil 1 und 2) auf etwa

ö.S. 800.--.

Handelt es sich um einen gezielten Wiederholungsflug, für den nur der Programmteil 2 zu berechnen ist, so verringert sich der Betrag der Rechenkosten für ein Doppelmodell auf etwa

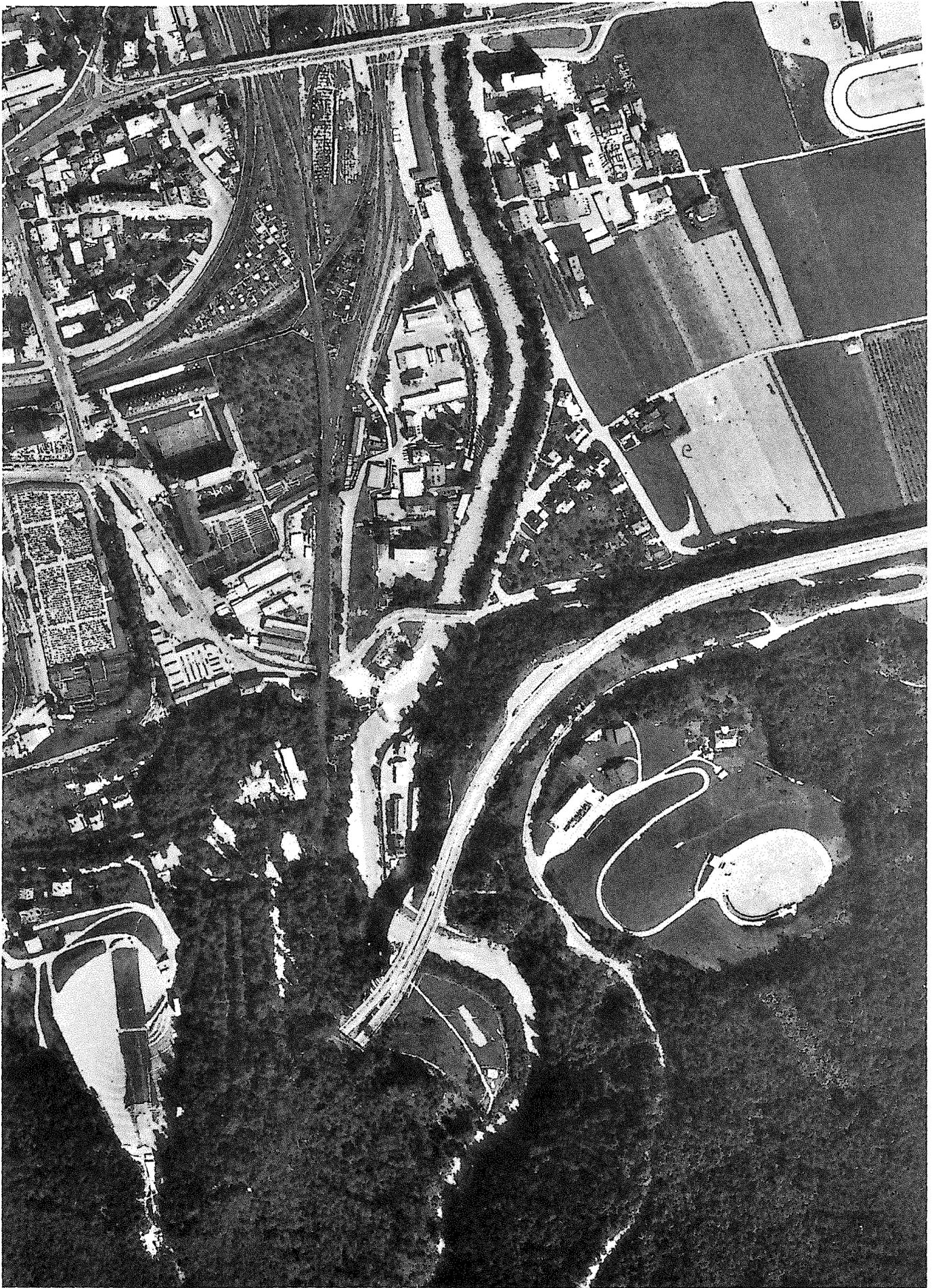
ö.S. 200.--.



Flug 1966

Abbil
Ausschnitte der Orthophoto

Druck: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen



Flug 1974

ng 7

reitreihe Innsbruck 1 : 5000

.gesehen(Landesaufnahme)in Wien



Stereo-Orthophoto

Abt
Beispiel eines Orthophotos und seines zu



Orthophoto

ng 7
rigen Stereopartners (Waidhofen) 1 : 10 000
ngswesen (Landesaufnahme) in Wien

SCHRIFTTUM

- / 1/ ACKERMANN, F., EBNER, H. und KLEIN, H.: Ein Programm-Paket für die Aerotriangulation mit unabhängigen Modellen. BuL, Heft Nr.4, 1970
- / 2/ ASSMUS, E.: Berücksichtigung von Geländekanten im Stuttgarter Höhenlinienprogramm - Theorie und Ergebnisse. Geowissenschaftl. Mitteilungen, TU Wien, Heft Nr.8, 1976, presented paper, XIII. ISP-Kongreß, 1976
- / 3/ BERNHARD, J.: Ein Bericht über erste Erfahrungen mit der Datenerfassung für den Wild Avioplan OR 1 und geplante Arbeitseinsätze am Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen. Erscheint in der ÖZfVuPh, presented paper, XIII. ISP-Kongreß, 1976
- / 4/ COLLINS, S.H.: Stereoscopic Orthophoto Maps. Canadian Surveyor, Vol.22, Nr.1, 1968
- / 5/ FINSTERWALDER, R.: Zur Geländeerfassung durch Schichtenlinien und Profile. BuL, Heft Nr.6, 1970
- / 6/ KAGER, H. und KRAUS, K.: Gemeinsame Ausgleichung photogrammetrischer, geodätischer und fiktiver Beobachtungen. Geowissenschaftl.Mitteilungen, TU Wien, Heft Nr.8, 1976, presented paper, XIII. ISP-Kongreß, 1976
- / 7/ KILLIAN, K.: Über das Rückwärtseinschneiden im Raum. ÖZfV, Heft Nr.4 und 6, 1955
- / 8/ KRAUS, K.: Verschiedene Transformationen und Indikatoren zur Lokalisierung grober Datenfehler. AVN, Heft Nr.1, 1975
- / 9/ KRAUS, K.: Die Entzerrung von Multispektralbildern. BuL, Heft Nr.4, 1976
- /10/ KRAUS, K.: Anwendungsmöglichkeiten eines digital gesteuerten Differentialumbildeggerätes. Geowissenschaftl.Mitteilungen, TU Wien, Heft Nr.8, 1976, presented paper, XIII. ISP-Kongreß, 1976
- /11/ KRAUS, K. und TSCHANNERL, J.: Die photographische Entzerrung abwickelbarer Regelflächen. Geowissenschaftl. Mitteilungen, TU Wien, Heft Nr.8, 1976
- /12/ LEBERL, F.: Photogrammetric Interpolation. Photogrammetric Engineering, Heft Nr.5, 1975
- /13/ OBERMEIER, H.: Höhenlinien als Grundlage der Differentialentzerrung. Dissertation, TU München, 1975
- /14/ OTEPKA, G.: Digitalisierung von photogrammetrisch erhaltenen Daten. ÖZfV, Heft Nr.4, 1973
- /15/ OTEPKA, G.: Praktische Erfahrungen bei der Rektifizierung von MSS-Bildern. Geowissenschaftl.Mitteilungen, TU Wien, Heft Nr.8, 1976, presented paper, XIII. ISP-Kongreß, 1976
- /16/ STEWARDSON, P.B.: The Wild Avioplan OR 1 Orthophoto System. presented paper, XIII. ISP-Kongreß, 1976
- /17/ SZCZEPANSKI, W.: Die Lösungsvorschläge für den räumlichen Rückwärts-einschnitt. DGK, Reihe C, Heft Nr.29, 1958

Geowiss. Mitt.

8, 1976, S. 51 - 63

BERÜCKSICHTIGUNG VON GELÄNDEKANTEN IM STUTTGARTER
HÖHENLINIENPROGRAMM - THEORIE UND ERGEBNISSE

von

E. Aßmus

Adresse des Autors:

Dipl.-Ing.E. Aßmus, Institut für Photogrammetrie der Technischen
Universität Wien, 1040 Wien, Gußhausstraße 27-29, Österreich

ZUSAMMENFASSUNG

Das Stuttgarter Höhenlinienprogramm (SCOP) ist ein für Großrechenanlagen konzipiertes Programmpaket in FORTRAN IV. Aus den Koordinaten beliebig verteilter, insbesondere photogrammetrisch erfaßter Geländepunkte berechnet SCOP zunächst mit Hilfe der linearen Prädiktion die Höhen eines engen rechteckigen Rasters (Digitales Höhenmodell). Daraus werden Punktfolgen entlang der Höhenlinien linear interpoliert und zur Kartierung an einem Zeichenautomaten auf Magnetband ausgegeben.

Für die Bearbeitung von Kartenblättern mit komplizierten geomorphologischen Strukturen wurde eine erweiterte Programmversion (SCOP-B) entwickelt. Dafür wurde die lineare Prädiktion so modifiziert, daß die durch Geländebruchkanten getrennten Punkte nicht miteinander korrelieren. Auf diese Weise kommen die Knicke des Geländes im Höhenlinienbild sehr gut zum Ausdruck. Dieser Aufsatz befaßt sich mit den theoretischen Grundlagen der Programm-erweiterung und der programmtechnischen Realisierung. Anhand einiger mit SCOP-B gerechneten Kartenblättern wird die Absolutgenauigkeit der Höhenlinien untersucht und ihre kartographische Qualität demonstriert. Zusätzlich werden Angaben zur Wirtschaftlichkeit der Methode gemacht.

ABSTRACT

The Stuttgart Contour Program (SCOP) is a program package in FORTRAN IV, conceived for large computers. From the coordinates of terrain points distributed at random, especially if photogrammetrically recorded, SCOP first computes the heights of a narrow rectangular grid (digital height model) by means of linear prediction. From the grid, series of points are linearly interpolated along the contour lines and recorded on magnetic tape for mapping on an automatic plotter.

For the computation of maps with complex geomorphological structures an expanded program version (SCOP-B) was developed. For that purpose linear prediction was modified in such a way as not to permit the points separated by terrain break lines to correlate with one another. In that way the edges of the terrain are clearly indicated. This paper deals with the theoretical foundations of program extension and its technical realisation. With the aid of a number of maps, computed by means of SCOP-B, the absolute accuracy of the contour lines is examined and their cartographic quality demonstrated. Additionally, information is given on the economic efficiency of the method.

1. EINLEITUNG

Noch vor wenigen Jahren hielt man den Einsatz von Digitalrechenanlagen auf dem Gebiet der Kartenherstellung für wenig sinnvoll. Inzwischen werden für viele Detailprobleme der Kartographie mit Erfolg umfangreiche Softwarepakete entwickelt. Besonders die Verarbeitung der Höheninformation eignet sich sehr gut für die Anwendung digitaler Verfahren.

Eines der Rechenprogramme zur Lösung dieser Aufgabe, nämlich die Berechnung von digitalen Höhenmodellen und von Isolinien, ist das am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart (BRD) von Herrn Dipl.-Ing. Stanger entwickelte Stuttgarter Höhenlinienprogramm (SCOP).

Über den Aufbau dieses Programms und über Ergebnisse wurde bereits in mehreren Veröffentlichungen und Vorträgen berichtet /8, 9, 10/.

Am Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität Wien ist derzeit eine erweiterte Version von SCOP in der Erprobung, die eine mathematisch exakte Behandlung von Geländebruchkanten erlaubt. Dieser Aufsatz beschreibt den Aufbau, die Leistungsfähigkeit und die Einsatzmöglichkeiten dieser Programmerweiterung.

2. DER PROGRAMMAUFBAU VON SCOP

Für ein besseres Verständnis der erweiterten Fassung (SCOP-B) sollen zunächst die wichtigsten Schritte des ursprünglichen Programms (SCOP) kurz skizziert werden:

Ausgangsdaten sind die Koordinaten beliebig verteilter Geländepunkte, die photogrammetrisch oder tachymetrisch gewonnen wurden. Im Falle der photogrammetrischen Datenerfassung in der Form von Profilen können die Profilhöhen zunächst vom Abtastfehler befreit werden /6/. Anschließend werden die Modellkoordinaten ins Landeskoordinatensystem transformiert. Innerhalb eines Kartenblattes werden die Höhen der Eckpunkte eines rechteckigen Rasters (Digitales Höhenmodell = DHM) berechnet, wobei vorher das Kartenblatt in rechteckige Recheneinheiten unterteilt wird. Als Interpolationsmethode wird die lineare Prädiktion (= Interpolation nach kleinsten Quadraten) /5, 1/ verwendet, die gleichzeitig die zufälligen Meßfehler

herausfiltert. Ausgehend vom DHM können eine ganze Reihe von Aufgaben gelöst werden, so z.B. die Berechnung von Isolinien.

Die Isolinienpunkte erhält man in SCOP durch lineare Interpolation zwischen den benachbarten Stützpunkten. Die Isolinien werden samt einiger kartographischer Ergänzungen auf Magnetband ausgegeben. Eine automatische Zeichenanlage verbindet die einzelnen Punkte mit einer Kurve höherer Ordnung.

3. LÖSUNGSWEG DER PROGRAMMERWEITERUNG (SCOP-B)

Das erweiterte Programm ermöglicht das Abknicken des DHM und der Isolinien an den Bruchkanten. Dadurch wird die Darstellung von komplizierten geomorphologischen Details durch das Höhenlinienbild entscheidend verbessert.

Falls Geländekanten auftreten, erwies sich in der Grundversion (SCOP) die vereinfachende Annahme von homogenen Korrelationsverhältnissen innerhalb einer Recheneinheit als zu weitgehend. Die Bruchlinien stellen nämlich statistische "Störungslinien" dar, über die hinweg die Korrelationen stark verringert sind. Dieser Tatsache wird in der erweiterten Programmversion Rechnung getragen, indem die Gebiete auf beiden Seiten einer Geländekante unabhängig voneinander interpoliert werden. Eine Verknüpfung erfolgt nur über die Bruchlinienpunkte, die in beiden benachbarten Teilgebieten als Stützpunkte verwendet werden.

Das DHM besteht in SCOP-B zum einen aus den profilweise abgespeicherten Höhen des rechteckigen Rasters und zusätzlich aber auch aus den Raumkoordinaten der Punkte auf den Bruchlinien.

Diese Bruchlinienpunkte werden bei der Interpolation der Isolinienpunkte zwischen benachbarten Rasterpunkten berücksichtigt. Außerdem werden auch Höhenlinienpunkte auf den Bruchkanten interpoliert. Das Programm sorgt dafür, daß die Höhenlinien in diesen Punkten abknicken.

4. ERGEBNISSE UND EINSATZMÖGLICHKEITEN VON SCOP-B

Aus der Reihe der bereits mit SCOP-B berechneten Kartenblätter werden im folgenden zwei Beispiele herausgegriffen. An ihnen soll die kartographische Qualität der gerechneten Höhenlinien und die Leistungsfähigkeit des automatischen Verfahrens aufgezeigt werden.

A) Kartenblatt Waidhofen, Maßstab 1:10 000:

Photogrammetrische Datenerfassung, und zwar am WILD A 7 mit EK 22 und Magnetband des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen in Wien.

Bildmaßstab 1:29 000, Modellmaßstab 1:15 000.

In 2 Modellen wurden insgesamt 18 800 Stützpunkte in Profilen und entlang von wichtigen linienhaften Geländeformen registriert. Daraus interpolierte SCOP-B 48 200 Rasterpunkte des DHM (Rasterabstand 2,5 mm in der Karte) und 35 500 Höhenlinienpunkte (bei einem Höhenlinienintervall von 10 m).

Ein auf den Maßstab 1:20 000 verkleinerter Ausschnitt (etwa 65 %) des 50 cm x 50 cm großen Kartenblattes ist in Anlage 1 wiedergegeben.

In Anlage 2 sind für einen kleineren Ausschnitt im Originalmaßstab 1:10 000 zu den Schichtlinien (durchgezogene Linien) noch gestrichelt die gemessenen Geländebruchkanten eingezeichnet.

In dieser verhältnismäßig kleinmaßstäbigen Karte haben Bruchlinien die Aufgabe, größere geomorphologische Strukturen, wie Taleinschnitte, Berggrate oder Terrassenformen deutlich hervorzuheben. Auf diese Weise kann der Kartenleser das Höhenlinienbild leicht interpretieren.

Am selben Auswertegerät wurden auch in herkömmlicher Art und Weise Schichtlinien gezeichnet (Anlage 3).

Der Beurteilung der Genauigkeit des automatischen Verfahrens dient in Anlage 4 ein Vergleich zwischen den berechneten und den direkt abgefahrenen Schichtlinien (gestrichelte Linien). Die Abweichungen zwischen den beiden Ergebnissen ist zum Teil auf die Unsicherheit der Auswertung zurückzuführen: Die Höhengenaugkeit auf Grund des Bildmaßstabes beträgt etwa $\pm 1,5$ m. Außerdem treten die bekannten Schwierigkeiten auf, die Meßmarke im bewaldeten Gebiet auf der Geländeoberfläche aufzusetzen (siehe das dazugehörige Orthophoto in der Veröffentlichung /2/).

Einige Kleinformen werden in der automatisch gewonnenen Karte nicht wiedergegeben. Der Grund ist, daß diese Strukturen einerseits wegen des relativ großen Profil- und Punktabstandes (4,5 mm in der Karte) mit den Profilen nicht erfaßt und andererseits in der Form von Bruchlinien nicht

gemessen wurden. Eine diesbezügliche Vergrößerung der Informationsdichte würde das Ergebnis zwar verbessern, allerdings wären dann höhere Auswert- und Rechenkosten in Kauf zu nehmen.

Darüberhinaus ist noch zu bedenken, daß zur Darstellung kleiner geomorphologischer Strukturen nicht nur die Stützpunkte (in der Umgebung der Kleinform) sondern auch das Raster des DHM (im ganzen Kartenblatt) entsprechend zu verdichten wären.

Eine bessere Darstellung der Kleinformen ist weniger notwendig, um die Lagegenauigkeit, sondern eher um die Interpretierbarkeit der Isolinien zu steigern. Die Verbesserung der Interpretierbarkeit kann am wirtschaftlichsten und wirkungsvollsten durch eine geringfügige manuelle Überarbeitung der gravierten Höhenlinien erreicht werden. Als Hilfsmittel für diese Korrekturarbeit eignen sich am besten Stereoorthophotos /4, 7/. Sofern die dafür notwendigen Geräte vorhanden sind, können diese Korrekturen auch an einem interaktiven Bildschirm in Kombination mit einem Datenbanksystem vorgenommen werden. In diesem Fall liegen die korrigierten, endgültigen Schichtlinien nicht nur in analoger, sondern auch in digitaler Form vor.

Im Zusammenhang mit den Kleinformen ist noch das Höhenlinienintervall zu beachten. Kombiniert man z.B. das Höhenlinienbild mit einem Orthophoto, wird beim Kartenblatt "Waidhofen" ein Höhenlinienintervall von 20 m ausreichen. Viele linienhafte Kleinformen kommen dann aber nicht mehr auf mehreren benachbarten Höhengschichten zum Ausdruck. Solche Kleinformen, die nur in einer Schichtlinie auftreten, können nicht mehr in ihrer ursprünglichen Bedeutung erkannt werden und sind deshalb im allgemeinen im Höhenlinienbild zu ignorieren. Die Entscheidung, ob die kartographische Qualität der automatisch gewonnenen Schichtlinien ausreicht, hängt also auch vom Höhenlinienintervall ab.

B) Kartenblatt WIG (Wiener Internationale Gartenschau):

Maßstab 1:2 000.

Ausdehnung der Karte 20 cm x 35 cm. Datenerfassung am Zeiss Planimat mit Ecomat des Institutes für Geodäsie und Fernerkundung der Universität für Bodenkultur, Wien. Bildmaßstab 1:4 000. Gemessen wurden 2 300 Punkte in Profilen (Punktabstand 6 mm in der Karte) und 1 600 Bruchlinienpunkte. Mit SCOP-B wurden daraus 12 500 Rasterpunkte (2,5 mm Rasterintervall) und 7 500 Höhenlinienpunkte (1 m Intervall) interpoliert.

Die Rasterhöhen des DHM dienten darüber hinaus zur Berechnung der Steuerdaten für den Orthoprojektor WILD AVIOPLAN. Für Höhenlinien- und Orthophotoherstellung ist es also nur einmal notwendig, Geländepunkte zu registrieren und ein Raster zu berechnen /7/.

In Anlage 5 sind für einen Ausschnitt des Blattes WIG das Orthophoto, die berechneten Schichtlinien (durchgezogene Linien) und die gemessenen Bruchkanten (gestrichelte Linien) zusammenkopiert.

Dieses Gebiet mit seinen für eine Ausstellung künstlich geschaffenen Geländeformen eignet sich besonders gut zur Demonstration der Wirkungsweise von SCOP-B im großmaßstäbigen Bereich. Für die mathematische Nachbildung eines solchen terrassenförmigen Geländes fällt den in den Böschungskanten, Uferlinien, Fahrbahn- und Wegrändern gemessenen Bruchlinien die entscheidende Rolle zu. Die Profilpunkte haben hier nur die Aufgabe, die meist ebenen Flächen zwischen den Kantenlinien abzustützen.

Die Darstellung der Kunstbauten im automatisch gewonnenen Höhenlinienbild entspricht in einigen Fällen nicht den gewohnten kartographischen Vorstellungen: Zum Beispiel überqueren die Höhenlinien die Straßen nicht genau rechtwinklig zum Straßenrand, sondern so wie es der Messung entspricht und damit häufig auch den wahren Höhenverhältnissen (infolge von Querneigung, Verwindung, Spurrillen usw.). Die Automation liefert also nicht immer das schönste, aber doch ein verhältnismäßig objektives Ergebnis.

C) Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit der automatischen Höhenlinienableitung:

Kartenblatt	WAIDHOFEN 1:10 000		WIG 1:2 000	
	Zeit- aufwand	Kosten (ö.S.)	Zeit- aufwand	Kosten (ö.S.)
a) <u>Automatische Ableitung der Höhenlinien</u>				
Datenerfassung (Orientieren und Digitalisieren)	21 h	16.800.-	5,5 h	4.400.-
Ableiten der Höhenlinien mit SCOP-B	2 900 SS	9.500.-	1 200 SS	4.000.-
Gravur am Zeichenautomat	4 h	3.000.-	1,5 h	1.100.-
Jobvorbereitungen, geringfügige kartographische Überarbeitung	5 h	1.500.-	3 h	900.-
		<u>30.800.-</u>		<u>10.400.-</u>
b) <u>Analogauswertung und kartographische Überarbeitung</u>				
Photogrammetrische Analogauswertung	45 h	27.000.-	10 h ¹⁾	6.000.-
Kartographische Überarbeitung u. Gravur	70 h ¹⁾	21.000.-	10 h ¹⁾	3.000.-
		<u>48.000.-</u>		<u>9.000.-</u>
	1) geschätzte Stundenzahl			

Im Kartenblatt Waidhofen ist die große Dichte der Höhenlinien verantwortlich für die hohen Kosten der photogrammetrischen Analogauswertung und der dazugehörigen kartographischen Überarbeitung. Bei der automatischen Methode ist dagegen die Interpolation des DHM besonders rechenintensiv. Im Verhältnis dazu spielt die Wahl des Höhenlinienintervalls nur noch eine untergeordnete Rolle, abgesehen von den Kosten am Zeichenautomaten.

