

Photogrammetrische Neuvermessung mit der Bündelmethode

Autor(en): **Leupin, M. / Schenk, T.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Mensuration, photogrammétrie, génie rural**

Band (Jahr): **71-M (1973)**

Heft 11

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-226407>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Photogrammetrische Neuvermessung mit der Bündelmethode

M. Leupin und T. Schenk

Zusammenfassung

Am Beispiel der Neuvermessung Le Bémont wird gezeigt, daß die analytische Photogrammetrie zu genauen Ergebnissen führen kann, die den Anforderungen der Toleranz II genügen. Insbesondere wird bewiesen, daß Punkte 5. Ordnung für die terrestrischen Ergänzungsaufnahmen mit genügender Genauigkeit photogrammetrisch bestimmt werden können.

Die Resultate lassen die Bündelmethode für Neuvermessungen als sehr geeignet erscheinen.

Résumé

La photogrammétrie analytique est capable de livrer d'excellents résultats, comme le démontre l'essai pratique fait sur la nouvelle mensuration du Bémont. En outre, il a été prouvé que la détermination photogramétrique de points de 5^e ordre pour le levé complémentaire est réalisable avec une précision suffisante pour la tolérance II. De ce fait, la méthode des faisceaux spatiaux peut être recommandée pour les applications cadastrales.

Vorbemerkung

Die Schweizerische Gesellschaft für Photogrammetrie (SGP) hat sich vor einem Jahr die Aufgabe gestellt, die Anwendung der Photogrammetrie in der Grundbuchvermessung einer genauen Untersuchung zu unterziehen, da die bisher nach verschiedenen Methoden durchgeführten photogrammetrischen Neuvermessungen zu unterschiedlichen und zum Teil enttäuschenden Ergebnissen geführt hatten. Die ungünstigen Erfahrungen bewirkten eine Stagnation, und es mußte der Eindruck entstehen, die Photogrammetrie eigne sich nicht für die Grundbuchvermessung.

In den letzten Jahren sind in der numerischen Photogrammetrie wesentliche Fortschritte erzielt worden, die insbesondere die Berechnung größerer Blöcke betreffen. Die SGP bildete daher eine Kommission, deren Leitung sie Herrn Hans Leupin übertrug. Aufgabe dieser Kommission ist es, die neueren Methoden der Photogrammetrie in praktischen Versuchen zu erproben. Einer dieser Versuche betrifft die Neuvermessung der Gemeinde Le Bémont im Berner Jura, deren Ergebnisse hier vorgelegt werden. Da es anzunehmen ist, daß sich auch Kreise außerhalb der SGP dafür interessieren, scheint eine Publikation in dieser Zeitschrift gerechtfertigt zu sein.

1. Feldarbeiten und Messung

1.1 Allgemeines

Die auf dem Freiberge-Plateau liegende Gemeinde Le Bémont (Toleranzzone III) bietet für eine Neuvermessung mittels Photogrammetrie beinahe ideale topographische Verhältnisse an, weist sie doch eine maximale Höhendifferenz von etwa 100 m sowie sehr offenes, leicht zugängliches Gelände auf. Wichtig für die Photogrammetrie ist zudem die Tatsache, daß der Waldanteil lediglich 5,5% beträgt (Abb. 1). Zum vornherein wurde die kleine Dorfzone aus dem photogrammetrischen Gebiet ausgeschieden, da wegen der engen Bebauung die Sichtverhältnisse aus der Luft zu schlecht sind. Ausgeschieden wurden ferner die ausgedehnten Weiden, die keine Parzellierung aufweisen.

Die in Abbildung 1 dargestellten Zonen weisen folgende Anzahl Grenzpunkte auf:

– Photogrammetrisches Gebiet	2150 GP
– Dorfzone	150 GP
– Wald	770 GP

Für die terrestrische Polaraufnahme des Waldgebietes sowie der Dorfzone war ein Netz 5. Ordnung zu erstellen, um daran die Polygonzüge anhängen zu können. Solche Punkte mußten auch im eigentlichen photogrammetrischen Gebiet vorgesehen werden, da verschiedene kleinere Zonen aus der Luft schlecht sichtbar sind (kleinere Wälder, Parzellengrenzen in der Mauer verlaufend u.ä.). Diese Punkte 5. Ordnung sollten photogrammetrisch bestimmt werden. Um aber für den Versuch über Vergleichsmöglichkeiten zu verfügen, sind diese Punkte zusätzlich terrestrisch mittels DI-10-Polygonzügen eingemessen worden. Soweit die Abschlußfehler der Polygonzüge eine Abschätzung der Genauigkeit dieser Punkte erlauben, dürfte der mittlere Fehler bei 3 bis 5 cm liegen. Die Verteilung der Punkte geschah ausschließlich nach den Bedürfnissen der terrestrischen Ergänzungsmessungen. Wenn immer möglich, ist ein versicherter Grenzpunkt als Punkt 5. Ordnung ausgewählt worden; in einigen Fällen war aber das Setzen eines zusätzlichen Marksteines unumgänglich.