Geomorphologische Strukturen wird man künftig vor allem in Form von Bruchlinien messen und weniger durch Verringerung der Abstände der im allgemeinen in Profilen angeordneten Stützpunkte zu erfassen versuchen.

Diese Bruchlinien werden allerdings in SCOP-B mit einem komplizierten, rechenaufwendigen Algorithmus behandelt. Aus diesem Grund ist im Beispiel WIG (mit fast gleich vielen Bruchlinien- wie Profilpunkten) der Rechenaufwand relativ hoch und die Gesamtkosten liegen geringfügig über denen einer entsprechenden konventionellen Auswertung.

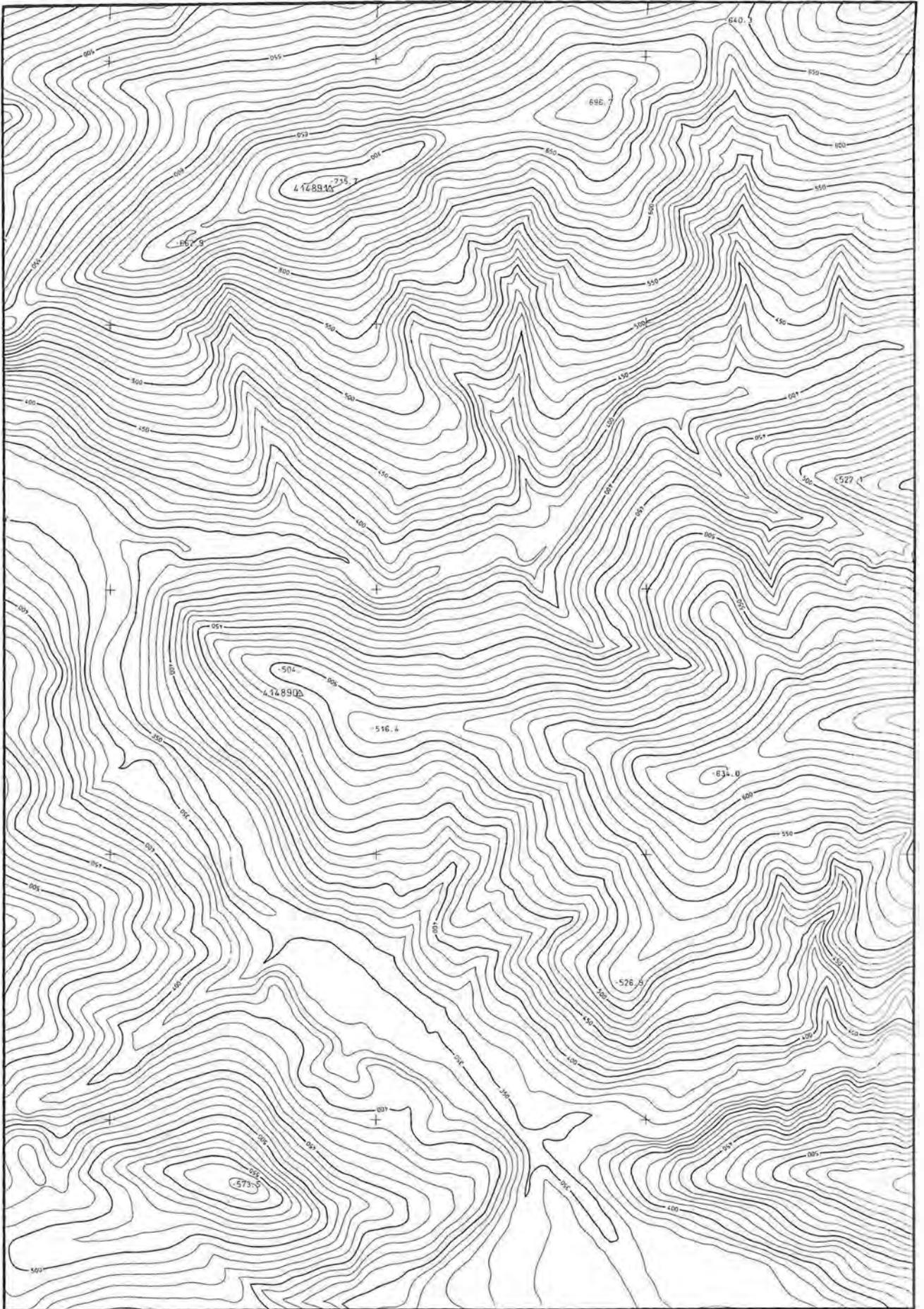
Eine Qualitätssteigerung der automatisch abgeleiteten Höhenlinien, und zwar sowohl mit zusätzlich gemessenen Bruchlinien als auch durch Erhöhung der Dichte der übrigen Geländepunkte, ist mit zusätzlichen Kosten für die Datenerfassung und Rechenzeit (für das DHM) verbunden. Die automatische Methode ist deshalb umso ökonomischer, je weniger Wert auf Detailreichtum gelegt und je kleiner das Höhenlinienintervall gewählt wird. Ist die Darstellung vieler Kleinformen verlangt, wie z.B. in der Hochgebirgskartographie, sollte man bei den herkömmlichen Verfahren bleiben.

Für eine abschließende Beurteilung ist noch zu bedenken, daß das digitale Höhenmodell eine beträchtlich größere Informationsdichte als das aus dem DHM abgeleitete Schichtlinienbild enthält. Diese digitale Karte sollte deshalb am sinnvollsten in einem Datenbanksystem abgelegt werden und dann als Grundlage für alle jene Rechenvorgänge dienen, die Informationen über die Form der Geländeoberfläche benötigen, z.B. für die Berechnung von Geländeprofilen und Erdmassen, von Generalisierungen und Gefällstufenkarten sowie der Steuerdaten für die Orthophotoherstellung usw.. Ebenso ist auch die Kombination der Höheninformation des DHM mit einer Grundrißdatenbank oder anderen Informationssystemen denkbar und teilweise auch bereits realisiert /3/.

Auch für die ausschließliche Schichtlinienproduktion dürfte sich in sehr vielen Fällen der Einsatz des Hilfsmittels Rechenanlage lohnen. Allen althergebrachten Verfahren wird die Automation aber besonders überlegen, wenn man die vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten der digitalen Karte ausschöpft.

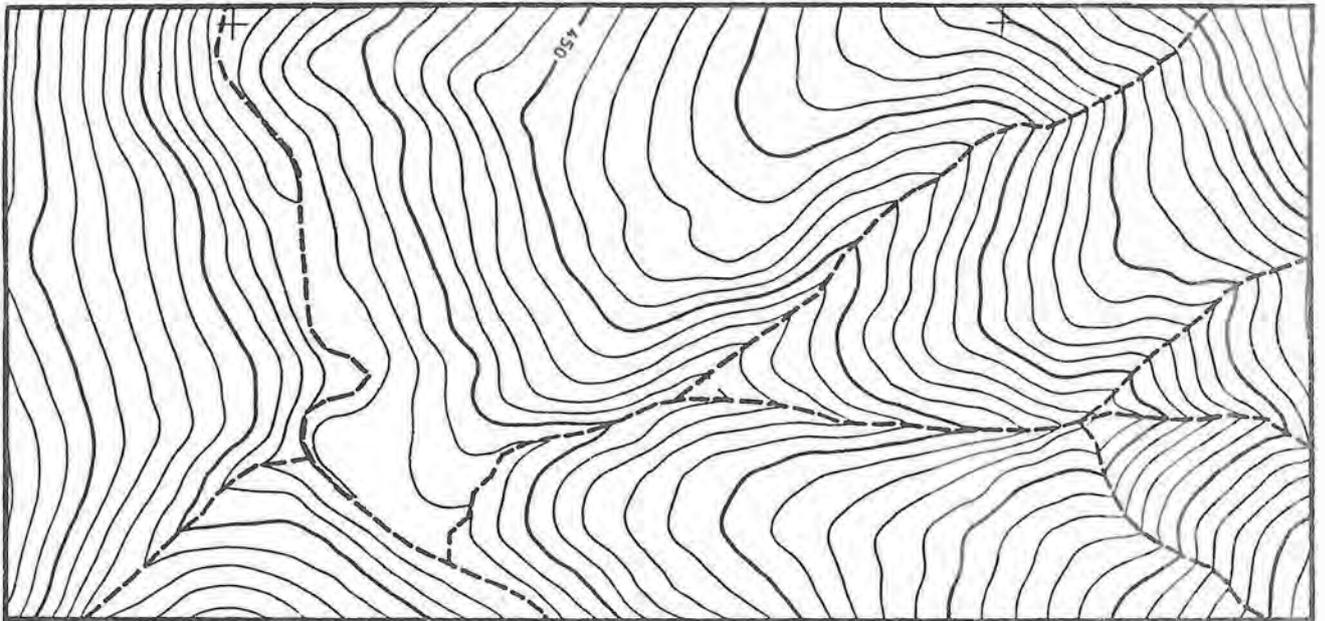
SCHRIFTTUM

- / 1/ ASSMUS, E. und KRAUS, K.: Die Interpolation nach kleinsten Quadraten. Prädiktionswerte simulierter Beispiele und ihre Genauigkeiten.
DGK, Reihe A, Heft Nr.76, München 1974.
- / 2/ BERNHARD, J.: Ein Bericht über erste Erfahrungen mit der Datenerfassung für den Wild Avioplan OR 1 und geplante Arbeitseinsätze am Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen.
Erscheint in der ÖZfVuPh, presented paper, XIII. ISP-Kongreß, 1976.
- / 3/ HEUPEL, G.: Herstellung großmaßstäbiger Karten im System GEOMAP.
35. Photogrammetrische Woche 1975, Stuttgart.
- / 4/ KRAUS, K.: Anwendungsmöglichkeiten eines digital gesteuerten Differentialumbildeggeräts.
Geowissenschaftl. Mitteilungen, TU Wien, Heft Nr.8, 1976, presented paper, XIII. ISP-Kongreß, 1976.
- / 5/ KRAUS, K.: Interpolation nach kleinsten Quadraten in der Photogrammetrie.
BuL 40, S.3-8, 1972.
- / 6/ KRAUS, K.: Prädiktion und Filterung mit zwei verschiedenen Stützwertgruppen.
ZfV 98, S.146-153, 1973.
- / 7/ OTEPKA, G. und LOITSCH, J.: Ein Programm zur digital gesteuerten Orthophotoproduktion.
Geowissenschaftl. Mitteilungen, TU Wien, Heft Nr.8, 1976, presented paper, XIII. ISP-Kongreß, 1976.
- / 8/ STANGER, W.: Das Stuttgarter Höhenlinienprogramm - Beschreibung und Ergebnisse.
Numerische Photogrammetrie, Sammlung Wichmann, Neue Folge, Band 5, S.255-282.
- / 9/ STANGER, W.: Erfahrungen mit dem Stuttgarter Höhenlinienprogramm.
Lehrgang Numerische Photogrammetrie Eßlingen, Januar 1975. Erscheint demnächst in der Zeitschrift des Institutes für Photogrammetrie der Universität Stuttgart.
- /10/ STANGER, W.: The Stuttgart contour program SCOP-further development and review of its application.
Presented paper, XIII. ISP-Kongreß, 1976.

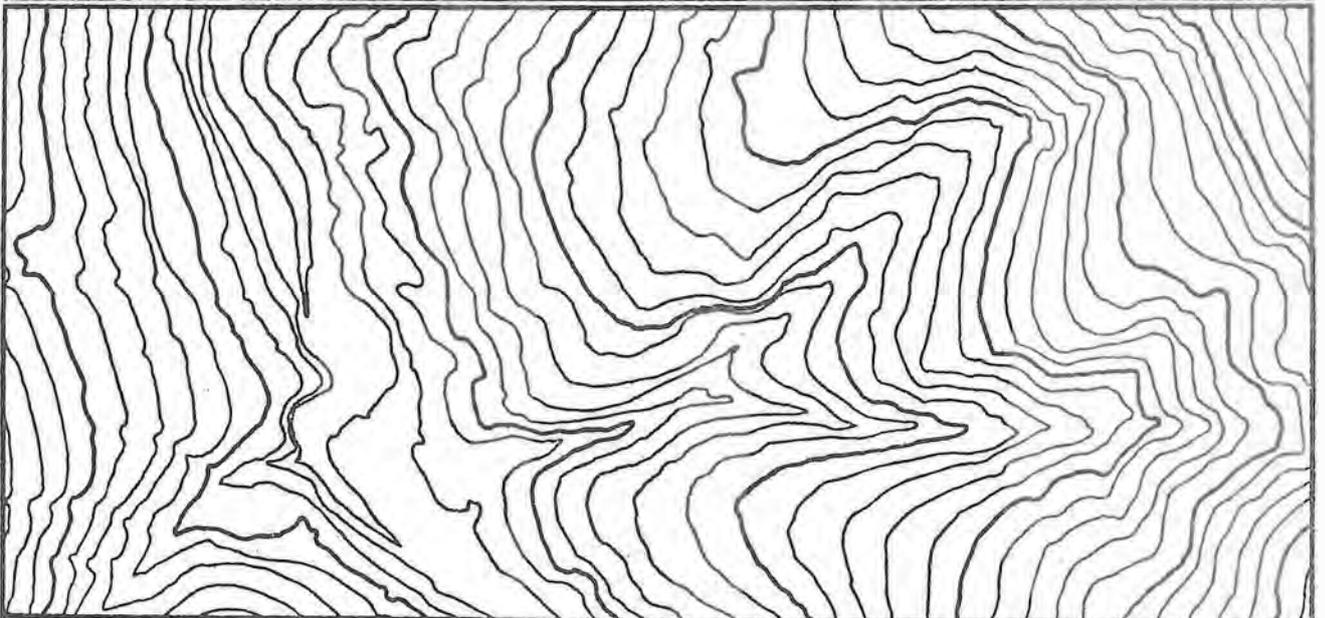


Druck: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (Landesaufnahme) in Wien

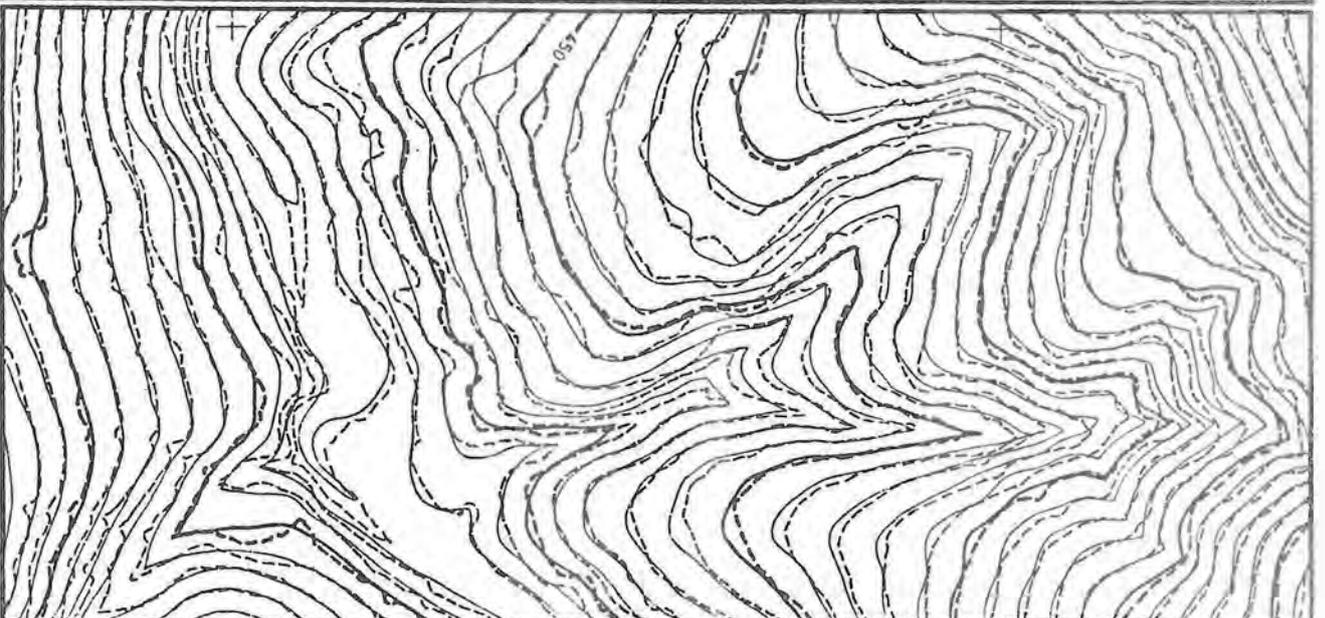
Anlage 1: Auf 1 : 20 000 verkleinerter Ausschnitt der
mit SCOP-B berechneten Höhenlinienkarte
"Waidhofen" 1 : 10 000.



Anlage 2: Berechnete Schichtlinien und gemessene Bruchlinien



Anlage 3: Direkt abgefahrene Schichtlinien



Anlage 4: Vergleich zwischen berechneten und direkt abgefahrenen Schichtlinien



Anlage 5: Ausschnitt des Kartenblattes „WIG“, Maßstab 1:2000

Geowiss. Mitt.

8, 1976, S. 65 - 80

PRAKTISCHE ERFAHRUNG BEI DER REKTIFIKATION
VON MSS-BILDERN

von

G. Otepka

Adresse des Autors:

Dr. G. Otepka, Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität
Wien, 1040 Wien, Gußhausstraße 27-29, Österreich

ZUSAMMENFASSUNG

Die Elemente der äußeren Orientierung jeder Scanzeile eines MSS-Bildes können bisher nicht mit genügender Genauigkeit angegeben werden. Daher scheidet eine Rektifizierung auf der Basis der Abbildungsgesetze zunächst aus. Das von der Firma Wild Heerbrugg vor kurzem auf den Markt gebrachte Differentialumbildegerät Avioplan OR 1 erlaubt - wie K. Kraus in "Bildmessung und Luftbildwesen", 43 (1975), Heft 4, gezeigt hat - eine neuartige Lösung dieser für die praktische Verwendung von MSS-Bildern wichtigen Rektifizierungsaufgabe: Dazu wird im linken Bildträger eines Stereokomparators das zu rektifizierende MSS-Bild und im rechten eine Strichkarte oder ein Orthophoto des jeweiligen Geländeausschnittes eingelegt. An diskreten Punkten können nun die Verzerrungen gemessen und - z.B. mittels linearer Prädiktion - die Werte für ein Referenzgitter interpoliert werden. Die so gewonnenen und auf ein Magnetband übertragenen Werte dienen als Steuerdaten für das digital gesteuerte Differentialumbildegerät Avioplan OR 1.

In dem vorliegenden Aufsatz werden an Hand von Beispielen in den Bildmaßstäben 1:10 000 bis 50 000 inzwischen gesammelte Erfahrungen und Ergebnisse aufgezeigt. Insbesondere werden folgende Punkte angesprochen:

- Anforderungen an das MSS-Bildmaterial sowie an die Rektifizierungsgrundlage,
- Größe der Verzerrungen vor und nach der Rektifizierung,
- Zeitenangabe für die Bearbeitung der Beispiele,
- Anwendungsmöglichkeiten der rektifizierten MSS-Bilder.

An Hand der Ergebnisse sieht man die Probleme und Grenzen der Anwendung des behandelten Verfahrens. Auf der anderen Seite unterstreicht die Arbeit, daß hier eine operationelle, sehr wirtschaftliche und anwendungsfreundliche Methode zur Rektifikation von MSS-Bildern zur Verfügung steht.

ABSTRACT

The elements of outer orientation of the scan lines in a multi-spectral-scan image cannot be determined, at least up to now, with sufficient precision. Rectification based on laws of imagery cannot therefore be applied. The Avioplan OR 1 Orthophoto System recently announced by Wild Heerbrugg Ltd. provides a new solution - as shown by K. Kraus in "Bildmessung und Luftbildwesen" No.43 (1975), Vol 4. With this instrument the rectification which is of such importance for the practical use of MSS-images is now possible.

The original MSS-image is placed in the left picture carrier of a stereo-comparator and a line map or orthophoto of the same terrain (a "rectification master") is placed in the right picture carrier. The distortions can now be measured in a number of discrete points and a rectangular reference grid can be interpolated, for example by linear prediction. The data so obtained are written out on magnetic tape and serve as the input data to drive the Avioplan OR 1.

Experience and results from practical work already performed in scales from 1:10'000 to 1:50'000 are presented. The following points are particularly discussed:

- requirements in the MSS-image and the rectification master;
- magnitude of distortions before and after rectification;
- times for processing the examples;
- applications of rectified MSS-images.

The results show that there are problems and limits of application of the process. On the other hand the work shows that a very economic, practical and operational method of rectification of MSS-images now exists.

1. EINLEITUNG

Für Interpretationsaufgaben greift man immer häufiger auf ein Bildmaterial zurück, das gleichzeitig mit verschiedenen Sensoren erflogen wurde. Andere geowissenschaftliche Probleme wiederum sind dynamischer Natur und verlangen den Vergleich von Aufnahmen, die zu verschiedenen Zeitpunkten erstellt wurden. In beiden Fällen müssen alle beteiligten Bilder auf eine einheitliche geometrische Grundlage gebracht werden /2/.

Obwohl die Abbildungsgesetze der mit einem Linienabtastsystem (Scanner) erstellten Aufnahmen bekannt sind /2/, können bei solchen Multispektralaufnahmen (MSS-Bilder) nicht für alle Bildpunkte die Verzerrungswerte ermittelt werden. Die Ursache dafür liegt darin, daß die Parameter der Flugbahn und somit auch die Elemente der äußeren Orientierung jeder Scanzeile nicht mit genügender Genauigkeit angegeben werden können.

Um dennoch MSS-Bilder rektifizieren und damit für die angegebenen Aufgaben verwenden zu können, hat K. Kraus /5/ einen anderen Lösungsweg dieser Aufgabe vorgeschlagen. Das Grundprinzip dieses Verfahrens besteht darin, daß man im gewünschten Abbild (= das rektifizierte MSS-Bild) ein quadratisches Raster definiert und sich in der Vorlage (= das zu korrigierende MSS-Bild) die dazu korrespondierenden Rasterpunkte sucht /6/. Das Differentialumbildeggerät Avioplan OR 1 der Firma Wild, Heerbrugg, /8/ kann mit Hilfe der Koordinaten dieser allgemeinen Vierecke digital so gesteuert werden, daß auf optischem Weg ein rektifiziertes MSS-Bild entsteht.

Im konkreten Fall ist die Verzerrung für jeden Bildpunkt der Vorlage a priori jedoch nicht angebbar. Um dennoch die Verzerrungseigenschaften des zu rektifizierenden MSS-Bildes angeben zu können, sind Messungen notwendig. Dazu wird im linken Bildträger eines Stereokomparators das MSS-Bild und im rechten eine Strichkarte oder ein Orthophoto des entsprechenden Geländeausschnittes eingelegt. An diskreten Punkten, die möglichst über das gesamte zu bearbeitende Gebiet verteilt sein sollen, werden die vorhandenen Verzerrungen gemessen. Mit Hilfe des Rechenprogrammes SORA-MS (=Software für die Offline-Rektifikation mit dem Avioplan - MSS-Bilder) werden die Verzerrungswerte des quadratischen Referenzgitters der Vorlage interpoliert.

Für diese Aufgabe wurde im Programm SORA-MS die Methode der linearen Prädiktion /4/ verwendet. Die so gewonnenen, entsprechend aufbereiteten und auf ein Magnetband übertragenen Werte dienen als Steuerdaten für die Differential-Umbildung der MSS-Vorlage mit dem Avioplan.

SORA-MS ist ein selbständiges Programm des Programmpaketes SORA, das am Institut für Photogrammetrie der TU Wien entwickelt wird:/6/ und /7/. Das Programm SORA-MS liegt zur Zeit allerdings nur in einer vorläufigen Version vor.

2. ANGABEN ZU DEN BEARBEITETEN BEISPIELEN

Für alle hier angeführten Rektifizierungsarbeiten wurden die MSS-Unterlagen von der Firma Spacetec, Wien, erstellt. Als Abtastsystem kam dabei deren Daedalus Scanner DS 1250 zum Einsatz. Die Umwandlung der Magnetbandaufzeichnungen in photographische Bilder wurde von diesem Ingenieurbüro mit dem Daedalus Reproduktionsgerät DEI 616 durchgeführt. Die Ausmessung der MSS-Bilder erfolgte am Stereokomparator Wild STK-1 des Institutes für Photogrammetrie. Die notwendigen Berechnungen wurden an der CDC Cyber 74 der Abteilung Digitalrechenanlage des Rechenzentrums der Technischen Universität Wien ausgeführt. Die Rektifikation der MSS-Bilder mit dem Avioplan besorgte die Firma Wild Heerbrugg.

Die Daten der bearbeiteten MSS-Flüge sind in der Tabelle 1 angegeben.

Die technischen Daten für die Komparatormessungen und für die Berechnung der einzelnen Beispiele sind in der Tabelle 2 zusammengestellt. Ergänzend dazu sei erwähnt, daß das Programm SORA-MS in seiner derzeitigen Version maximal 280 Stützpunkte bearbeiten kann. Werden mehr Stützwerte eingegeben, so erfolgt eine automatische Reduktion auf 280 (siehe Tabelle 2). Die Koordinatenachsen bei den Messungen wurden so gewählt, daß die X-Richtung ident der Flugrichtung und die Y-Richtung senkrecht dazu verläuft.

Die in der Tabelle 2 angegebenen Werte waren Grundlage für die Rektifizierung von 11 MSS-Vorlagen. Die technischen Angaben dazu sind in der Tabelle 3 zusammengefaßt. Die Abbildungen 1-6 sind Beispiele dieser Arbeiten.

Nr.	Operatsname	Zweck der Befliegung (Auftraggeber)	Flugdatum	Uhrzeit des Fluges	Streifennummer der bearbeiteten MSS-Vorlage	mittlerer Maßstab der MSS-Vorlage	aufgezeichnete Wellenlängenbereiche (Kanäle)	Befliegung durch	eingesetztes Flugzeug
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Marchfeld, N.Ö.	MSS-Fruchtartenunterscheidungsprogramm; Kartierung bewässerter Felder; NÖ Landesregierung	5.8.73	10 h	6	1:44 000	1 - 11	BAfEuV	Pilatus-Turbo-Porter
2	Wien-Favoriten	Anwendungsstudie v. MSS für Stadtplanungsaufgaben; Gemeinde Wien (MA 41)	6.5.75	9 h		1:10 000	4,6,9, 11	BAfEuV	Pilatus-Turbo-Porter
3	Wien-Großfeldsiedlung	Studie f. MSS-Rektifizierung u. MSS-Landnutzungskartierung; Fa. Spacetec	6.5.75	10 h	3	1:25 000	4,6,9, 11	BAfEuV	Pilatus-Turbo-Porter
4	Essen, BRD Nachtflug	MSS-Stadtuntersuchung; Siedlungsverband Ruhrkohlenbezirk	7.8.75	23 h	1022	1:25 000	Dual x) Thermal	Hansa-Luftb.	Aero-Commander
5	Essen, BRD Tagflug	MSS-Stadtuntersuchung; Siedlungsverband Ruhrkohlenbezirk	8.8.75	10 h	1042	1:25 000	1 - 11	Hansa-Luftb.	Aero-Commander

x) IR 1 = 3-5 μ , IR 2 = 8-14 μ

Tabelle 1
Technische Daten der MSS-Flüge

Nr.	Operatsname	Maßstab des rektifizierten MSS-Bildes	Vergrößerungsverhältnis zwischen MSS-Vorlage u. rektifiziertem MSS-Bild	Format d. rektifizierten MSS - Bildes in mm	Wellenlängenbereich d. Rektifizierung	im Avioflan verwendete Schlitzbreite	Nr. in der Sp. 1 der Tab. 2
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Marchfeld, N.Ö.	1:20 000	1:2,2	480 x 254	Kanal 11	8	1
2	Marchfeld, N.Ö.	1:20 000	1:2,2	480 x 254	Kanal 11	8	1
3	Marchfeld, N.Ö.	1:20 000	1:2,2	480 x 254	Kombination a. Kanal 6 u. 8	8	1
4	Marchfeld, N.Ö.	1:20 000	1:2,2	480 x 254	Kanal 11	8	2
5	Wien-Favoriten	1:10 000	1:1	224 x 112	Kanal 11	8	3
6	Wien-Favoriten	1: 5 000	1:2	448 x 224	Kanal 11	8	3
7	Wien-Großfeldsiedlung	1:10 000	1:2,5	544 x 304	Kanal 11	8	4
8	Wien-Großfeldsiedlung	1:20 000	1:1,25	272 x 152	Kanal 11	8	4
9	Essen, BRD Nachtflug	1:10 000	1:2,5	592 x 328	Kanal 11	8	5
10	Essen, BRD Tagflug	1:10 000	1:2,5	592 x 328	Kanal 11	8	5
11	Essen, BRD Tagflug	1:10 000	1:2,5	584 x 336	Kombination a. Kanal 5,6 u.9	8	6

Tabelle 3
Technische Daten zur Umbildung der MSS-Vorlagen mit dem Avioflan

Nr.	Operatsname	Entzerrungs- grundlage	Wellenlängenbereich (Kanal) d.f.d.Messung verwendeten MSS- Vorlage	Anzahl der gemessenen Stützpunkte	Varianz der Rest- klaffungen nach der Helmerttransformation an den Stützpunkte in m in der Natur		verwendete Kovarianzfunktion für die lineare Prädiktion				Anzahl d.wegen grober Meßfehler elimin. Punkte	Varianz der Restklaffungen nach der Interpolation an den Stützpunkte in m in der Natur		Nr. in der Sp. 1 der Tab. 1	Nr. in der Sp. 1 der Tab. 3
					in X	in Y	Scheitelwert in X	C-Wert in X	Scheitelwert in Y	C-Wert in Y		in X	in Y		
					6	7	8	9	10	11		13	14		
1	Marchfeld, N.U.	top.Karte 1:50 000 vergrößert auf 1:44 000	8 - 14 μ (therm. IR) Kanal II	185	$\pm 133,1$	$\pm 153,7$	0,996	0,0320	0,997	0,0250	0	$\pm 15,6$	$\pm 13,1$	1	1,2,3.
2	Marchfeld, N.U.	Katastermappe ver. Maßstäbe, verkl. auf 1:44 000	8 - 14 μ (therm. IR) Kanal II	280	$\pm 120,5$	$\pm 144,5$	0,996	0,0320	0,997	0,0250	6	$\pm 15,2$	$\pm 14,8$	1	4
3	Wien-Favoriten	Stadtkarte 1:10 000	8 - 14 μ (therm. IR) Kanal II	280	$\pm 20,3$	$\pm 16,2$	0,997	0,0303	0,996	0,0283	5	$\pm 2,5$	$\pm 2,9$	2	5,6
4	Wien-Großfeld- siedlung	Stadtkarte 1:10 000 verkl. auf 1:25 000	8 - 14 μ (therm. IR) Kanal II	251	$\pm 56,9$	$\pm 44,3$	0,999	0,0262	0,998	0,0265	2	$\pm 7,2$	$\pm 6,2$	3	7,8
5	Essen, BRD Nachtflug	top.Karte 1:25 000	8 - 14 μ (therm. IR) Kanal II	280	$\pm 67,5$	$\pm 68,9$	0,997	0,0303	0,996	0,0283	0	$\pm 6,6$	$\pm 8,1$	4	9
6	Essen, BRD Tagflug	top.Karte 1:25 000	8 - 14 μ (therm. IR) Kanal II	280	$\pm 43,8$	$\pm 27,5$	0,997	0,0303	0,996	0,0283	0	$\pm 7,1$	$\pm 8,1$	5	10,11

Tabelle 2
Technische Daten der Messungen und Berechnungen

3. PRAKTISCHE ERFAHRUNGEN UND WEITERE ENTWICKLUNGEN

3.1 MSS-Bildmaterial

Bei allen Streifen der Marchfeldebefliegung, die ein Gebiet von etwa 1 400 km² deckt und einen der ersten Scannerflüge in Österreich darstellt, wurden die Grenzen zwischen Gebieten mit verschiedenen Strahlungsintensitäten sägeblattartig abgebildet (siehe Abb.1 und 2). Als Ursache dafür gab die Firma Spacetec Vibrationen des Sensors bei der Befliegung an. Neben solchen Bildfehlern, die bei den neueren Operaten nicht mehr auftraten, wurden manchmal auch andere hochfrequente Störungen in den MSS-Vorlagen sichtbar, die mit der in der vorliegenden Arbeit behandelten Methodik und Technologie nicht behoben werden können. In diesem Zusammenhang muß sich die Technik des Bildfluges für herkömmliche Luftaufnahmen von einer solchen für Scanneraufnahmen unterscheiden. Während es im ersten Fall durchaus sinnvoll ist, Abweichungen vom Flugkurs zwischen dem Auslösen zweier Aufnahmen zu korrigieren, sollten solch plötzliche Flugzeugbewegungen bei MSS-Flügen vermieden werden. Diese plötzlichen Flugzeugbewegungen verursachen unter Umständen hochfrequente, nicht korrigierbare Bildstörungen.

Wie aus den Tabellen 2 und 3 bzw. den Abbildungen 1 und 2 zu entnehmen ist, wurden bei den Operaten Marchfeld und Essen (Tagflug) mit den jeweils aus Kanal 11 erstellten Steuerdaten, MSS-Vorlagen anderer Wellenlängenbereiche, deren Grauwerte klassischen Schwarz-Weiß-Luftbildern sehr unähnlich sein können, rektifiziert. Diese wirtschaftlich sehr interessante Möglichkeit bringt aber gewisse Schwierigkeiten, da Geschwindigkeitsschwankungen des Filmvorschubes im Daedalus-Reproduktionsgerät ungleiche MSS-Vorlagen der verschiedenen Kanäle verursachen. Eine erste Möglichkeit zur nachträglichen Beseitigung dieser Schwierigkeiten ist von Hruska /1/ realisiert worden.

3.2 Entzerrungsgrundlagen

Die optimale Entzerrungsvorlage ist natürlich ein Orthophoto, dessen Bildflug simultan mit dem MSS-Flug durchgeführt wurde. Diese Forderung beinhaltet allerdings zwei wirtschaftliche Probleme, die nicht zu übersehen sind:

Zum ersten setzt diese Art der Befliegung die Existenz eines Bildflugzeuges voraus, in das beide Sensorsysteme - Reihenmeßkammer und Scanner - gleichzeitig eingebaut werden können. Die zweite Schwierigkeit bei einer solchen Befliegung besteht in den unterschiedlichen "Kammerkonstanten" der beiden Aufnahmesysteme. Bei Verwendung des Daedalus-Gerätes (Öffnungswinkel der Abtastoptik = $77^{\circ}20'$) und einer Weitwinkelkammer ($f = 15 \text{ cm}$ und $23 \times 23 \text{ cm}^2$ Bildformat) wird von beiden Sensoren etwa dieselbe Streifenbreite in der Natur gedeckt. Allerdings ist der Filmmaßstab des Meßbildes etwa doppelt so groß als der der MSS-Vorlage. Da für eine Orthophotoherstellung ein Maßstabsverhältnis von 1:3 zwischen Bild und Orthophoto sinnvoll ist, wäre es wirtschaftlich ungünstig, einen "echten" Simultanflug für die Orthophotoherstellung zu verwenden. Wesentlich günstiger wäre vielmehr ein unmittelbar an die MSS-Befliegung anschließender Flug mit einem deutlich höheren Flughorizont.

Sind von dem zu bearbeitenden Gebiet die Geländehöheninformationen bereits in einer Datenbank vorhanden, so könnten diese Werte für eine äußerst billige Herstellung von Orthophotos Verwendung finden /7/ und überdies bestünde für die Rektifizierung der MSS-Bilder die Möglichkeit, die senkrecht zur Flugrichtung auftretenden Bildversetzungen infolge der Geländehöhenunterschiede, vorweg zu eliminieren /5/.

3.3 Messung

Für die näherungsweise Zentrierung der MSS-Vorlage im Bildträger des Avio-plan, sind "Rahmenmarken" notwendig. Da solche auf dem MSS-Filmstreifen nicht vorhanden sind, müssen sie vor Beginn der Koordinatenmessung auf den Bildern angebracht werden.

Bei der Auswahl der Stützpunkte sollte besonders darauf Wert gelegt werden, daß diese möglichst gleichmäßig über das zu bearbeitende Gebiet verteilt sind. Die ursprünglich gehegte Hoffnung, mit relativ geringer Stützpunktanzahl hinreichende Ergebnisse erzielen zu können, bestätigte sich nicht. Aus diesem Grund wird zur Zeit das Interpolationsprogramm in SORA-MS so geändert, daß die derzeit bestehende Beschränkung der Stützpunktanzahl auf 280 entfällt.

Die bisherigen Erfahrungen bei der Messung haben ergeben, daß bei Strichkarten als Referenzgrundlage nur mit großer Mühe viele, gleichmäßig verteilte Stützpunkte gefunden werden können. Die Heranziehung des Orthophotos anstelle der Strichkarte bringt hier eine entscheidende Verbesserung.

Die Umwandlung der Magnetbandaufzeichnungen des Scanners in photographische Bilder ergibt verhältnismäßig lange Film- oder Papierstreifen. Auch die Entzerrungsgrundlagen - Orthophotos oder Strichkarten - sind meistens größer als das ausmeßbare Bildformat von $23 \times 23 \text{ cm}^2$ eines photogrammetrischen Präzisionsstereokomparators. Bisher mußte man bei den MSS-Rektifizierungen auf dieses Format Rücksicht nehmen.

Für die Zukunft sollten hier bessere gerätetechnische Voraussetzungen geschaffen werden, wobei von der Tatsache auszugehen ist, daß die Auflösung der Bilder in der klassischen Photogrammetrie weit größer als die der Scannerbilder ist /3/. Aus diesen Gründen sollten Meßgeräte existieren, die durchaus ungenauer als Präzisionskomparatoren sind, dafür aber die Betrachtung und Ausmessung größerer Bildformate gestatten. Diese Geräte könnten übrigens auch für die Betrachtung und eventuelle Ausmessung von Orthophotos und ihren Stereopartnern Verwendung finden /6/, /7/. Für diese Anwendung sollte man allerdings wahlweise mit Durch- oder Auflicht arbeiten können.

3.4 Differentialentzerrung

Waren die MSS-Filmstreifen bei der Messung länger als 23 cm, so müssen sie für die Umbildung im Avioplan, der ebenfalls auf dieses Format ausgelegt ist, entsprechend zerschnitten werden. Da jedoch in Zukunft bei der Berechnung der Steuerdaten für den Avioplan auch jene Stützpunkte verwendet werden, die außerhalb des auf 23 cm Länge reduzierten Filmstreifens liegen, kann es an dem Zusammenstoß von zwei, in Flugrichtung benachbarten Rektifikationen, zu keinen Klaffungen mehr kommen.

Wie schon in 3.2 angedeutet wurde, sind bei den bisherigen MSS-Rektifizierungen die Auswirkungen der Geländehöhen nicht berücksichtigt worden. Bei der Umwandlung der Magnetbanddaten des Scanners in Filme wird vom Printer automatisch die Panoramakorrektur vorgenommen. Allerdings erfolgt dies nur durch einen Approximationsvorgang /1/, wodurch auch aus diesem

Grund Restfehler in den MSS-Bildern vorhanden sind. Infolge dieser beiden Einflüsse wurden die Steuerdaten für den Avioplan jeweils so berechnet, daß die Scanrichtung im Avioplan und beim Flug ident ist.

Die Spalten 13 und 14 der Tabelle 2 enthalten die mittleren Koordinatenrestfehler an den Stützpunkten nach der Interpolation. Je nach gewünschter Genauigkeit im Endprodukt, kann damit unmittelbar der mögliche Kartenmaßstab dieser Rektifizierung angegeben werden. Will man etwa eine mittlere Koordinatengenauigkeit von 0,2 - 0,4 mm, so kommt für alle vorliegenden Beispiele als möglicher Kartenendmaßstab nur etwa der originäre Maßstab der MSS-Bilder in Frage. Das Maßstabsverhältnis zwischen der MSS-Vorlage und dem rektifizierten MSS-Bild wäre also etwa 1:1. Das Beispiel Wien-Favoriten (Tabelle 3, Zeile 5 bzw. Abb.3 und 4) zeigt diese Verhältnisse.

Für viele Aufgaben wird jedoch eine geringere Genauigkeit ausreichen. Für eine MSS-Rektifizierung im Maßstab 1:5 000, die parzellenscharfe Aussagen zu einem Flächenwidmungsplan gleichen Maßstabs erlauben soll, wäre ein Bildmaßstab von 1:10 000 sicherlich ausreichend. Selbstverständlich kann es dabei lokale Abweichungen von maximal 1 bis 2 mm im Planmaßstab geben. Diese Werte wurden bei dem Vergleich der Rektifikationen mit den entsprechenden Strichauswertungen sichtbar (siehe z.B. Abb.1 und 2). Eine Möglichkeit einer durchgreifenden Genauigkeitskontrolle anderer Art ergab die Bearbeitung der Beispiele von Essen. Dabei konnten zwei rektifizierte MSS-Bilder desselben Gebietes miteinander verglichen werden, deren Vorlagen bei zwei verschiedenen Flügen aufgezeichnet wurden.

4. SCHLUSSBEMERKUNGEN

An Hand der drei Beispiele Essen (siehe Tabelle 3, Zeilen 9 bis 11 und Abb.5 und 6) soll noch gezeigt werden, in welchem Zeitraum und mit welchem Personalaufwand diese Rektifizierungen durchgeführt werden konnten:

Am 1.12.1975 wurde mit den Arbeiten begonnen und am 12.12.1975 konnten die drei rektifizierten MSS-Bilder abgeliefert werden. Der Zeitaufwand für das Vorbereiten, Messen, Berechnen, Rektifizieren und Entwickeln der Negative betrug etwa 20 Arbeitsstunden. Bedenkt man noch, daß im vorliegenden Fall die Rektifikation in Heerbrugg, die anderen Arbeiten aber in Wien durchgeführt wurden, so ist der angegebene Zeitraum für die

Durchführung der Arbeit und der ausgewiesene Personalaufwand ein Kriterium dafür, daß mit dem verwendeten Verfahren eine durchaus operationelle, sehr wirtschaftliche und überaus anwenderfreundliche Methode der Rektifikation von MSS-Aufnahmen entwickelt wurde.

DANK

Ohne die enge Zusammenarbeit der Firma Spacetec, Wien, und Wild, Heerbrugg, mit unserem Institut wäre eine derartige Arbeit unmöglich gewesen.

Namens des Institutes für Photogrammetrie der Technischen Universität Wien danke ich jenen Herren der Niederösterreichischen Landesregierung, der Gemeinde Wien und des Siedlungsverbandes Ruhrkohlenbezirk, die uns bei der Bereitstellung von notwendigen Unterlagen und Informationen bestens unterstützten.

SCHRIFTTUM

- /1/ HRUSKA, H.: Geometrische Rektifizierung von multispektralen Scanneraufnahmen.
Diplomarbeit an den Instituten für Angewandte Physik und Photogrammetrie, TU Wien, 1975.
- /2/ KONECNY, G.: Geometrical Aspects of Remote Sensing.
Invited paper, Commission IV, XII. ISP-Kongreß, 1972.
- /3/ KONECNY, G.: Approach and Status of Geometric Restitution for Remote Sensing Imagery.
BuL, Heft Nr.1, 1975.
- /4/ KRAUS, K.: Interpolation nach kleinsten Quadraten in der Photogrammetrie.
BuL, Heft Nr.1, 1972.
- /5/ KRAUS, K.: Die Entzerrung von Multispektralbildern.
BuL, Heft Nr.4, 1975.
- /6/ KRAUS, K.: Anwendungsmöglichkeit eines digital gesteuerten Differentialumbildeggerätes.
Geowissenschaftl.Mitteilungen, TU Wien, Heft Nr.8,1976, presented paper, XIII. ISP-Kongreß, 1976.
- /7/ OTEPKA, G. und LOITSCH, J.: Ein Programm zur digital gesteuerten Orthophotoproduktion.
Geowissenschaftl.Mitteilungen, TU Wien, Heft Nr.8,1976, presented paper, XIII. ISP-Kongreß, 1976.
- /8/ STEWARDSON, P.B.: The Wild Avioplan OR 1 Orthophoto System.
Presented paper, XIII. ISP-Kongreß, 1976.



Abb. 1: Ausschnitt der Zusammenkopie des rektifizierten MSS-Bildes (Beispiel Nr. 1 der Tabelle 3) mit der Situationsdarstellung der Österreichischen Karte (ÖK 1:50 000) im Maßstab 1:20 000.



Abb. 2: Ausschnitt der Zusammenkopie des rektifizierten MSS-Bildes (Beispiel Nr. 3 der Tabelle 3) mit der Situationsdarstellung der Österreichischen Karte (ÖK 1: 50 000) im Maßstab 1: 20 000.



Abb. 3: Ausschnitt des rektifizierten MSS-Bildes (Beispiel Nr. 5 der Tabelle 3) im Maßstab 1:10 000.



Abb. 4: Ausschnitt der Zusammenkopie des rektifizierten MSS-Bildes (Beispiel Nr. 5 der Tabelle 3) mit der Situationsdarstellung der Wiener Stadtkarte im Maßstab 1:10 000.



Abb. 5: Ausschnitt des rektifizierten MSS-Bildes (Beispiel Nr. 9 der Tabelle 3) verkleinert auf den Maßstab 1:20 000. Freigegeben durch den Regierungspräsidenten Münster vom 14. November 1975, Nr. 5229/75.



Abb. 6: Ausschnitt des rektifizierten MSS-Bildes (Beispiel Nr. 10 der Tabelle 3) verkleinert auf den Maßstab 1:20 000. Freigegeben durch den Regierungspräsidenten Münster vom 14. November 1975, Nr. 5229/75.

Geowiss. Mitt.

8, 1976, S. 81 - 88

DIE PHOTOGRAPHISCHE ENTZERRUNG ABWICKELBARER
REGELFLÄCHEN ¹⁾

von

K. Kraus und J. Tschannerl

- 1) Vortragsmanuskript für das Internationale Symposium "Photogrammetrie in der Architektur und Denkmalpflege" vom 10. - 13.5.1976 in Bonn, BRD.

Erstveröffentlichung: "Bildmessung und Luftbildwesen" Heft 4, 1976

Adresse der Autoren:

Prof.Dr.K. Kraus und J. Tschannerl, Institut für Photogrammetrie der
Technischen Universität Wien, 1040 Wien, Gußhausstraße 27-29, Österreich

ZUSAMMENFASSUNG

Die Differentialumbildegeräte auf der Basis einer elektronischen Steuerung können zusätzlich zur Orthophotoherstellung auch für photographische Entzerrungen abwickelbarer Regelflächen (Zylinder, Kegel, Tangentenflächen von Raumkurven) eingesetzt werden. Anhand des Tonnengewölbes des Wiener Schottenstiftes wird eine solche photographische "Abwicklung" demonstriert. Das Ergebnis ist sowohl geometrisch als auch photographisch zufriedenstellend. Damit kann die bisher in der Photogrammetrie übliche ebene Bezugsfläche durch eine gekrümmte Bezugsfläche ersetzt werden. Eine solche Möglichkeit ist vor allem für die Architektur und Denkmalpflege, aber auch für andere Sonderanwendungen der Photogrammetrie interessant.

ABSTRACT

In addition to orthophotoproduction digitally controlled orthophotoprojectors have also the capability to rectify photographically pictures taken from developable surfaces (cylinders, cones, tangential surfaces of spacial curves). By means of the barral-vault of the Vienna Schottenstift such a photographic "development" is demonstrated. The result is satisfying geometrically as well as photographically. Thus the reference plane normally used in photogrammetry until now can be replaced by a regularly curved reference surface. Such a possibility is interesting mainly for architecture and preservation of monuments, but also for other special applications of photogrammetry.

1. EINLEITUNG

Seit ihren Anfängen wird in der Photogrammetrie das Ziel verfolgt, aus dem zentralperspektivischen Meßbild ein neues, verzerrungsfreies photographisches Bild zu erzeugen. Erstmals konnten solche photographische Bilder mit Hilfe der Entzerrungsgeräte - allerdings nur unter der Voraussetzung ebener Objektflächen - angefertigt werden. Die zur Zeit im praktischen Einsatz befindlichen Differentialentzerrungsgeräte eröffneten die Möglichkeit, von gekrümmten Oberflächen Orthogonalprojektionen auf ebene Bezugsflächen (Orthophotos) herzustellen.

Die in absehbarer Zeit auf den Markt kommenden digital gesteuerten Differentialumbildegeräte befreien die photographische Umbildung von dem Zwang einer e b e n e n Bezugsfläche. Sie bieten unter anderem die Möglichkeit, verzerrungsfreie photographische Bilder abwickelbarer Oberflächen herzustellen, ein von den Anwendern der Photogrammetrie wiederholt vorgetragener Wunsch.

Im nächsten Abschnitt soll anhand eines praktischen Beispiels die photographische Abwicklung der Oberfläche eines Kreiszyinders erläutert werden.

2. PRAKTISCHES BEISPIEL

Auf der Suche nach einem geeigneten Objekt stießen wir auf den von dem Architekten Josef Kornhäusel (1782 - 1860) im biedermeierischen Spätklassizismus erbauten Bibliothekssaal des Wiener Schotten-Stiftes (Bild 1 und 3). Die von dem Dekorationsmaler F. Weiner in dezenten Braun- und Grautönen gehaltenen Fresken zieren ein auf ionischen Säulen ruhendes Tonnengewölbe /3/.

Die Aufnahmeorte der beiden Zenitaufnahmen (Bild 1 und 3) liegen in gleicher Höhe unterhalb der Scheitellinie des Tonnengewölbes. Zusätzlich wurden für stereoskopische Messungen - wie das Bild 5 veranschaulicht - noch jeweils eine Aufnahme mit einer Basis $B = 1,97$ m gemacht.

Aus den stereoskopischen Messungen ergab sich für die Aufnahmeentfernung $E = 11,80$ m und für den Radius des Kreiszyinders $R = 4,02$ m (Bild 5).

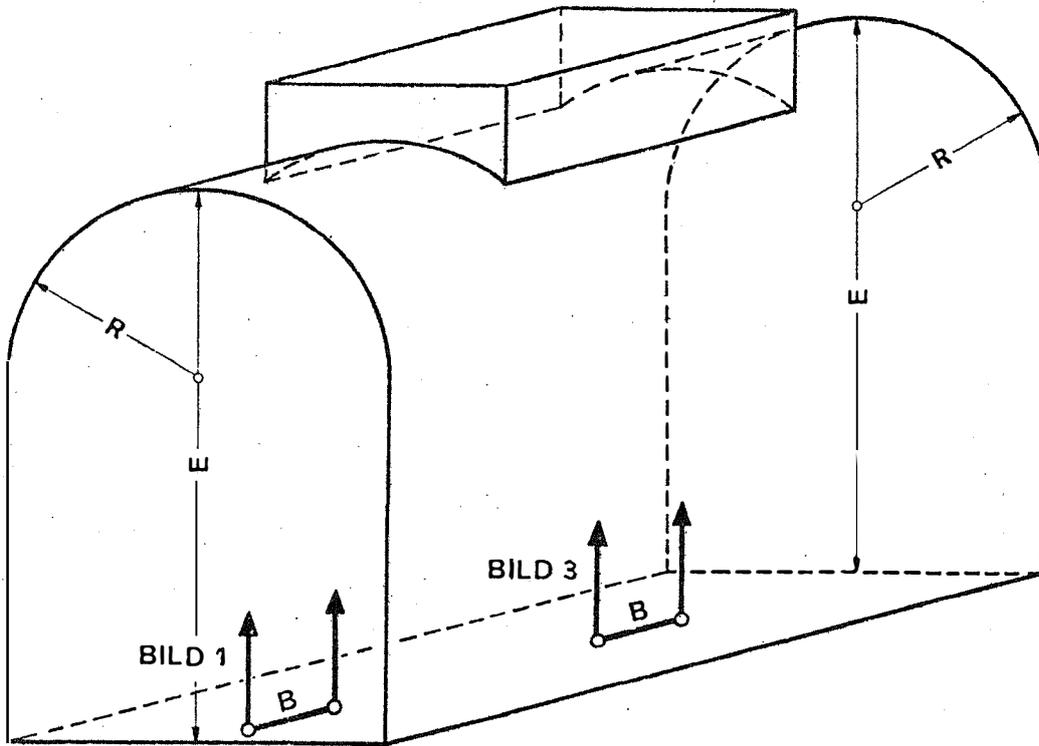


Bild 5: Aufnahmedisposition

Für die photographische Entzerrung der beiden Aufnahmen stellte uns die Firma Wild, Heerbrugg in der Schweiz, ihr digital gesteuertes Differentialumbildeggerät Avioplan OR 1 /4/ zur Verfügung. In diesem Gerät steuert ein Prozeßrechner eine Zoomeinrichtung und ein Doveprisma für die in parallelen Profilstreifen ablaufende optische Differentialentzerrung. Die Dateneingabe für den Prozeßrechner des Avioplans erfolgt auf einem Magnetband, das vorher mit einem Computerprogramm in einer EDV-Anlage zu beschreiben ist.

Bei der photographischen Abwicklung der Oberfläche eines Kreiszyklinders wird mit Hilfe des angesprochenen Computerprogrammes - wie in /1/ ausführlich beschrieben - zunächst ein quadratisches Raster rechnerisch auf der Zylinderoberfläche ausgebreitet. Anschließend sind die Rasterpunkte mit Hilfe der Abbildungsgleichungen der Zentralprojektion in das Meßbild zu transformieren. Nach Sortieren in gegenläufige Profile schreibt das Computerprogramm diese Bildkoordinaten auf ein Magnetband, das für die Differentialumbildung in die Magnetbandstation des Avioplans eingelegt wird.

Die praktischen Berechnungen wurden mit der Cyber 74 der Technischen Universität Wien durchgeführt. Bei der Entzerrung des Bildes 1 betrug die Rasterweite 40 cm x 40 cm und beim Bild 3 20 cm x 20 cm. Da aus dem Bild 1 eine Entzerrung im Maßstab 1:50 und aus dem Bild 2 eine im Maßstab 1:25 herzustellen war, beträgt in beiden Entzerrungen (Bild 2 und 4) der Profilabstand 8 mm.

Es spricht für die Leistungsfähigkeit dieser neuen Technologie, daß der Betrachter kaum die senkrecht zu den Mantellinien des Kreiszyinders verlaufenden Profilstreifen erkennt. Ebenso beeindruckend ist die photographische Qualität der Entzerrungen.

3. VERALLGEMEINERUNG DER METHODE

Bei der photographischen Abwicklung des Tonnengewölbes des Wiener Schotten-Stiftes war die Aufnahmerichtung senkrecht zur Achse des Kreiszyinders ausgerichtet. Eine solche spezielle Aufnahmedisposition ist keine Bedingung für die photographische Entzerrung nach dieser Methode. Die Aufnahmerichtung kann vielmehr beliebig im Raum liegen. Falls die Elemente der äußeren Orientierung nicht während der Aufnahme bestimmt werden können, wird man - ähnlich der Orthophotoherstellung aus Luftbildern /2/ - die Lage des Aufnahmeortes und die Drehungen des Bildes in bezug auf das zu entzerrende Objekt mit Hilfe von Paßpunkten rechnerisch bestimmen.

Eine zweite Verallgemeinerung der Methode besteht darin, daß sie keineswegs auf die Entzerrung von Kreiszyindern beschränkt ist. Das anhand des Kreiszyinders beschriebene Prinzip kann nämlich auf alle abwickelbare Regelflächen übertragen werden. Regelflächen mit dieser Eigenschaft tragen die Bezeichnung Torsen. Darunter fallen allgemeine **Z y l i n d e r - F l ä c h e n** (die Erzeugende muß nicht entlang eines Kreises sondern kann auch entlang beliebig gekrümmter ebener Kurven geführt werden). Ebenso allgemein ist auch die mit dieser Methode photographisch entzerrbare **K e g e l - F l ä c h e** zu definieren. Schließlich sind noch die - in der Architektur und Denkmalpflege weniger wichtigen - **T a n g e n t e n - F l ä c h e n** von Raumkurven zu erwähnen.

SCHRIFTTUM

- /1/ KRAUS, K.: Anwendungsmöglichkeiten eines digital gesteuerten Differentialumbildeggerätes. Geowissenschaftl.Mitteilungen, Technische Universität Wien, Heft Nr.8, 1976, presented paper, XIII.International Congress for Photogrammetry, 1976.
- /2/ OTEPKA, G. und LOITSCH, J.: Ein Programm zur digital gesteuerten Orthophotoproduktion. Geowissenschaftl.Mitteilungen, Technische Universität Wien, Heft Nr.8, 1976, presented paper, XIII.International Congress for Photogrammetry, 1976.
- /3/ RAPF, C.R.: Das Schotten-Stift. Band 13 der Wiener Geschichtsbücher, Wien 1974.
- /4/ STEWARDSON, P.: The Wild Avioplan OR 1 Orthophoto System. Presented paper, XIII.international Congress for Photogrammetry, 1976.

Die Verfasser danken Herrn Dr.Foramitti, dem Leiter der Photogrammetrie beim Bundesamt für Denkmalpflege in Wien, für Anregungen im Zusammenhang mit der Verwendung photographischer Entzerrungen in der Denkmalpflege.



Bild 1: Ausschnitt aus einer um den Faktor 2,1 vergrößerten Zenitaufnahme des Bibliotheksaales des Wiener Schotten-Stiftes (Aufnahmekamera: Wild P 31, Kammerkonstante: 99,13 mm, Aufnahmeentfernung bis zum Scheitel des Tonnengewölbes: 11,80 m).



Bild 2: Photographische Entzerrung im Maßstab 1 : 50 mit dem Wild Avioplan OR 1 (ausgeführt vom Institut für Photogrammetrie der TU Wien).



Bild 3: Ausschnitt aus einer um den Faktor 4,2 vergrößerten Zenitaufnahme des Bibliotheksaales des Wiener Schotten-Stiftes (Aufnahmekamera: Wild P 31, Kammerkonstante: 99,13 mm, Aufnahmeentfernung bis zum Scheitel des Tonnengewölbes: 11,80 m).



Bild 4: Photographische Entzerrung im Maßstab 1 :25 mit dem Wild Avioplan OR I (ausgeführt vom Institut für Photogrammetrie der TU Wien).

Geowiss. Mitt.

8, 1976, S. 89 - 111

FASSADENVERMESSUNG
- EINE AKTUELLE AUFGABE DER INGENIEURPHOTOGRAMMETRIE

von

H. Kager und P. Waldhäusl

Adresse der Autoren:

Dipl.-Ing.H. Kager und Doz. Dr. Waldhäusl, Institut für Photogrammetrie
der Technischen Universität Wien, 1040 Wien, Gußhausstraße 27-29, Österreich

ZUSAMMENFASSUNG

Für das Wiener Institut für Bauforschung wurden Fassaden zweier nach verschiedenen Bauweisen errichteter Rohbauten photogrammetrisch vermessen. Es sollte eine Aussage über die erreichte Baugenaugkeit getroffen werden. Gleichzeitig sollten praxisgerechte Rechenprogramme für die Fassadenphotogrammetrie entwickelt werden, die auch bei der Vermessung für Fassadenverkleidungen, etwa mit Eternittafeln, geeignet sind. Bei derartigen Aufgaben werden die Fassaden-Ist-Koordinaten für den Plattenzuschnitt im Werk, für die Berechnung der Längen und Positionen der Abstandshalter sowie für die Plattenmontage am Bau benötigt.

Der Ablauf der 1975 durchgeführten Arbeiten war folgender: Signalisierung von Paßpunkten (Stempeln mit Korkstöpseln !), Vorwärtseinschneiden mit WILD T2, genäherte Normalfallphotogrammetrie (WILD P31 und/oder JENA UMK 10/1318, aus etwa 25 m Entfernung), Bildkoordinatenmessung (WILD STK1), Modellkoordinatenberechnung und Blockausgleichung (PAT-M 43), Mittelung und Ausgabe der Koordinaten (in einem übersichtlichen Rasterystem, wobei zeilen- bzw. spaltenweise die Differenzen gegenüber den Mittelwerten oder den geplanten Sollwerten angegeben werden). Die - noch steigerbare - photogrammetrische Meßgenauigkeit betrug $m_x = \pm 1,2$ mm (aus den bekannten Fensterstocklichtern), $m_y = \pm 1,8$ mm (aus nivellierten Punkten), $m_z = \pm 3,5$ mm (aus Blockausgleichung). Zwischendurch wird über eine für die WILD P 31 wirtschaftliche, alternative Aufnahmedisposition mit genähert lotrechter Basis berichtet, bei der die Orientierung der Aufnahme-richtung nur nach dem Spiegelbild im gegenüberliegenden Fenster erfolgt.

ABSTRACT

The facades of two shell-constructions, built by different methods, were measured photogrammetrically for the Vienna Institute of Building Research. Evidence was to be established on the accuracy of building achieved so far. At the same time practicable computing programmes for the photogrammetry of facades were to be evolved, programmes also suitable for surveying facades to be faced e.g. with "Eternit"-panels. Such problems require the actual coordinates of the facades for the purpose of cutting the panels in the works, for the computation of lengths and the positions of spacers as well as for the purpose of mounting the panels in situ.

The procedure followed in 1975 was this: Signalising of control points (stamping with corks !), intersection with WILD T2, approximated normal case photogrammetry (WILD P31 and/or JENA UMK 10/1318, from a distance of about 25 m), measuring of picture coordinates (WILD STK1), computation of model coordinates and block adjustment (PAT-M 43), standardisation and output of coordinates (in a clearly arranged grid system, indicating differences relative to the mean values or to the planned nominal values by line and column respectively). The photogrammetric accuracy of measurement - which may still be increased - amounted to $m_x = \pm 1.2$ mm (from the known window frame dimensions), $m_y = \pm 1.8$ mm (from levelling), $m_z = \pm 3.5$ mm (from block adjustment). Inter alia an alternative photographing disposition, economical for the WILD P 31, with an approximately vertical basis is reported on, at which the orientation of the camera axis is undertaken only relative to the reflexion in the window opposite.

1. EINLEITUNG

Große Fassaden mit hoher Genauigkeit "klassisch", d.h. ohne Photogrammetrie zu vermessen, ist naturgegeben schwierig. Die hochgelegenen Fassadenpunkte sind meist ohne Gerüst nicht erreichbar. Das Messen auf einem Gerüst ist beschwerlich und nicht ungefährlich; es wird durch die Bauarbeiten behindert und es stört die Bauarbeiter.

Geodätische Fassadenvermessungen werden stets so angelegt, daß zuerst Rahmenfestpunkte bestimmt werden, an die dann später die Detailvermessung Stück für Stück anschließt. Dies erfordert seine Zeit, während der ein Gerüst bezahlt sein will. Und bestimmt man alle Fassadenpunkte geodätisch mit Hilfe von Theodoliten (und eventuell Entfernungsmessern), so bleiben Irrtümer bei der Punktidentifikation, der Messung, der Zahlenaufschreibung und nachfolgender Berechnung nicht ausgeschlossen.

Vom Institut für Bauforschung wurde daher an das Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität Wien das Problem herangetragen, zwei hinsichtlich Baugenauigkeit zu vergleichende Rohbaufassaden eines Wohnbauprojektes in Wien photogrammetrisch zu vermessen. Zwei an sich gleichartige Wohnhäuser von 42 m Länge waren nach zwei verschiedenen Bauweisen errichtet worden: in klassischer Ziegelbauweise das eine, in "Proktor-Ziegelfertigteil-Bauweise" das andere. Ziel der Vermessung war es, festzustellen, mit welcher Bauweise die geplanten Sollmaße besser eingehalten werden können. Der Einsatz der Photogrammetrie ließ aus folgenden Gründen positive Ergebnisse erwarten:

- Die Stereomeßbilder haben Dokumentencharakter für einen bestimmten Bauzustand und dessen Metrik, d.h., sie sind glaubhaft.
- Der Baufortschritt wird durch die photogrammetrische Vermessung nicht aufgehalten. Allerdings muß freie Sicht (vom Boden, von anderen Gebäuden oder von Hebebühnen aus) auf die zu vermessenden Fassaden möglich sein.
- Die Ausmessung dieser Aufnahmen kann jederzeit wiederholt werden.
- Die in den letzten Jahren entwickelten Präzisions-Nahbereichsmeßkammern lassen höhere Genauigkeiten als bisher erwarten.

- Die heute verfügbaren Präzisionsstereokomparatoren gestatten eine genauere metrische Bildauswertung als früher.
- Die hochentwickelte elektronische Datenverarbeitungstechnik erlaubt es, mit Hilfe aufwendigerer mathematischer Methoden als vordem mit Handrechenmaschinen aus Stereokomparatormessungen Raumkoordinaten abzuleiten.

2. DIE PHOTOGRAMMETRISCHE AUFNAHME

Entsprechend den in Abb.1 dargestellten Platzverhältnissen mußten die Aufnahmen für die zwei gleich großen Fassaden auf verschiedene Weise angeordnet werden.

Die Standlinien für die Aufnahme des Südbaues konnten zwischen den Balkonen im 2. oder 3.Stock des gegenüberliegenden Hauses horizontal angelegt werden. Mit der Präzisionsmeßkammer WILD P31 wurden auf diese Weise drei Stereo-Normalfall-Modelle aufgenommen (Abb.1: Basen S1, S2, S3). Um eine wirklich unabhängige Kontrolle, eine zuverlässige Sicherung der Resultate und auch noch eine Genauigkeitssteigerung zu erhalten, wurde mit zwei weiteren Modellen die Fassade ein zweites Mal gedeckt, diesmal mit der JENAer Universalmeßkammer UMK 10/1318 (Abb.1: Basen S4, S5). Das größere Bildformat dieser Weitwinkelmeßkammer erleichterte die Wahl der Aufnahme-disposition etwas, obwohl der Anzahl der Stereomodelle bei den heute möglichen analytischen Auswertemethoden nicht mehr die entscheidende Bedeutung zukommt wie früher.

Ebenso wurde auch die Fassade des Nordbaues doppelt durch zwei Sätze von Stereomodellen gedeckt. Die Fassade konnte nur vom 27 m von der Fassade entfernten Gehsteig aus photographiert werden. Drei Modelle erfaßten einander überlappend je einen der drei Baukörper mit Hochformataufnahmen der UMK 10/1318 (Abb.1: Basen N3, N4, N5). Die zweite Deckung wurde mit um 15° gekippten Querformat-Modellen etwas größerer Basis erzielt (Abb.1: Basen N1, N2).

Vor der photogrammetrischen Aufnahme wurden je Fassade 15 Paßpunkte signalisiert. Primitive Methoden bewähren sich: Auf gekalkten Ziegelsteinen wurde mittels eines Korkstöpsels (15 mm Durchmesser) schwarze Farbe

Lageskizze der Versuchsbauten "Gerichtsgasse".

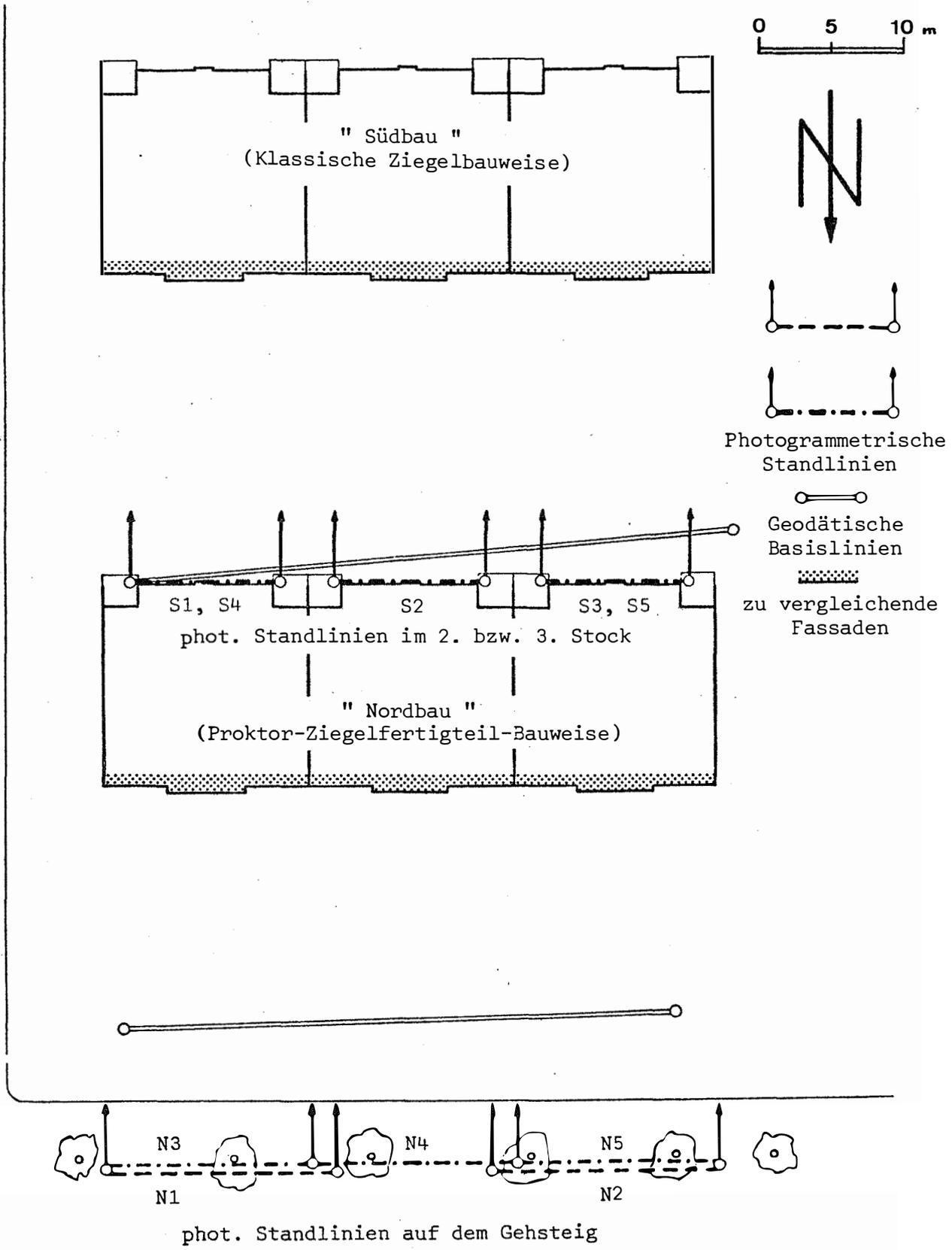


Abb. 1:

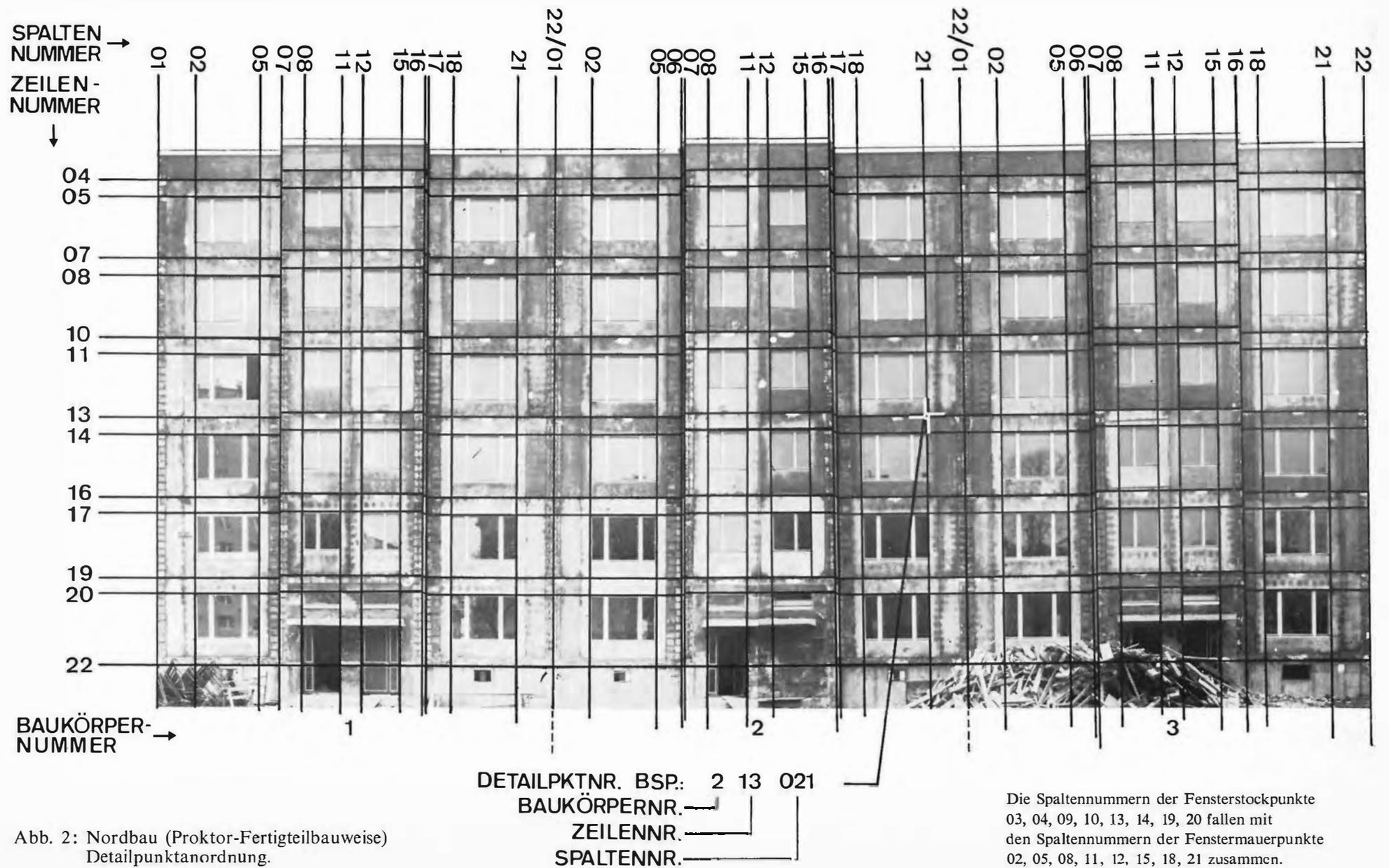


Abb. 2: Nordbau (Proktor-Fertigteilbauweise)
Detailpunktanordnung.

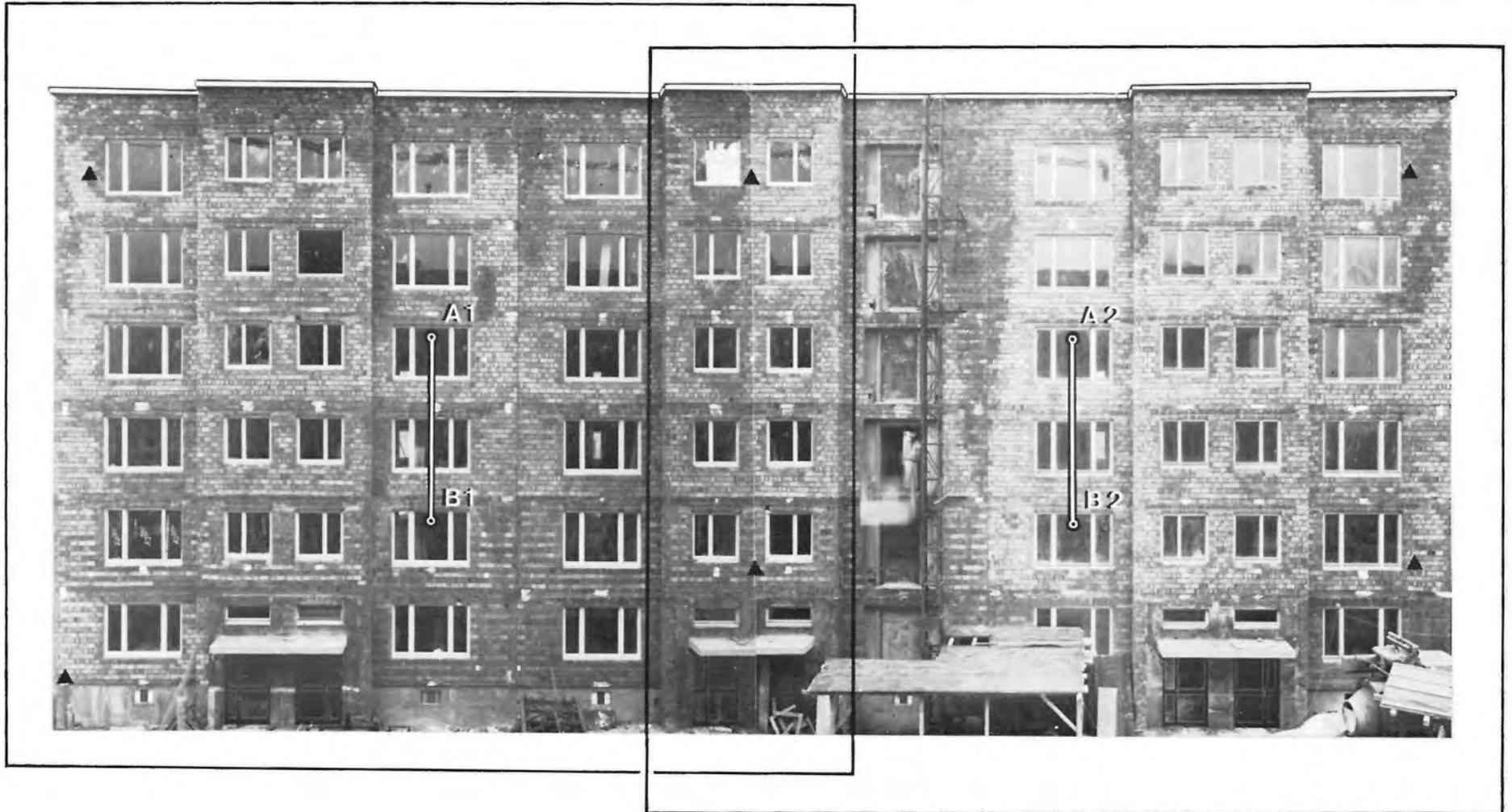


Abb. 3: Südbau (Klassische Ziegelbauweise)
Alternativ geplante Aufnahmedisposition für P 31:
genäherter Normalfall bei lotrechten Basen.

kreisrund aufgestempelt. Von je einer mehrfach mit Stahlmaßbändern gemessenen Basis aus wurden die so vorbereiteten Paßpunkte innerhalb von 2 Stunden je Fassade mit WILD T2 räumlich vorwärts eingeschnitten.

Die Paßpunkte wurden für jede Fassade in einem kartesischen Koordinatensystem berechnet, dessen X-Achse horizontal und etwa parallel zur jeweiligen Fassade gewählt wurde. Die Y-Achse wurde lotrecht angenommen und die Z-Achse so, daß sich ein rechtsdrehendes System ergab. Unabhängige Streckenkontrollen zwischen untereinander liegenden Paßpunkten zeigten mittlere Abweichungen von ± 2 mm, was auch der inneren Genauigkeit der räumlichen Vorwärtsschnitte entsprach. Die Restfehler in den Paßpunkten nach der Blockausgleichung ("Blockstatistik" Abb.4) bewiesen später, daß in den geodätischen Bezugsnetzen der beiden Fassaden keinerlei Spannungen auftraten.

Die photographischen Arbeiten konnten nicht so schnell abgewickelt werden, wie es auf Grund der rein technischen Handhabung an und für sich möglich gewesen wäre, weil jeweils der Sonnenstand zu berücksichtigen war, um extremes Gegenlicht zu vermeiden. Insgesamt benötigten wir für die geodätischen und photographischen Aufnahmearbeiten zu dritt, teilweise zu viert, 3 volle Tage, wobei einige Verzögerung auch der Jahreszeit zuzuschreiben war: Mitte Februar bei $- 10^{\circ}\text{C}$.

Die geplante Aufnahmedisposition erwies sich als realisierbar, allerdings erst, nachdem die Sichthindernisse, vor allem zwei Kräne und zwei Zementsilos, entfernt worden waren. In Zukunft sollte eine vorgesehene photogrammetrische Aufnahme schon bei der Bauplatzplanung mit berücksichtigt werden: der Photogrammeter kann seine Aufnahmedisposition zeitgerecht bekanntgeben, sodaß seine Wünsche hinsichtlich der Sichten und Aufstellungs-orte reibungslos erfüllbar sind.

Als Alternative zu den gewählten Aufnahmedispositionen wäre besonders bei Einsatz der WILD P31 auch noch eine lotrechte Basisanordnung denkbar, wobei man - ganz analog der Luftbildmessung - keine Standpunktkoordinaten bestimmt und keine Basislängen mißt (Abb.3). Um genäherte Senkrechtaufnahmen herzustellen, d.h., die Aufnahmerichtungen hinreichend senkrecht

auf die gegenüberliegende Fassade zu orientieren, genügt es sicherlich, die Kammern nach dem Spiegelbild im gegenüberliegenden Fenster auszurichten. Mit einer solchen Anordnung läßt sich das asymmetrische Bildformat der WILD P31 optimal ausnützen. In Sonderfällen wären auch noch horizontal um etwa 30° verschwenkte Aufnahmen denkbar, die eine noch größere Aufnahme-flächenleistung pro Standlinie ermöglichen; allerdings erschweren solche Meßbilder die Auswertung für den Operateur beträchtlich (wie sich an den um 15° gekippten UMK-Modellen des Nordbaues zeigte).

Eine wesentliche Überlegung bei der Planung der nahphotogrammetrischen Aufnahmedisposition gilt immer der Abbildungsschärfe. Die hier einge-setzten Kammern sind beide auf 25 m abgestimmt, sodaß die Zerstreungs-kreise für die Aufnahmeweiten zwischen 22 und 30 m theoretisch kleiner als 5μ sind. Daher ist die Größe des blendenabhängigen Beugungsscheib-chens für die Abbildungsschärfe allein ausschlaggebend. Interessant mag folgende einfache Überlegung sein: Bei kreisförmiger Blende beträgt bekanntlich der theoretische Durchmesser des zentralen Beugungsscheibchens $\delta = 2,400.k.\lambda$ [μm], wobei für λ die mittlere Wellenlänge des sichtbaren Lichtes, d.h. $0,55 \mu\text{m}$ einzusetzen ist (Abb.4) (Rinner 1972).

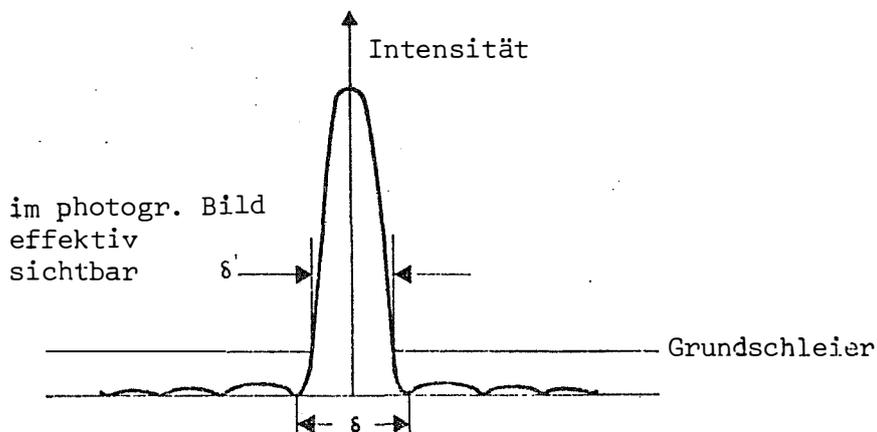


Abb. 4: Intensitätsverteilung im Beugungsscheibchen bei kreisförmiger Blende

Bei Blende $k = 8$ ergibt sich für $\delta = 11\mu\text{m}$. Da die Randintensitäten des Scheibchens dem Bereich der Unterbelichtung der photographischen Emulsion entsprechen wird jedoch ein nur etwa $\delta' = 8\mu\text{m}$ großes Unschärfenbild sichtbar. Allgemein läßt sich somit für Abschätzungen leicht merken:

$$\delta' = 0,75 \delta = 2,400 \cdot 0,55 \cdot 0,75 \cdot k \doteq k$$
$$\delta' [\mu\text{m}] = k$$

Für die Aufnahmen war es daher sinnvoll, bei möglichst offener Blende zu belichten.

3. DIE PHOTOGRAMMETRISCHE AUSWERTUNG

Die Messung der Plattenegative erfolgte am WILD-Stereokomparator STK1 mit einer kreisförmigen schwarzen Meßmarke von 20 μm Durchmesser im Bild.

Für die Messungen wurden die Detailpunkte nach einem Matrizenschema numeriert, das sich als unumgänglich notwendig für derartige Arbeiten herausgestellt und bewährt hat. Dem Auswerter stand als Arbeitsunterlage eine photographische Vergrößerung der Fassadenansicht (Abb.2) und eine Meßanweisung für die Punktauswahl zur Verfügung. Folgende Punktgruppen wurden gemessen:

- a) Baukörperpunkte: An jeder Stockwerksgrenze wurden die Mauerkanten, Mauerecken sowie die Baukörpertrennfugen gemessen (z.B. Zeile 4 Spalte 6). Je Baukörper wurden 42 Baukörperpunkte gemessen. Die Messungen an diesen Punkten sollten eine Beurteilung der Baugenaugigkeit im großen zulassen.
- b) Fenstermauerpunkte: Es sollten die Mauerlichten getestet werden, inwieweit sie nach Länge, Lage, Höhe wie Tiefe den Planmaßen entsprechen. Von den je Baukörper 24 Fenstern wurden jeweils die beiden oberen Mauereckpunkte gemessen (z.B. Zeile 5 Spalten 2 und 5). Je Baukörper gab es 48 solche Punkte.
- c) Fensterstockpunkte (Holz): Zumindest für einen Baukörper sollte geprüft werden, ob auch das Versetzen der Fensterstöcke photographisch kontrolliert werden kann. Dafür wurden wieder die oberen Fensterstockpunkte, zwei je Fenster, gemessen (z.B. Zeile 5 Spalte 3 und 4). Es gab je Baukörper wieder 48 Punkte. Die Fensterstöcke waren

zum Zeitpunkt der Aufnahme weiß grundiert, noch nicht lackiert. Da uns die Messung der Fensterstockpunkte nur eines Baukörpers als zu wenig erschien, um ein signifikantes Ergebnis zu gewährleisten, wurden sämtliche Fensterstockpunkte des Südbaues und auch einige des Nordbaues gemessen.

4. RECHNERISCHE MESSDATENVERARBEITUNG

Der Weg der Meßdatenverarbeitung war durch die am Institut vorhandenen, zwar für Luftbildauswertung konzipierten, Programme bereits vorgezeichnet.

4.1 Im ersten Arbeitsschritt werden die auf (5-Kanal-)Lochstreifen registrierten (EK6 + SL15) Bildkoordinatenmessungen auf Lochkarten konvertiert, um ein für die Digitalrechenanlage CDC Cyber 74 der Technischen Universität Wien einfach handhabbares Eingabemedium verwenden zu können.

4.2 Im zweiten Arbeitsschritt wurden mit einem Programm (Otepka, 1974) die Komparatorkoordinaten zunächst in Bildkoordinaten transformiert. Auf eine Verzeichnungskorrektur konnte bei der Universalmeßkammer WILD P31 verzichtet werden, da die Korrektur weniger als 3 μ betragen hätte. Die Verzeichnung der JENAer Leihkamera UMK 10/1318 war uns nicht hinreichend genau definiert worden; eine Abschätzung ergab dafür Fehler von weniger als ± 1 mm in der Fassadenebene, sodaß die Korrektur ebenfalls entfallen konnte.

Mit den so bereinigten Bildkoordinaten wurden die Bildpaare gegenseitig orientiert und Modellkoordinaten bestimmt. Die y-Restparallaxen in den je Modell ca. 15 Orientierungspunkten betragen (im Bild) im Mittel ca. 5 μ m, in manchen unklar definierten Detailpunkten allerdings bis zu 40 μ m.

4.3 Mit Hilfe einer Auswahl gut identifizierbarer Detailpunkte und aller Paßpunkte wurde im dritten Arbeitsschritt das Großprogramm PAT-M 43, "Blockausgleichung mit Einzelmodellen" für die beiden Fassaden mit Erfolg angewandt. Die blockmäßige Angleichung der 5 Modelle mit Hilfe der Verknüpfungspunkte untereinander und mit Hilfe der 15 Vollpaßpunkte an das Fassadenkoordinatensystem ergab gute Resultate (Abb. 5).

Statistische Angaben		Block Südbau	Block Nordbau
Anzahl der für den Blockausgleich n-fach photogrammetrisch gemessenen Punkte. (Viele Punkte wurden wohl mehrfach gemessen, jedoch nicht als Verknüpfungspunkte (d.h. $n > 1$) verwendet).	$n = 1$	628	710
	$n = 2$	92	23
	$n = 3$	11	12
	$n = 4$	0	4
Gesamtzahl der Beobachtungen für die Lage (x, y)		468	218
Anzahl der Unbekannten beim Lageausgleich		230	94
Redundanz beim Lageausgleich		238	124
Gesamtzahl der Beobachtungen für die Tiefe (z)		234	121
Anzahl der Unbekannten beim z-Ausgleich		120	58
Redundanz beim z-Ausgleich		114	63
Quadratische Mittelwerte der n_1 Verbesserungen aller photogrammetrisch gemessenen Verknüpfungspunkte	n_1	219	94
	in x	± 1 mm	± 1 mm
	in y	± 1 mm	± 2 mm
	in z	± 3 mm	± 2 mm
Quadratische Mittelwerte der n_2 Verbesserungen der photogrammetrischen Messungen an Paßpunkten	n_2	31	40
	in x	± 1 mm	± 1 mm
	in y	± 1 mm	± 1 mm
	in z	± 3 mm	± 2 mm
Quadratische Mittelwerte der n_3 Verbesserungen der terrestrischen Messungen an den Paßpunkten	n_3	15	15
	in x	0 mm	0 mm
	in y	0 mm	0 mm
	in z	± 1 mm	± 1 mm
Standardabweichung σ_{OL} beim Lageausgleich		$\pm 1,5$ mm	$\pm 1,9$ mm
Standardabweichung σ_{OZ} beim Z-Ausgleich		$\pm 3,8$ mm	$\pm 2,8$ mm
A-priori-Schätzung der Standardabweichungen zum Zeitpunkt der Planung, zum Vergleich:	σ_{OL}	$\pm 2,2$ mm	$\pm 2,7$ mm
	σ_{OZ}	$\pm 5,4$ mm	$\pm 6,6$ mm

Abb. 5: Blockstatistik

4.4 Im 4. Arbeitsschritt erfolgte die Vereinigung zusammengehöriger Nichtverknüpfungspunkte der Blockausgleichung (d.s.z.B. Punkte auf Fugen oder Kanten, die in einem anderen Modell nicht genau wieder ansprechbar waren); Numerierungsfehler konnten aufgedeckt und korrigiert werden.

4.5 Da lange Koordinatenverzeichnisse sehr unübersichtlich und schwierig zu interpretieren sind, wurde im fünften Arbeitsschritt ein Programm entwickelt, das die bisher gewonnenen Ergebnisse leicht überblickbar auf dem Schnelldrucker darstellt.

Aufbauend auf die nach Matrizenschema organisierte Punktnumerierung können Gruppen homologer Punkte (z.B. Fensterstöcke, Baukörper etc.) durch Definition eines Teilrasters (Angabe einer Auswahl von Zeilen- bzw. Spaltenindizes) simultan behandelt werden: Auf Wunsch können die Abweichungen der Einzelpunkte von den Mittelwerten der x-(resp.y-)Koordinaten einer Spalte (resp. Zeile) der geometrischen Anordnung entsprechend ausgedruckt werden (Abb.6, Abb.7).

Für die Bestimmung des Mittelwertes kann auch nur eine Teilmenge der Zeilen (resp. Spalten) des Teilrasters herangezogen werden. Man erkennt deutlich, auf welche Seite der (mittleren) Geraden und wie weit von ihr entfernt ein bestimmter Punkt liegt. Fehlende (nicht beobachtete) Punkte scheinen nicht auf.

Es ist aber auch möglich, für die ausgewählten Spalten (Zeilen) aus einem Bauplan entnommene Sollkoordinaten vorzugeben. Nach einer Translation um die Differenz der jeweiligen Schwerpunktskoordinaten, werden analog zu oben "absolute" Abweichungen ausgedruckt.

Weiters bietet das Programm die Möglichkeit, die Abstände von Punkten bezüglich einer beliebigen, durch 3 Punkte definierten Ebene, auszugeben.

Abb.8 zeigt die Abweichungen einer Punktauswahl bezüglich einer lotrechten, zur Fassade etwa parallelen Ebene; oberhalb der (zeilenweisen) Bezugslinie gelegene Werte stehen für Punkte hinter der Vergleichsebene, unterhalb stehende für solche vor ihr.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	19.051	20.327	20.354	22.658	22.685	23.524	23.539	24.334	24.364	25.697	25.726	26.418	26.448	27.774	27.911	
	1.276	.027	2.304	.028	.839	.015	.795	.031	1.332	.029	.692	.030	1.326	.036		
204	4!	!	!	!	!	!25	!29	!	!	!	!	!	!	!	!	204
205	!	!10	!	!0!	!9	!	!	!0	!2	!5	!5	!6!	!4!	!1!	!16!	205
207	!4	!	!	!	!	!6!	!7!	!	!	!	!	!	!	!	!	207
208	!	!11	!	!0	!11	!	!	!9	!4	!2	!10	!12	!	!2!	!10	208
210	15!	!	!	!	!	!21!	!9!	!	!	!	!	!	!	!	!	210
211	!	!2	!	!	!6	!	!	!2!	!1	!0	!2!	!0!	!5	!6	!1	211
213	!6	!	!	!	!	!9!	!5!	!	!	!	!	!	!	!	!	213
214	!	!13!	!0	!	!14!	!	!	!6!	!0	!3!	!9!	!5	!	!1!	!3	214
216	!5	!	!	!	!	!3!	!0	!	!	!	!	!	!	!	!	216
217	!	!7!	!	!1	!10!	!	!	!1	!6!	!1!	!1!	!1!	!	!0	!3	217
219	!6	!	!	!	!	!18	!5!	!	!	!	!	!	!	!	!	219
220	!0	!16!	!	!	!16!	!	!	!11	!	!	!12!	!1!	!	!	!16!	220
222	!6!	!	!	!	!	!37	!34	!	!	!	!	!	!	!	!	222
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	

Abb. 6: Beispiel eines Computerausdruckes für die x-Abweichungen in mm von den oben angegebenen, spaltenweisen Mittelwerten. (Gemittelt über die Zeilen 4 bis 19; links stehende Abweichungen werden (fälschlich) um 1 mm vermindert ausgedruckt).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
204	26.527						1								
	16					5									
205	-0.608	42		3	37		32		9	4	44	25		3	39
	25.918												5		
207	-2.145					1	14								
	23.773														
208	-0.609	35			42		36		9	5	33	35		5	27
	23.164			0											
210	-2.141						11								
	21.023					4									
211	-0.606	31			35		30		5	1	36	36		3	28
	20.417														0
213	-2.147					4	7								
	18.270														
214	-0.603	35			41		41		3	56	47				42
	17.666		2						2						2
216	-2.144					16	6								
	15.522														
217	-0.601	21			30		32		9		32	34			35
	14.921			6						1					2
219	-2.146					2	0								
	12.775														
220	-0.605	3	23		15		97				95	96			99
	12.170														
222	-2.251					3	5								
	9.919														
	16														

Abb. 7 : Beispiel eines Computerausdruckes für die y-Abweichungen in mm von den links angegebenen y-Mittelwerten. (Gemittelt über die Spalten 1, 3, 4, 9, 10, 13, 14, 19, 20, 22).

ABSTAEUNDE VON DER EBENE DURCH DIE PUNKTE

NR	X	Y	Z	VERSCHIEBUNGEN		
10010000	5.156	25.890	-.007	-0.000	-0.000	.007
30050000	47.173	10.603	-.001	-0.000	-0.000	.001
30010000	5.119	10.151	-.002	-0.003	-0.000	.002
PARAMETER DER EBENE.0000225772114808 .00005433436688448 .999999998269 .001160133833523						

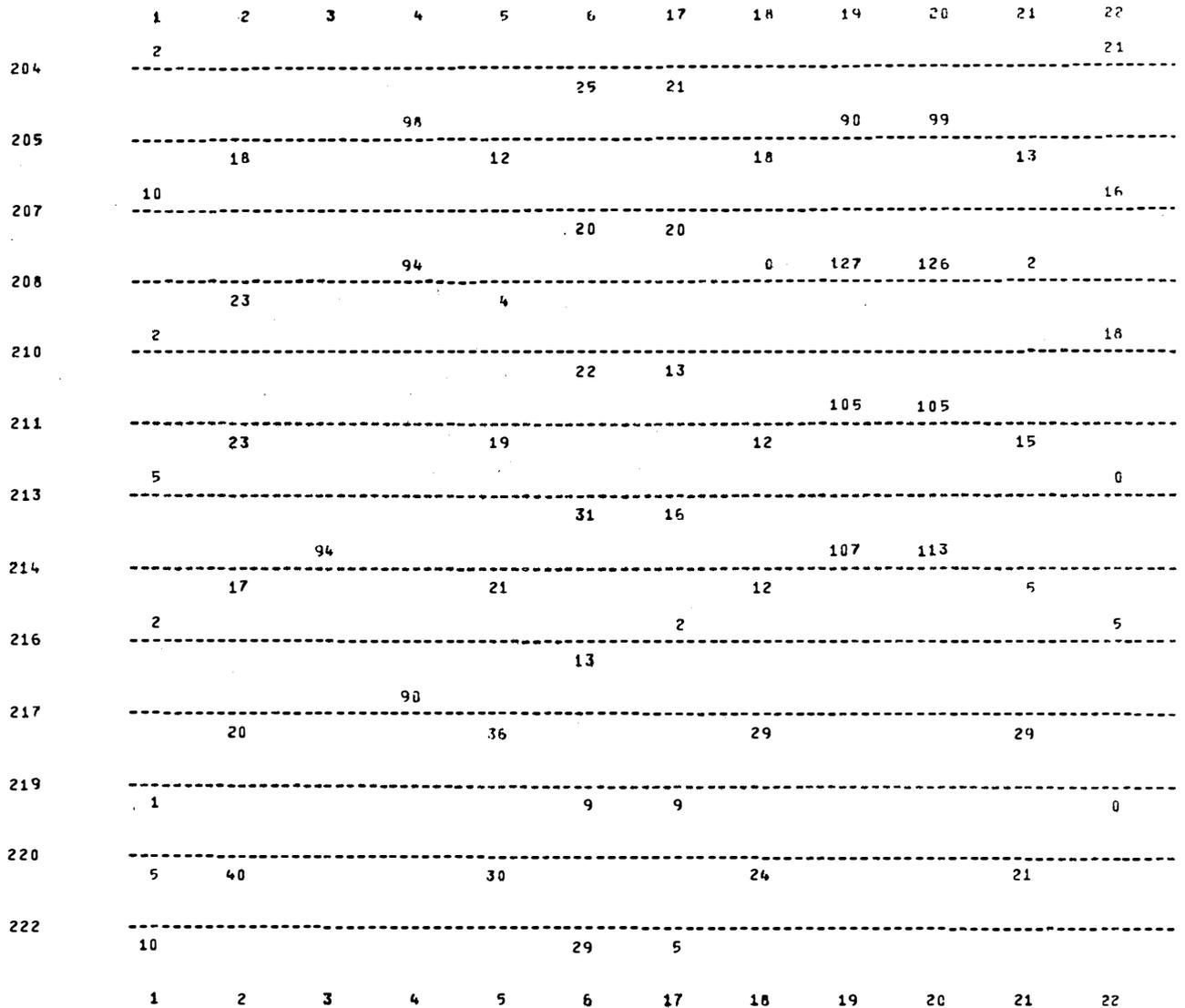


Abb. 8: Beispiel eines Computerausdruckes für die Abweichungen der Fassadenpunkte von einer durch die oben angegebenen Parameter definierten Ebene.

Bei der Konzeption dieses Programms ist auch noch eine zweite Aufgabe beachtet worden, nämlich der Einsatz der terrestrischen Präzisionsphotogrammetrie für die Fassadenvermessung zum Zweck von Fassadenverkleidungen mit Großplatten oder Großtafeln, eine Aufgabe, der für Wärmeschutz (Energiesparung) und Umweltschutz große praktische Bedeutung zukommt. Über unsere schon umfangreichen praktischen Erfahrungen im Zusammenhang mit dieser Aufgabenstellung soll an anderem Orte ausführlicher berichtet werden.

5. ANALYSE DER ERGEBNISSE

Ausgehend von den Protokollen von 4.5 wurden nun statistische Aussagen über die Genauigkeit der beiden Bauweisen (konventioneller Ziegelbau - Proktor Fertigteilbau) abgeleitet. Dabei mußte berücksichtigt werden, daß in den ausgedruckten Abweichungen nicht nur die tatsächlichen Bauungenauigkeiten, sondern auch die photogrammetrischen Meßfehler enthalten sind. Letztere konnten aus den Abweichungen der Fensterstocklichten von den Normmaßen geschätzt werden. Ohne Rücksicht auf Vollständigkeit werden im folgenden einige Aspekte aufgezeigt:

5.1 Einhaltung der Planmaße

Koordinatenweise wurde für jede Fassade die Streuung der Abweichungen von den Sollkoordinaten getrennt nach Baukörperpunkten, Fenstermauerpunkten und Fensterstockpunkten (vgl.3.) berechnet und in Tabellen zusammengefaßt (Abb.9). Mit Hilfe des F-Tests wurde über die Signifikanz der Genauigkeitsunterschiede geurteilt und angegeben, bis zu welcher Wahrscheinlichkeit die Unterschiede signifikant erscheinen.

Die Abb.10 und 11 zeigen Histogramme der empirischen Verteilung von Abweichungen am Beispiel der Δx -Abweichungen der Baukörperpunkte der beiden Versuchsbauten.

5.2 Einhaltung der Lotrichtung bzw. der Horizonte

Die Untersuchung wurde analog zu 5.1 aus den Abweichungen von den spalten-(zeilen-)weisen Mittelwerten durchgeführt.

Koordinatenabweichungen von den Plan-(Soll-)Koordinaten																			
		Baukörperpunkte						Fenstermauerpunkte						Fensterstockpunkte					
		r_x	s_x	r_y	s_y	r_z	s_z	r_x	s_x	r_y	s_y	r_z	s_z	r_x	s_x	r_y	s_y	r_z	s_z
S Ü D B A U																			
Baukörper 1	s_1	41	6,9	41	14,0	41	6,3	42	12,0	43	10,3	47	8,2	42	7,9	39	6,3	42	6,8
Baukörper 2	s_2	39	7,7	39	17,1	38	5,8	45	13,2	43	9,8	47	8,6	29	11,4	29	5,9	29	7,7
Baukörper 3	s_3	39	8,6	39	11,5	39	6,6	45	8,4	43	9,0	47	6,5	43	6,1	39	8,0	43	7,2
Ganze Fassade	s	119	7,8	118	14,4	120	6,3	132	11,4	129	9,7	143	7,7	114	8,4	107	6,9	116	7,8
Phot.Fehler	s_p		1,2		1,8		3,5		1,2		1,8		3,5		1,2		1,8		3,5
Baufehler allein	s_B		<u>7,7</u>		<u>14,3</u>		<u>5,2</u>		<u>11,3</u>		<u>9,5</u>		<u>6,9</u>		<u>8,3</u>		<u>6,7</u>		<u>7,0</u>
Größter Fehler		+19		+31		+28		+32		+72		+42		+20		+16		-44	
Kleinster Fehler		-22		-21		- 5		-26		+24		- 4		-15		-16		-78	
Differenz		41		52		33		58		48		46		35		32		34	
N O R D B A U																			
Baukörper 1	s_1	40	11,8	41	8,4	41	11,3	47	9,6	41	5,7	47	7,3	32	8,8	32	5,1	32	7,4
Baukörper 2	s_2	39	14,4	40	12,7	40	15,1	47	11,2	43	8,0	47	10,0	28	6,3	28	5,7	28	12,8
Baukörper 3	s_3	38	18,4	38	10,4	38	12,0	47	11,9	41	8,3	47	9,6	15	10,3	15	4,8	15	13,0
Ganze Fassade	s	117	15,1	119	10,6	121	13,2	141	10,9	125	7,4	143	9,1	75	8,3	75	5,3	77	11,3
Phot.Fehler	s_p		2,5		2,5		3,5		2,5		2,5		3,5		2,5		2,5		3,5
Baufehler allein	s_B		<u>14,9</u>		<u>10,3</u>		<u>12,7</u>		<u>10,6</u>		<u>7,0</u>		<u>8,4</u>		<u>7,9</u>		<u>4,7</u>		<u>10,7</u>
Größter Fehler		+38		+19		+31		+30		+75		+27		+38		+14		-55	
Kleinster Fehler		-36		-31		-31		-27		+19		- 8		-17		-14		-127	
Differenz		74		50		62		57		56		35		55		28		72	
F - T E S T																			
Wahrscheinlichkeit %		1,92		1,39		2,44		1,07		1,36		1,22		1,05		1,43		1,53	
		<u>99</u>		<u>99</u>		<u>99</u>		50		<u>99</u>		<u>95</u>		50		<u>99</u>		<u>99</u>	

Abb. 9: Prüfung der Einhaltung der Planmaße mittels F-Test.
(Fehlermaße in [mm], r Redundanz, s Standardabweichungen).
Die z-Fehler beziehen sich auf die Bezugsebenen für die Baukörperpunkte der Fassaden.

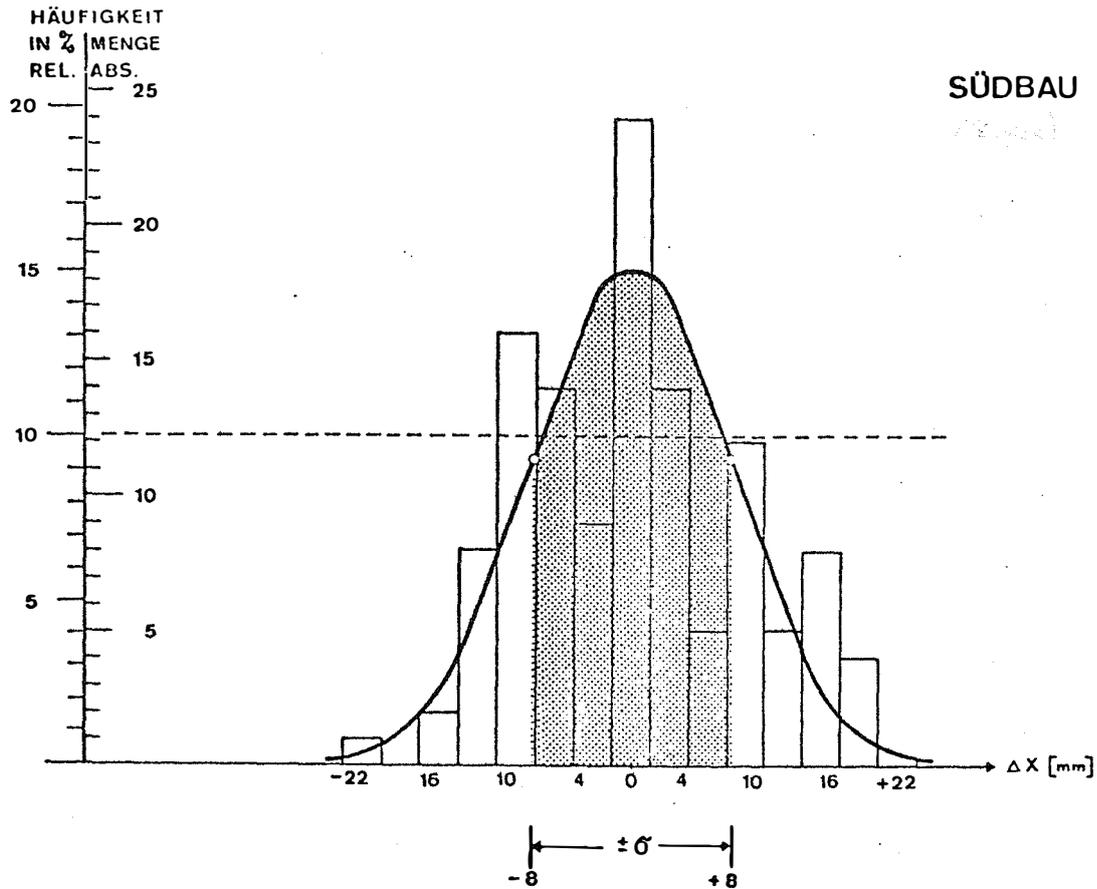


Abb. 10: Histogramm der Abweichungen Δx der an den Baukörperpunkten des Südhauses festgestellten x -Koordinaten gegenüber denen nach Bauplan.

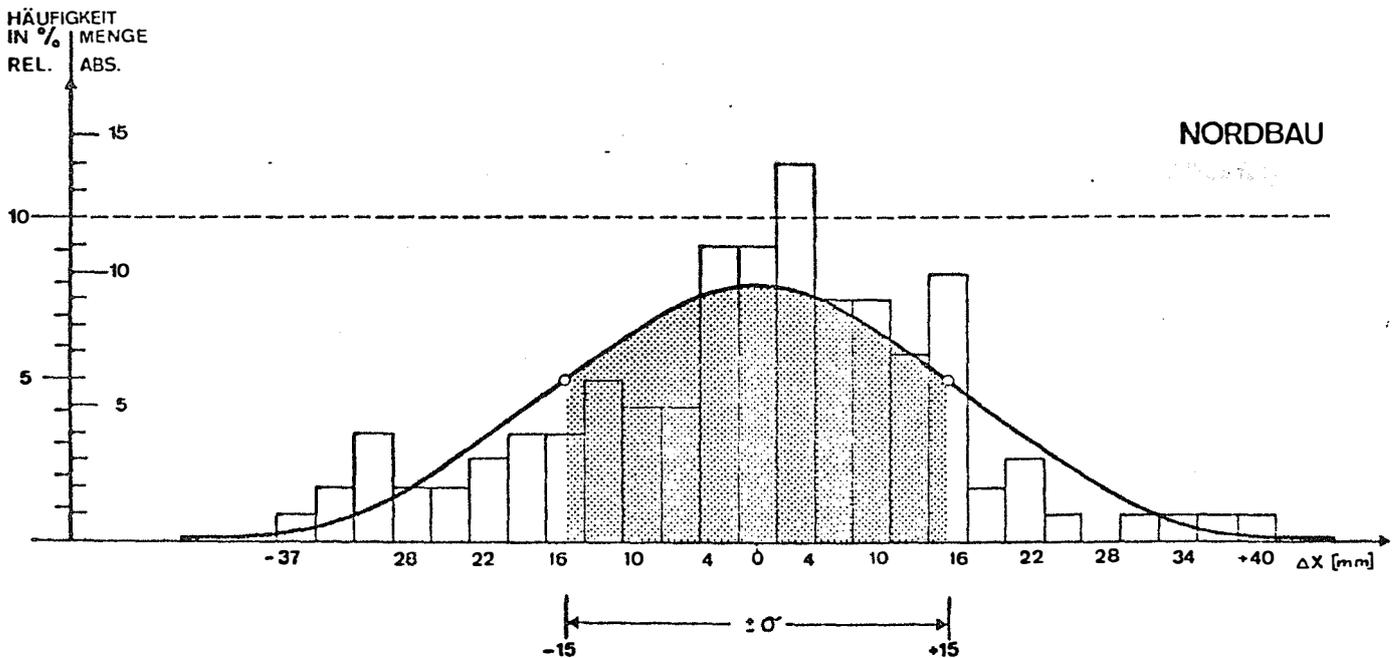


Abb. 11: Histogramm der Abweichungen Δx der an den Baukörperpunkten des Nordhauses festgestellten x -Koordinaten gegenüber denen nach Bauplan.

5.3 Lichte und Sturz des Fenstermauerwerks und der Fensterstöcke

Die Abweichung einer Lichte errechnete sich als Differenz der x-Abweichungen gegenüber den Sollkoordinaten zusammengehörender Punkte. Der Sturz folgte analog aus der Differenz der y-Abweichungen. Die Ergebnisse wurden in ähnlicher Weise wie für Abb.9 statistisch betrachtet.

Zunächst war besonders auffallend, daß die photogrammetrische Auswertung der Fensterstocklichten systematisch zu kurz ausfiel. Dies mag seinen Grund darin haben, daß der Auswerter die Meßmarke auf den Schnitt der Mitten der beiden den Fensterstock begrenzenden hellen Linien eingestellt hat, die nicht die Stockkante, sondern das Bild der Stockinnenflächen wiedergeben.

Die Messungen wurden daraufhin stichprobenartig wiederholt, wobei sich der Auswerter diesmal der Sache bewußt war. Der statistische Mittelwert der 20 gemessenen Stocklichten war nun um 1,4 mm systematisch länger, ein Beweis dafür, daß die richtige Punkterfassung eine Rolle spielt. Die schwach kontrastierenden Fensterstockecken sind jedenfalls keine idealen Ziele für die photogrammetrische Meßmarkeneinstellung. Konsequenterweise werden in der Zukunft sicher einstellbare, vorbereitete Signale (gestempelt, gespritzt, geklebt oder genagelt) Verwendung finden müssen - ein sicher notwendiger Aufwand für Auswertungen höchster Präzision, vor allem, wenn sie für Absteckungszwecke verwendet werden sollen.

Die Standardabweichungen $s_x = \pm 1,7$ mm der Fensterstocklichten des Südbaues ließen auch eine relativ zuverlässige Abschätzung der tatsächlichen Meßgenauigkeit zu. Die mittlere Koordinatenmeßgenauigkeit in x-Richtung ergab sich dort zu $\pm 1,2$ mm.

Es wurde auch versucht, die Ergebnisse auf anderem Weg zu bestätigen. Zur Aufklärung großer Abweichungen wurden vereinzelt Kontrollmessungen vorgenommen. So wurden bei jeder Fassade 4 "Spalten" mit WILD T2 abgelotet und die x-Abweichungen von dem Lot über die Horizontalwinkelabweichungen geprüft. Daraus ergaben sich praktisch übereinstimmende Werte mit den vorher photogrammetrisch erhaltenen. Gleich überzeugend waren zwei Kontrollnivelements in je 2 Wohnungen beider Bauten.

6. ZEIT- UND KOSTENAUFWAND FÜR EINE PHOTOGRAMMETRISCHE FASSADENVERMESSUNG

In den Tabellen 1 und 2 wurden der Zeit- wie der Kostenaufwand, in Tabelle 3 die erforderliche Ausrüstung zusammengestellt. Wenngleich die Arbeiten an den Versuchsbauten Gerichtsgasse unter hochschulmäßigen Nebenbedingungen erfolgte, wurde doch versucht, eine für ähnliche Fälle gültige, praxisgerechte Hochrechnung zu geben. Es zeigt sich, daß der Kostenaufwand stark von der Punktdichte abhängt. Das für die Ausführung notwendige Instrumentarium verlangt eine nicht unbedeutende Investition. Falls hohe Fassaden nicht von gegenüberliegenden Gebäuden aus photogrammetrisch aufgenommen werden können, weil es keine solchen gibt oder der Zugang zu ihnen nicht möglich ist, sind zweckmäßigerweise Gelenksteiger einzusetzen, deren Kosten ebenso wie allfällige andere Sonderkosten zusätzlich zu kalkulieren sind. Zu diesen Sonderkosten gehört auch der Aufwand für die Signalisierung der Detailpunkte, die im Zuge der Bau- bzw. Anstreicherarbeiten zur Erzielung eines minimalen Aufwandes berücksichtigt werden können.

Punktdichte	Kosten /m ²
1 Punkt / 4 m ² ...	35.-
1 Punkt / 3 m ² ...	37.-
1 Punkt / 2 m ² ...	42.-
1 Punkt / m ² ...	56.-

Tab. 2: *Kosten pro Flächeneinheit*

Theodolit: 2 WILD T2 mit Polygonalausrüstung	100.000.-
Entfernungsmesser: 1 WILD DI3	100.000.-
1 100m Stahlmaßband	-
Meßkammern: 1 WILD P31	200.000.-
oder	
1 JENA UMK 10/1318 F	300.000.-
Dunkelkammerausrüstung: Format 13 x 18, professionell	200.000.-
Stereokomparator: 1 WILD STK1 mit EK6 und SL15	1,800.000.-
Kleinrechner: 1 Hewlett Packard HP-65	20.000.-
Großrechner: CPU mit mindestens 128 K Bytes	

Tab. 3: *Zusammenstellung der erforderlichen Ausrüstung und deren Anschaffungskosten.*

Arbeitsphase	Nebenkostenart	Innen- oder Außendienst	Personalgruppe u.-anzahl	Kosten pro Tag	Zeit- Aufwand	
					in Tagen	ö.S.
Vorbegehung	Material	A	1 A	3.200.-	1	3.200.-
Planung		I/A	1 A	2.500.-	1	2.500.-
Signalisierung der Paßpunkte		A	1 C	1.600.-	2	3.200.-
Paßpunktmessung und photogramm. Aufnahme		A	2 B	2.000.-	3	12.000.-
		A	2 C	1.600.-	3	9.600.-
		Instrumente		1.500.-	3	4.500.-
Photographie	Dunkelkammer	I	1 C	1.700.-	1	1.700.-
Paßpunktbe- rechnung		I	1 B	1.600.-	1	1.600.-
Bildkoordinaten- messung	Stereokom- parator	I	1 B	1.600.-	$\Sigma_1 = 38.800.-$	
					4	6.400.-
					4	9.600.-
Datenver- arbeitung	Computer	15.-S/Punkt, für 1.500 Punkte				22.500.-
					$\Sigma_2 = 38.500.-$	
Flächenleistung	1.500 m ² , (1,08. Σ_1 : 1.500) = 28.-/m ² für Aufnahme					
Punktleistung	1.500, (1,08. Σ_2 : 1.500) = 28.-/Pkt. für Auswertung					

Tab. 1: Zeit- und Kostenaufwand (inkl. 8 % Mehrwertsteuer) für eine photogrammetrische Fassadenvermessung von Art und Güte des vorliegenden Projektes.

(Personal: A = Diplomingenieur
B = Mittelschulingenieur
C = Techniker

SCHRIFTTUM :

- OPEKA, G.: Untersuchung über die Einsatzmöglichkeit der Blockausgleichung in Österreich
Diss. an der Technischen Universität Wien, 1974.
- RINNER, K.: Jordan-Eggert-Kneißl
Handbuch der Vermessungskunde III a 1, § 8.

Geowiss. Mitt.

8, 1976, S.113 - 133

GEMEINSAME AUSGLEICHUNG PHOTOGRAMMETRISCHER, GEODÄTISCHER
UND FIKTIVER BEOBACHTUNGEN

von

H. Kager und K. Kraus

Adresse der Autoren:

Dipl.-Ing.H. Kager und Prof.Dr.K. Kraus, Institut für Photogrammetrie der
Technischen Universität Wien, 1040 Wien, Gußhausstraße 27-29, Österreich

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Beweissicherung bei Verkehrsunfällen greift man häufig auf Amateuraufnahmen zurück. Das Ergebnis der photogrammetrischen Auswertung wird im allgemeinen in der Form eines Sachverständigengutachtens dem Gericht vorgelegt. Am Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität Wien werden jährlich ca. 20 Gutachten angefertigt.

Die Amateuraufnahmen wurden bisher mit Hilfe graphischer Methoden ausgewertet. Zur Leistungssteigerung des Verfahrens wird gegenwärtig ein Computerprogramm entwickelt, das die gemeinsame Ausgleichung photogrammetrischer, geodätischer und fiktiver Beobachtungen erlaubt. Als Eingangsdaten kommen insbesondere in Frage:

- Am Komparator gemessene Bildkoordinaten.
- Cartesische Koordinaten dreidimensionaler Punkthaufen (Paßpunkte, unabhängige photogrammetrische Modelle, digitale Fahrzeugmodelle usw.).
- Geodätische Beobachtungen (Richtungen, Strecken, Abbildungen usw.).
- Geometrische Zusatzinformationen (Lot- und Fluchtlinien, parallele und normale Geraden bzw. Ebenen).

Dabei wird den Amateuraufnahmen ein mathematisches Modell zugeordnet, das mit Hilfe zusätzlicher Parameter die verschiedenartigen systematischen Fehlereinflüsse zu erfassen erlaubt.

Obwohl das Konzept des Programms zunächst auf die Auswertung von Amateuraufnahmen zur Beweissicherung bei Verkehrsunfällen ausgerichtet ist, kann es für viele andere photogrammetrische Problemstellungen eingesetzt werden. Der Schwerpunkt liegt auf der Auswertung hybrider Messungen und der Beherrschung unkonventioneller Aufnahmedispositionen.

ABSTRACT

For the evidence recording of traffic accident scenes amateur photos are often referred to. The result of photogrammetrical evaluation is generally submitted to the law court in the form of an expert opinion. At the Institute of Photogrammetry of Vienna Technical University approximately 20 experts' reports are produced annually.

Until recently amateur photos were analysed by means of graphic methods. In order to boost the efficiency of the procedure, a computer program is now being elaborated, permitting the simultaneous adjustment of photogrammetric, geodetic and fictitious observations. The relevant input data are as follows:

- Picture coordinates measured on the comparator.
- Cartesian coordinates of threedimensional point configurations (control points, independent photogrammetric models, digital vehicle models etc.).
- Geodetic observations (directions, distances, lengths of normals etc.).
- Additional geometrical information (plumb lines, straight lines, parallel and orthogonal lines and planes respectively).

A mathematical model that permits the recording of various systematic errors by means of additional parameters is related to the amateur photos.

Although the program has conceptually been directed towards the evaluation of amateur photos for evidence recording after traffic accidents, it may be applied to many other photogrammetrical problems. The emphasis is on the evaluation of hybrid measurements and unconventional photographing-dispositions.

1. EINLEITUNG

In der Photogrammetrie und Geodäsie wurden in den letzten Jahren leistungsfähige Computerprogramme entwickelt, die vor allem auf die Bewältigung großer Datenmengen ausgerichtet sind. So ist es heute keine Sensation mehr, wenn tausend und mehr Bilder bzw. unabhängige photogrammetrische Modelle in einem Guß ausgeglichen werden. Ähnliche Datenmengen beherrscht man auch bei Winkel- und Streckennetzausgleichungen in der Geodäsie.

Die Bewältigung großer Datenmengen wurde vor allem durch die Einschränkung auf jeweils eine Gruppe von Beobachtungen (z.B. Bild- oder Modellkoordinaten oder Winkel und Strecken) erkaufte. Zur Lösung vielschichtiger Aufgabenstellungen ist diese Monostruktur der Eingabedaten aber aufzugeben und die Verarbeitung hybrider Meßdaten und sonstiger Zusatzinformationen vorzusehen. Die heterogene Struktur der zu verarbeitenden Ausgangsinformation und die Vielfalt ihrer Verknüpfungen erfordert allerdings einen verhältnismäßig hohen Rechenaufwand.

In diesem Aufsatz wird das Konzept eines Computerprogrammes vorgestellt, das die gemeinsame Ausgleichung photogrammetrischer, geodätischer und fiktiver Beobachtungen erlaubt. Das Konzept wird anhand der Auswertung von Amateuraufnahmen zur Beweissicherung bei Verkehrsunfällen erläutert. Diese Problemstellung wurde deshalb gewählt, weil sie einerseits einen hohen Grad an Allgemeinheit besitzt und zum anderen auf diesem Gebiet am Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität Wien gewisse Erfahrungen vorliegen. Von Mitarbeitern des Institutes werden nämlich jährlich auf der Basis von Amateuraufnahmen ca. 20 den Gerichten vorzulegende Sachverständigengutachten angefertigt.

Bisher werden die Aufnahmen mit Hilfe graphischer Methoden und teilweise mit speziellen Computerprogrammen /5/ ausgewertet. Von der Entwicklung eines universelleren Ausgleichungsprogrammes verspricht man sich eine bedeutende Leistungssteigerung und in manchen Fällen auch eine Verbilligung der Sachverständigengutachten.

2. DAS MATHEMATISCHE MODELL

Alle auszuwertenden Punkte des zahlenmäßig zu beschreibenden Objektes werden in einem dreidimensionalen Koordinatensystem X, Y, Z festgelegt. Diese Punkte stellen die Elemente des Objektraumes bzw. Referenzsystemes R dar. Zum Objektraum R gehören auch Hilfspunkte, z.B. die Projektionszentren der einzelnen photographischen Aufnahmen und sogenannte Verknüpfungspunkte, die in mindestens zwei und mehr Bildern identifiziert werden können.

Zur Bestimmung der Punkte im Objektraum werden verschiedenartige Beobachtungen herangezogen. Diese Beobachtungen bilden - zusammen mit ihrer Gewichtsmatrix - entsprechend ihrer Herkunft die Elemente der einzelnen Beobachtungsräume \bar{B}_i (z.B. die Bildpunkte jeweils einer Aufnahme, die Richtungen eines Satzes, die Punkte einer Ebene).

Den Zusammenhang zwischen Beobachtungsräumen \bar{B}_i und dem Objektraum R bilden verschiedene Funktionen f_i . Die darin neben den Elementen der Beobachtungsräume \bar{B}_i und des Objektraumes R auftretenden Parameter werden als Elemente eines oder mehrerer Parameterräume P_k erklärt.

Anhand verschiedener Funktionen f_i wird im folgenden der Aufbau der Räume \bar{B}_i, P_k, R und die Struktur ihrer Verknüpfungen besprochen. Die Funktionen f_i werden - ausgehend von den mathematischen Beziehungen zwischen den wahrscheinlichsten (ausgeglichenen) Werten der Elemente der Beobachtungsräume und den unbekanntem Parametern - in Form von Verbesserungsgleichungen im Sinne einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen formuliert. Bei der Auswahl der Funktionen wird dabei mehr auf die geometrische Anschaulichkeit und weniger auf die mathematische Eleganz geachtet. Auf diese Weise wird die Benutzung des Programmes - vor allem im Hinblick auf die Lokalisierung grober Datenfehler - erleichtert.

2.1 Amateurphotos als Beobachtungsräume

Ein Bildpunkt (ξ, η) und ein Objektpunkt (X, Y, Z) hängen über die bekannten Beziehungen zusammen:

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_o - c \frac{d_{11}(X - X_o) + d_{21}(Y - Y_o) + d_{31}(Z - Z_o)}{d_{13}(X - X_o) + d_{23}(Y - Y_o) + d_{33}(Z - Z_o)} \\ \eta &= \eta_o - c \frac{d_{12}(X - X_o) + d_{22}(Y - Y_o) + d_{32}(Z - Z_o)}{d_{13}(X - X_o) + d_{23}(Y - Y_o) + d_{33}(Z - Z_o)} \end{aligned} \quad (1)$$

Dabei bedeuten:

- ξ_o, η_o, c Lage des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem
- X_o, Y_o, Z_o Lage des Projektionszentrums im Objektraum
- d_{ik} Elemente einer aus drei unabhängigen Parametern α, β und γ gebildeten räumlichen Drehmatrix D

Für die Photographie i bilden alle Bildpunkte mit ihren beobachteten Koordinaten $\bar{\xi}, \bar{\eta}$ (zur Unterscheidung von ihren ausgeglichenen bzw. wahrscheinlichsten Werten mit einem Querstrich versehen) den Beobachtungsraum \overline{PHO}_i . Die zu den Bildpunkten homologen Objektpunkte (X, Y, Z) und das Projektionszentrum (X_o, Y_o, Z_o) der jeweiligen Aufnahme sind Elemente des Objektraumes R .

Jeder Aufnahme ist sowohl ein Parameterraum $ORI_k = \{\xi_o, \eta_o, c\}$ der inneren Orientierung als auch ein Drehparameterraum $DRE_j = \{\alpha, \beta, \gamma\}$ zugeordnet. Liegen mehrere Aufnahmen der gleichen Kammer vor, können alle diese Aufnahmen mit einem gemeinsamen Parameterraum ORI_k der inneren Orientierung assoziiert werden. In gleicher Weise kann man durch Zuordnung eines Drehparameterraumes DRE_j zu mehreren Aufnahmen die Parallelität der entsprechenden Bildkoordinatensysteme erzwingen.

Jedes Element $(\bar{\xi}, \bar{\eta})$ eines Beobachtungsraumes \overline{PHO}_i führt durch Linearisierung der Funktionen (1) zu folgendem Paar von Verbesserungsgleichungen:

$$\begin{pmatrix} v_\xi \\ v_\eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \frac{\partial \xi}{\partial c} \\ 0 & 1 & \frac{\partial \eta}{\partial c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\xi_o \\ d\eta_o \\ dc \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial \alpha} & \frac{\partial \xi}{\partial \beta} & \frac{\partial \xi}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial \eta}{\partial \alpha} & \frac{\partial \eta}{\partial \beta} & \frac{\partial \eta}{\partial \gamma} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\alpha \\ d\beta \\ d\gamma \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial X} & \frac{\partial \xi}{\partial Y} & \frac{\partial \xi}{\partial Z} \\ \frac{\partial \eta}{\partial X} & \frac{\partial \eta}{\partial Y} & \frac{\partial \eta}{\partial Z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dX - dX_o \\ dY - dY_o \\ dZ - dZ_o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \xi^o - \bar{\xi} \\ \eta^o - \bar{\eta} \end{pmatrix} \quad (2)$$

ξ^o und η^o sind jene Funktionswerte, die mit Näherungsgrößen (im folgenden mit einer hochgestellten Null bezeichnet) aus den Funktionen (1) berechnet werden.

Sind Informationen über die innere Orientierung einer Aufnahmekammer bekannt, so bilden diese einen eigenen Beobachtungsraum $\overline{\text{ORI}}_k$, dessen Elemente mit Hilfe der Identitätsfunktion

$$\begin{aligned} v_{\xi_0} &= d\xi_0 + (\xi_0^0 - \bar{\xi}_0) \\ v_{\eta_0} &= d\eta_0 + (\eta_0^0 - \bar{\eta}_0) \\ v_c &= dc + (c^0 - \bar{c}) \end{aligned} \quad (3)$$

dem Parameterraum ORI_k zugeordnet werden. Dabei berücksichtigen die Gewichte p_{ξ_0} , p_{η_0} und p_c die Stabilität der Aufnahmekammer und die Güte der Kalibrierungsmethode. Sie können zwischen Null (Amateuraufnahme mit unbekannter innerer Orientierung) und einem Wert gegen Unendlich (Aufnahme mit einer kalibrierten Meßkammer) variieren.

Wenn zu den Amateurphotographien noch später aufgenommene Meßbilder hinzugefügt werden, so stabilisieren diese die Geometrie der gesamten Ausgleichung. Insbesondere kann man durch Meßbilder die Verknüpfung isolierter Amateuraufnahmen erreichen bzw. die Feldarbeit zur Paßpunktbestimmung reduzieren.

Zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen den Bildkoordinaten (ξ, η) und den Objektkoordinaten (X, Y, Z) sind für Amateuraufnahmen die Funktion (1) im allgemeinen nicht leistungsfähig genug. Man muß vielmehr weitere Parameter für die Objektivverzeichnung und für den Filmschrumpf sowie für sonstige systematische Fehlereinflüsse vorsehen. Diese Parameter erweitern den Parameterraum ORI_k der inneren Orientierung.

Für radial zum Bildhauptpunkt wirkende Einflüsse $\Delta\rho$ kommt ein Polynom der Form

$$\Delta\rho = \rho e_0 + \rho^2 e_1 + \rho^3 e_2 + \dots \quad (4)$$

in Frage. Das erste Glied des Polynomes ist einer Änderung der Kammerkonstanten c äquivalent und ist in der Verbesserungsgleichung v_c des Systemes (3) bereits berücksichtigt. Die Projektionen der weiteren Glieder auf die beiden Koordinatenachsen ξ und η lauten:

$$\begin{aligned} \Delta\xi &= \Delta\rho \frac{\xi - \xi_0}{\sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (\eta - \eta_0)^2}} \\ &= ((\xi - \xi_0) \sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (\eta - \eta_0)^2}) e_1 + ((\xi - \xi_0)^3 + (\xi - \xi_0)(\eta - \eta_0)^2) e_2 \\ \Delta\eta &= \Delta\rho \frac{\eta - \eta_0}{\sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (\eta - \eta_0)^2}} \\ &= ((\eta - \eta_0) \sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (\eta - \eta_0)^2}) e_1 + ((\xi - \xi_0)^2(\eta - \eta_0) + (\eta - \eta_0)^3) e_2 \end{aligned} \quad (5)$$

In Richtung der Koordinatenachsen wirkende Einflüsse erfaßt man mit Polynomen der Art:

$$\begin{aligned} \Delta\xi &= \xi_0 + \xi f_1 + \eta f_2 + \xi^2 f_3 + \xi \eta f_4 + \eta^2 f_5 \dots \\ \Delta\eta &= \eta_0 + \xi g_1 + \eta g_2 + \xi^2 g_3 + \xi \eta g_4 + \eta^2 g_5 \dots \end{aligned} \quad (6)$$

Für praktische Berechnungen ist infolge der Korrelationen zwischen den einzelnen Koeffizienten und der Korrelationen mit Parametern der äußeren Orientierung im Gleichungssystem (2) nur eine Auswahl zulässig (z.B./2/,/3/).

Formal sind die Glieder der Systeme (5) und (6) zusammenzufassen und anstelle der Parameter $d\xi_0$ und $d\eta_0$ in (2) einzufügen:

$$\begin{aligned} d\xi_0 &:= \frac{\partial \xi}{\partial \xi_0} d\xi_0 + \bar{\xi} f_1 + \bar{\eta} f_2 + \bar{\xi}^2 f_3 + \bar{\xi} \bar{\eta} f_4 + \bar{\eta}^2 f_5 + \frac{\partial \xi}{\partial e_1} de_1 + \frac{\partial \xi}{\partial e_2} de_2 \\ d\eta_0 &:= \frac{\partial \eta}{\partial \eta_0} d\eta_0 + \bar{\xi} g_1 + \bar{\eta} g_2 + \bar{\xi}^2 g_3 + \bar{\xi} \bar{\eta} g_4 + \bar{\eta}^2 g_5 + \frac{\partial \eta}{\partial e_1} de_1 + \frac{\partial \eta}{\partial e_2} de_2 \end{aligned} \quad (7)$$

Damit vergrößert sich der Parameterraum ORI_k der inneren Orientierung um Parameter e, f, g .

Um die Auswirkung dieser Korrekturpolynome in Grenzen zu halten, empfiehlt es sich, die Koeffizienten e, f, g als Pseudobeobachtungen einzuführen. Mit Hilfe der Identitätsfunktion wird der entsprechend erweiterte Beobachtungsraum \overline{ORI}_k der inneren Orientierung analog zu (3) mit dem Parameterraum ORI_k verbunden:

$$\begin{aligned}
 v_{e_i} &= de_i + (e_i^0 - \bar{e}_i) & i=1-2 \\
 v_{f_i} &= f_i - \bar{f}_i & i=1-5 \\
 v_{g_i} &= g_i - \bar{g}_i & i=1-5
 \end{aligned} \tag{8}$$

2.2 In cartesischen Koordinaten festgelegte Punkthaufen als Beobachtungsräume

Liegt ein in einem Analogauswertegerät gebildetes photogrammetrisches Modell vor, wird dieser Beobachtungsraum $\overline{\text{MOD}}_i$ mittels einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation mit dem Objektraum R verknüpft. In gleicher Weise können auch rechnerisch - insbesondere aus Bildpaaren von Stereomeßkamern - gebildete Modelle einbezogen werden.

Von ganz anderer Herkunft - aber mathematisch von der gleichen Struktur - sind digitale Modelle, die an Fahrzeugen identifizierbare Punkte räumlich festlegen.

Schließlich kann ein solcher Beobachtungsraum $\overline{\text{MOD}}_i$ auch der Objektraum R einer vorausgehenden Ausgleichung sein. Auf diese Weise kann eine Gesamtausgleichung in mehrere Stufen zerlegt werden. In einem solchen Beobachtungsraum sind nach Möglichkeit allerdings die durch die vorausgehende Ausgleichung entstandenen Korrelationen in Form einer entsprechenden Kovarianzmatrix zu berücksichtigen.

Die räumliche Ähnlichkeitstransformation verbindet einen Modellpunkt (x,y,z) mit seinem homologen Objektpunkt (X,Y,Z) entsprechend der Gleichung:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = m D \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \tag{9}$$

Der Parameterraum für diese Beziehung gliedert sich in drei Teilräume:

$\text{MAS}_j = \{ m \}$ Maßstabszahl

$\text{DRE}_k = \{ \alpha, \beta, \gamma \}$ Drehparameter für die Elemente $d_{11} \dots d_{33}$ der räumlichen Drehmatrix D

$\text{UMO}_1 = \{ X_0, Y_0, Z_0 \}$ Lage des Koordinatenursprungs des Beobachtungsraumes $\overline{\text{MOD}}_i$ im Objektraum.

Modellen im gleichen Maßstab (z.B. Stereomeßkammer) kann ein gemeinsamer Parameterraum MAS_j zugeordnet werden.

Jedes Element $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ eines Beobachtungsraumes \overline{MOD}_i führt durch Linearisierung der Funktion (9) zu folgendem Tripel von Verbesserungsgleichungen:

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial m} \\ \frac{\partial y}{\partial m} \\ \frac{\partial z}{\partial m} \end{pmatrix} dm + \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \alpha} & \frac{\partial x}{\partial \beta} & \frac{\partial x}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial y}{\partial \alpha} & \frac{\partial y}{\partial \beta} & \frac{\partial y}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial z}{\partial \alpha} & \frac{\partial z}{\partial \beta} & \frac{\partial z}{\partial \gamma} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\alpha \\ d\beta \\ d\gamma \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial X} & \frac{\partial x}{\partial Y} & \frac{\partial x}{\partial Z} \\ \frac{\partial y}{\partial X} & \frac{\partial y}{\partial Y} & \frac{\partial y}{\partial Z} \\ \frac{\partial z}{\partial X} & \frac{\partial z}{\partial Y} & \frac{\partial z}{\partial Z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx - dx_0 \\ dy - dy_0 \\ dz - dz_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x^0 - \bar{x} \\ y^0 - \bar{y} \\ z^0 - \bar{z} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Da in vielen Fällen der Maßstab eines Punkthaufens bekannt ist (Stereomeßkammer, Fahrzeugmodell), wird zu seinem Parameterraum MAS_j mit Hilfe der Identitätsfunktion

$$v_m = dm + (m^0 - \bar{m}) \quad (11)$$

ein Beobachtungsraum \overline{MAS}_j hinzugefügt.

2.3 Geodätische Beobachtungsräume

2.3.1 Paßpunkte \overline{PAS}_i)

Die Identitätsfunktion verbindet einen Beobachtungsraum \overline{PAS}_i der Paßpunkte mit dem Objektraum R :

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x^0 - \bar{x} \\ y^0 - \bar{y} \\ z^0 - \bar{z} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Mit Hilfe der Gewichte p_x , p_y und p_z können sowohl die stochastischen Eigenschaften der beobachteten Paßpunkte berücksichtigt als auch die Unterscheidung in Voll-, Lage- und Höhenpaßpunkte getroffen werden.

Da dem Objektraum R lt. Abschnitt 2.1 auch die Projektionszentren angehören, können sie ebenfalls als Elemente eines Paßpunktraumes \overline{PAS}_i auftreten.

2.3.2 Strecken (\overline{STR})

Die Beziehung zwischen einer Strecke s_{ij} und den beiden Punkten P_i und P_j , die auch die Basis eines Aufnahme-paares bilden können, lautet:

$$s_{ij} = \sqrt{k_x (X_j - X_i)^2 + k_y (Y_j - Y_i)^2 + k_z (Z_j - Z_i)^2} \quad (13)$$

Die Faktoren k_x , k_y , k_z können nur die Werte 0 und 1 annehmen, sodaß horizontale Strecken, Höhenunterschiede usw. als Spezialfälle dieser Beziehung anfallen. Ein Element \bar{s}_{ij} des Beobachtungsraumes \overline{STR}_k liefert durch Linearisierung der Beziehung (13) folgende Verbesserungsgleichung:

$$v_{s_{ij}} = \frac{\partial s}{\partial X_j} (dX_j - dX_i) + \frac{\partial s}{\partial Y_j} (dY_j - dY_i) + \frac{\partial s}{\partial Z_j} (dZ_j - dZ_i) + (s_{ij}^o - \bar{s}_{ij}) \quad (14)$$

2.3.3 Richtungssätze (\overline{RIS})

Eine Richtung r führt zu folgender Gleichung:

$$r = o + \arctan \frac{Y - Y_o}{X - X_o} \quad (15)$$

Dabei bedeuten:

- o Orientierungsunbekannte
- $X \ Y$ Koordinaten des Zielpunktes
- $X_o \ Y_o$ Koordinaten des Standpunktes

Alle Richtungen eines Satzes bilden die Elemente des Beobachtungsraumes \overline{RIS}_i . Die Orientierungsunbekannte o wird dem Parameterraum RIO_i zugeschrieben. Eine Verbesserungsgleichung hat die Form:

$$v_r = o + \frac{\partial r}{\partial X} (dX - dX_o) + \frac{\partial r}{\partial Y} (dY - dY_o) + (r^o - \bar{r}) \quad (16)$$

Sofern in einem dieser Richtungssätze auch eine Aufnahme-richtung (Phototheodolit) enthalten ist, ist nach Abschnitt 2.3.6 vorzugehen.

2.3.4 Azimute ($\overline{\text{AZI}}$)

Für die Auswertung von Amateuraufnahmen zur Beweissicherung bei Verkehrsunfällen leisten die aus Schatten - mit Hilfe der Zeit und den geographischen Koordinaten - abgeleiteten Azimute wertvolle Dienste. Darüber hinaus können auch Azimute geodätisch beobachtet oder aus großmaßstäbigen Karten bekannt sein.

Ein Azimut a_{ij} zwischen den beiden Punkten P_i und P_j des Objektraumes wird durch die bekannte Gleichung

$$a_{ij} = \arctan \frac{Y_j - Y_i}{X_j - X_i} \quad (17)$$

beschrieben .

Jedes Element \bar{a}_{ij} des Beobachtungsraumes $\overline{\text{AZI}}_k$ liefert eine Verbesserungsgleichung:

$$v_{a_{ij}} = \frac{\partial a_{ij}}{\partial X_j} (dX_j - dX_i) + \frac{\partial a_{ij}}{\partial Y_j} (dY_j - dY_i) + (a_{ij}^o - \bar{a}_{ij}) \quad (18)$$

2.3.5 Zenitwinkel ($\overline{\text{ZEN}}$)

Der Zenitwinkel z_{ij} vom Standpunkt P_i zum Zielpunkt P_j führt auf folgende Gleichung:

$$z_{ij} = \arctan \frac{\sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2}}{Z_j - Z_i} \quad (19)$$

Ein Element \bar{z}_{ij} des Beobachtungsraumes $\overline{\text{ZEN}}_k$ liefert eine Verbesserungsgleichung:

$$v_{z_{ij}} = \frac{\partial z_{ij}}{\partial X_j} (dX_j - dX_i) + \frac{\partial z_{ij}}{\partial Y_j} (dY_j - dY_i) + \frac{\partial z_{ij}}{\partial Z_j} (dZ_j - dZ_i) + (z_{ij}^o - \bar{z}_{ij}) \quad (20)$$

Neben geodätisch beobachteten Zenitwinkeln können auch - wie im vorhergehenden Abschnitt bei Azimuten erläutert - Zenitwinkel im Zusammenhang mit dem Schattenwurf auftreten.

2.3.6 Beobachtungen für einen Drehparameterraum ($\overline{\text{DRE}}$)

Die im Abschnitt 2.1 eingeführten Parameter α , β , und γ der räumlichen Drehmatrix D_i können in verschiedener Weise interpretiert werden. Für terrestrische Aufnahmen bietet sich die in /6/ eingeführte Definition an:

- α Azimut der Aufnahmerichtung
- β Neigung der Aufnahmeachse
- γ Verkantung des Bildes

Sofern diese Parameter beobachtet sind, ist dem Parameterraum DRE_i mit Hilfe der Identitätsfunktion

$$\begin{aligned} v_\alpha &= d\alpha + (\alpha^0 - \bar{\alpha}) \\ v_\beta &= d\beta + (\beta^0 - \bar{\beta}) \\ v_\gamma &= d\gamma + (\gamma^0 - \bar{\gamma}) \end{aligned} \quad (21)$$

ein Beobachtungsraum $\overline{\text{DRE}}_i$ zuzuordnen.

Da das Azimut α der Aufnahmerichtung nur selten direkt beobachtet, sondern in der Regel nur innerhalb eines Richtungssatzes festgelegt wird, ist folgende Vorgangsweise notwendig:

Jene Richtungen des Richtungssatzes $\overline{\text{RIS}}_j$ (2.3.3), die keinen Zielpunkt haben, sondern lediglich Aufnahmerichtungen des Phototheodolites bedeuten, werden zu einem eigenen Beobachtungsraum $\overline{\text{RIA}}_j$ abgespalten. Die Beziehung zwischen einer solchen Aufnahmerichtung r und dem Azimut α der Aufnahmerichtung lautet:

$$r = o + \alpha . \quad (22)$$

Damit verbindet ein Element \bar{r} des Beobachtungsraumes $\overline{\text{RIA}}_j$ das Element α des jeweiligen Parameterraumes DRE_i und die Orientierungsunbekannte o aus dem Parameterraum RIO_j (2.3.3) in der Verbesserungsgleichung:

$$v_r = o + d\alpha + (r^0 - \bar{r}). \quad (23)$$

In ähnlicher Weise, wie hier dem Parameterraum DRE_i des Abschnittes 2.1 ein Beobachtungsraum $\overline{\text{DRE}}_i$ gegenübergestellt wurde, kann auch der Parameterraum DRE_k des Abschnittes 2.2 behandelt werden.

2.4 Fiktive Beobachtungsräume

Die bisher behandelten photogrammetrischen und geodätischen Beobachtungen erhielt man als Ergebnis physikalischer Meßvorgänge. Von ganz anderer Herkunft sind dagegen die fiktiven Beobachtungen. Sie entstehen vorwiegend durch geometrische Interpretation der in den Aufnahmen abgebildeten Objekte. Im folgenden werden einige Arten fiktiver Beobachtungsräume behandelt, wobei eine Gliederung nach der (Mindest-)Anzahl der beteiligten Punkte des Objekt-raumes erfolgt.

2.4.1 Mindestens zwei Punkte -

2.4.1.1 - mit gleicher Lage (Lotlinien, z.B. Hauskanten) (\overline{LOT})

Bezeichnet man die Lage der Lotlinie mit (X_0, Y_0) , so führt jeder entlang der Lotlinie angesprochene Punkt (X, Y, Z) zu folgender Beziehung:

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (24)$$

Alle "Null-Distanzen" der Punkte einer Lotlinie bilden den Beobachtungsraum \overline{LOT}_1 , die Koordinaten X_0, Y_0 den Parameterraum LOP_1 . Für ein Element dieses Beobachtungsraumes ergibt sich folgendes Paar von Verbesserungsgleichungen:

$$\begin{pmatrix} v_{f_x} \\ v_{f_y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dX - dX_0 \\ dY - dY_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f_x^0 \\ f_y^0 \end{pmatrix} \quad (25)$$

Die Verbesserungen v_{f_x} und v_{f_y} sind die Komponenten des Abstandes des Punktes (X, Y, Z) von der Lotlinie (X_0, Y_0) nach der Ausgleichung. Mit Hilfe der den Verbesserungsgleichungen (25) zugeordneten Gewichte p_{f_x} und p_{f_y} können deshalb die stochastischen Eigenschaften der fiktiven Beobachtungen $f_x = f_y = 0$ (24) berücksichtigt werden, z.B. durch Abschätzung der Bau-genauigkeit bei Gebäudekanten.

Unrealistisch hohe Gewichte bei Verbesserungsgleichungen mit mehr als einer Unbekannten sind für die praktische Durchrechnung der Ausgleichung sehr gefährlich. Sie können nämlich lineare Abhängigkeiten induzieren und somit zu numerisch schlecht konditionierten Systemen führen.

In ähnlicher Weise sind auch die Gewichte der in den folgenden Abschnitten noch zu besprechenden fiktiven Beobachtungen festzusetzen.

2.4.1.2 mit gleicher Höhe (z.B. Gesimse an Baukörpern) (\overline{HOR})

Ausgangsgleichung:

$$f_z = Z - Z_0 = 0 \quad (26)$$

Alle Null-Abweichungen von der Referenzhöhe Z_0 , die den Parameterraum HOZ_1 bildet, gehören dem Beobachtungsraum \overline{HOR}_1 an. Die Verbesserungsgleichung eines Elementes dieses Beobachtungsraumes lautet:

$$v_{f_z} = dZ - dZ_0 + f_z^0 \quad (27)$$

2.4.2 Mindestens drei Punkte -

2.4.2.1 entlang einer beliebigen Geraden (z.B. Gehsteigkante einer geneigten Straße) (\overline{GER})

Ein Abstandsvektor f eines Punktes (X, Y, Z) von einer Geraden entsteht durch Orthogonalprojektion (mit der Projektionsmatrix A) eines Differenzvektors zwischen dem Punkt (X, Y, Z) und einem beliebigen Geradenpunkt (X_0, Y_0, Z_0) auf eine Normalebene dieser Geraden:

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (28)$$

Die Projektionsmatrix A wiederum hat die Form:

$$A = (E - a a^T), \quad (29)$$

wobei sich $a^T = (\cos\alpha \sin\beta, \sin\alpha \sin\beta, \cos\beta)$ aus den beiden Richtungsparametern α und β der Geraden zusammensetzt und E die Einheitsmatrix ist.

Da für den Punkt (X_0, Y_0, Z_0) jeder Punkt der Geraden in Frage kommt, wird jene Koordinate Null gesetzt, die mit der größten Komponente des (Näherungs-) Vektors a korrespondiert (z.B. $Z_0 := 0$).

Somit erhält man vier unbekannte Parameter, die in die beiden Parameter-
räume $GEO_i = \{\alpha, \beta\}$ und $GEP_i = \{X_o, Y_o, 0\}$ aufgeteilt werden.

Die Null-Abstände (28) aller Punkte entlang der Geraden bilden den Beob-
achtungsraum \overline{GER}_i . Das Tripel der Verbesserungsgleichungen eines solchen
Elementes lautet:

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_{f_y} \\ \dots \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_x}{\partial \beta} \\ \frac{\partial f_y}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_y}{\partial \beta} \\ \frac{\partial f_z}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_z}{\partial \beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial X} & \frac{\partial f_x}{\partial Y} & \frac{\partial f_x}{\partial Z} \\ \frac{\partial f_y}{\partial X} & \frac{\partial f_y}{\partial Y} & \frac{\partial f_y}{\partial Z} \\ \frac{\partial f_z}{\partial X} & \frac{\partial f_z}{\partial Y} & \frac{\partial f_z}{\partial Z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dX - dX_o \\ dY - dY_o \\ dZ \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f_x^o \\ f_y^o \\ f_z^o \end{pmatrix} \quad (30)$$

2.4.2.2 - in einer Vertikalebene (z.B. Gebäudefassade) (\overline{EBV})

Ausgangsgleichung:

$$f = X \cos \alpha + Y \sin \alpha + l = 0 \quad (31)$$

Die Parameter α und l der Vertikalebene teilen wir in die Parameterräume
 $EVO_i = \{\alpha\}$ und $EVA_i = \{l\}$ auf. Alle Null-Abstände der Punkte (X, Y, Z) der
Vertikalebene sind dem Beobachtungsraum \overline{EBV}_i zuzuschreiben. Die Verbesserungs-
gleichung für ein Element dieses Beobachtungsraumes lautet:

$$v_f = \frac{\partial f}{\partial \alpha} d\alpha + l + \frac{\partial f}{\partial X} dX + \frac{\partial f}{\partial Y} dY + f^o \quad (32)$$

2.4.2.3 - in zwei orthogonalen Vertikalebenen (\overline{OVE})

Alle Null-Abstände der Punkte der beiden Vertikalebenen bilden einen
Beobachtungsraum \overline{OVE}_i . Zur Unterscheidung werden die Punkte der einen
Vertikalebene mit (X_j, Y_j, Z_j) und die der anderen Vertikalebene mit
 (X_k, Y_k, Z_k) bezeichnet. Ein Punkt in der Scheitellinie der Vertikalebenen
ist beiden Ebenen zuzuordnen. Die Ausgangsgleichungen haben - entsprechend
der Beziehung (31) - die Form:

$$\begin{aligned} f_j &= X_j \cos \alpha + Y_j \sin \alpha + l_1 = 0 \\ f_k &= X_k \cos(\alpha + \frac{\pi}{2}) + Y_k \sin(\alpha + \frac{\pi}{2}) + l_2 = 0 \end{aligned} \quad (33)$$

Verbesserungsgleichungen:

$$\begin{aligned}
 v_{f_j} &= \frac{\partial f_j}{\partial \alpha} d\alpha + l_1 + \frac{\partial f_j}{\partial X_j} dX_j + \frac{\partial f_j}{\partial Y_j} dY_j + f_j^0 \\
 v_{f_k} &= \frac{\partial f_k}{\partial \alpha} d\alpha + l_2 + \frac{\partial f_k}{\partial X_k} dX_k + \frac{\partial f_k}{\partial Y_k} dY_k + f_k^0
 \end{aligned} \quad (34)$$

Dem Parameterraum OVO_i der Orientierung der beiden einander schneidenden Vertikalebene gehört das Element α an und $OVA_i = \{l_1, l_2\}$ enthält die Abstandsparameter.

2.4.3 Mindestens vier Punkte -

2.4.3.1 - einer Ebene (EBE)

Die Information, daß Punkte in ebenen Straßenstücken liegen, kann auf diese Weise berücksichtigt werden.

Ausgangsgleichung:

$$f = X \cos \alpha \sin \beta + Y \sin \alpha \sin \beta + Z \cos \beta + l = 0 \quad (35)$$

Die drei Parameter α, β, l der Ebene werden den Parameterräumen $EBO_i = \{\alpha, \beta\}$ und $EBA_i = \{l\}$ zugeordnet. Die Null-Abstände aller Punkte der Ebene gehören dem Beobachtungsraum \overline{EBE}_i an.

Verbesserungsgleichung:

$$v_f = \frac{\partial f}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial f}{\partial \beta} d\beta + l + \frac{\partial f}{\partial X} dX + \frac{\partial f}{\partial Y} dY + \frac{\partial f}{\partial Z} dZ + f^0 \quad (36)$$

2.4.3.2 - auf parallelen Geraden

Die Null-Abstände der Punkte jeweils einer der parallelen Geraden bilden einen eigenen Beobachtungsraum \overline{GER}_i im Sinne des Abschnittes 2.4.2.1. Jeder Geraden wird ein individueller Parameterraum GEP_i zugeordnet - allen zusammen aber ein gemeinsamer Parameterraum GEO_k .

2.4.3.3 in parallelen Vertikalebene

Durch die Verwendung gleicher Parameterräume EVO_i (2.4.2.2) für zwei und mehr Ebenen erzwingt man die Parallelität dieser Ebenen.

2.4.3.4 als Endpunkte von zwei gleich langen Strecken (GLS)

Ausgangsgleichung:

$$f = \sqrt{k_x (X_j - X_i)^2 + k_y (Y_j - Y_i)^2 + k_z (Z_j - Z_i)^2} - \sqrt{k_x (X_1 - X_k)^2 + k_y (Y_1 - Y_k)^2 + k_z (Z_1 - Z_k)^2} = 0 \quad (37)$$

Die Faktoren k_x, k_y, k_z können nur die Werte 0 und 1 annehmen, sodaß - wie im Abschnitt 2.3.2 - Differenzen horizontaler und vertikaler Strecken als Spezialfälle enthalten sind. Die Null-Differenzen der Strecken s_{ij} und s_{k1} beschreiben einen Beobachtungsraum \overline{GLS}_n .

Verbesserungsgleichung:

$$v_f = \frac{\partial f}{\partial X_j} (dX_j - dX_i) + \frac{\partial f}{\partial Y_j} (dY_j - dY_i) + \frac{\partial f}{\partial Z_j} (dZ_j - dZ_i) + \frac{\partial f}{\partial X_1} (dX_1 - dX_k) + \frac{\partial f}{\partial Y_1} (dY_1 - dY_k) + \frac{\partial f}{\partial Z_1} (dZ_1 - dZ_k) + f^0 \quad (38)$$

2.4.3.5 beteiligt an einer Geraden und einer dazu orthogonalen Ebene

Zwei Punkte legen eine Gerade fest und ein dritter eine dazu orthogonale Ebene. Ein weiterer Punkt der Ebene ist somit redundant.

Setzt man den Parameterraum GEO_i einer Geraden (2.4.2.1) und den entsprechenden Raum EBO_i einer Ebene (2.4.3.1) gleich, so kann man die Orthogonalität dieser Geraden zu einer Ebene berücksichtigen.

2.4.4 Mindestens fünf Punkte - in parallelen Ebenen

Durch die Verwendung gleicher Parameterräume EBO_i (2.4.3.1) für zwei und mehr Ebenen erzwingt man die Parallelität allgemeiner Ebenen.

3. AUSGLEICHUNGSTECHNISCHE HINWEISE

Der Schwerpunkt des vorliegenden Aufsatzes lag in der Formulierung des mathematischen Modells in der Form von Verbesserungsgleichungen für die Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen. Die weiteren Schritte der Ausgleichung sind dagegen noch weniger abgeklärt und sollen daher nur in einigen Stichworten angesprochen werden.

Die Ausgangssituation ist stets so, daß die Elemente der Beobachtungsräume \bar{B}_i bekannt sind. Dagegen ist von den durch die Funktionen f_i definierten Parameterräumen P_j und vom Objektraum R zunächst nur ein Verzeichnis der einzelnen Elemente bekannt.

Da das mathematische Modell ein linearisiertes Ausgleichungsproblem darstellt, sind für alle Elemente des Objektraumes R und für die Elemente der Parameterräume P_j Näherungs- bzw. Startwerte zu beschaffen. Von einer Vollautomatisierung dieses Vorganges wird bewußt Abstand genommen. Denn ökonomisch läßt sich dieser vielschichtige Aufgabenkomplex nur mit Hilfe der Erfahrung und geometrischen Vorstellung des Bearbeiters - womöglich mit gleichzeitiger Korrektur grober Datenfehler - lösen. Im Dialog mit dem Programm steuert der Bearbeiter den Ablauf der Berechnungen. Durch die Definition lokaler Referenzsysteme R_k kann das Problem der Gewinnung der Näherungswerte in Teilaufgaben zerlegt werden. Den letzten Schritt dieser Vorbereitungsphase bildet die Zusammenführung der Teilräume R_k zum Referenzsystem R , wobei auch die Überführung der - zunächst lokalen - Parameterräume zu berücksichtigen ist.

Eine hohe Qualität dieser Näherungswerte verspricht eine geringe Anzahl von Iterationen. Für jede Iteration sind die Differentialquotienten und die Residuen der Verbesserungsgleichungen aus den jeweils aktuellsten Werten der Parameterräume und des Referenzsystems zu berechnen.

Wegen des möglicherweise großen Datenumfanges kommt eine Auflösung des Gesamtsystems nur in Submatrizen in Frage. Es ist noch nicht endgültig abgeklärt, ob eine Orthogonalisierung der Verbesserungsgleichungen /9/ oder der konventionelle Weg über Normalgleichungen /1/ eingeschlagen werden soll.

Bisher erschienen:

- Heft 1 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen
1970 - 1973, Dezember 1973.
- Heft 2 EGGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Taschenrechner HP 45 und HP 65,
Programme und Anwendung im Vermessungswesen, 1. Auflage, März 1974,
Special Edition in English, Juli 1974, 2. verbesserte Auflage,
November 1974.
- Heft 3 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen
1973 - 1974, September 1974.
- Heft 4 EGGER-PALFINGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Tektronix-Tisch-
rechner TEK 31, Programmbibliothek für den Einsatz im Vermessungs-
wesen, November 1974.
- Heft 5 K. LEDERSTEGER, Die horizontale Isostasie und das isostatische Geoid,
Februar 1975.
- Heft 6 F. REICHHART, Katalog von FK4 Horrebow-Paaren für Breiten von
 $+ 30^{\circ}$ bis $+ 60^{\circ}$, Oktober 1975.
- Heft 7 Arbeiten aus dem Institut für Höhere Geodäsie, Wien, Dezember 1975.
- Heft 8 Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie zum
XIII. Internationalen Kongreß für Photogrammetrie in Helsinki 1976,
Wien, Juli 1976.
- Heft 9 Veröffentlichung des Instituts für Kartographie und Reproduktions-
technik, W. PILLEWIZER, Felsdarstellung aus Orthophotos,
Wien, Juni 1976.
- Heft 10 PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Der Einsatz des programmierbaren
Taschenrechners Texas Instruments SR-52 mit Drucker PC-100 in der
ingenieurgeodätischen Rechentechnik, Wien, Mai 1976.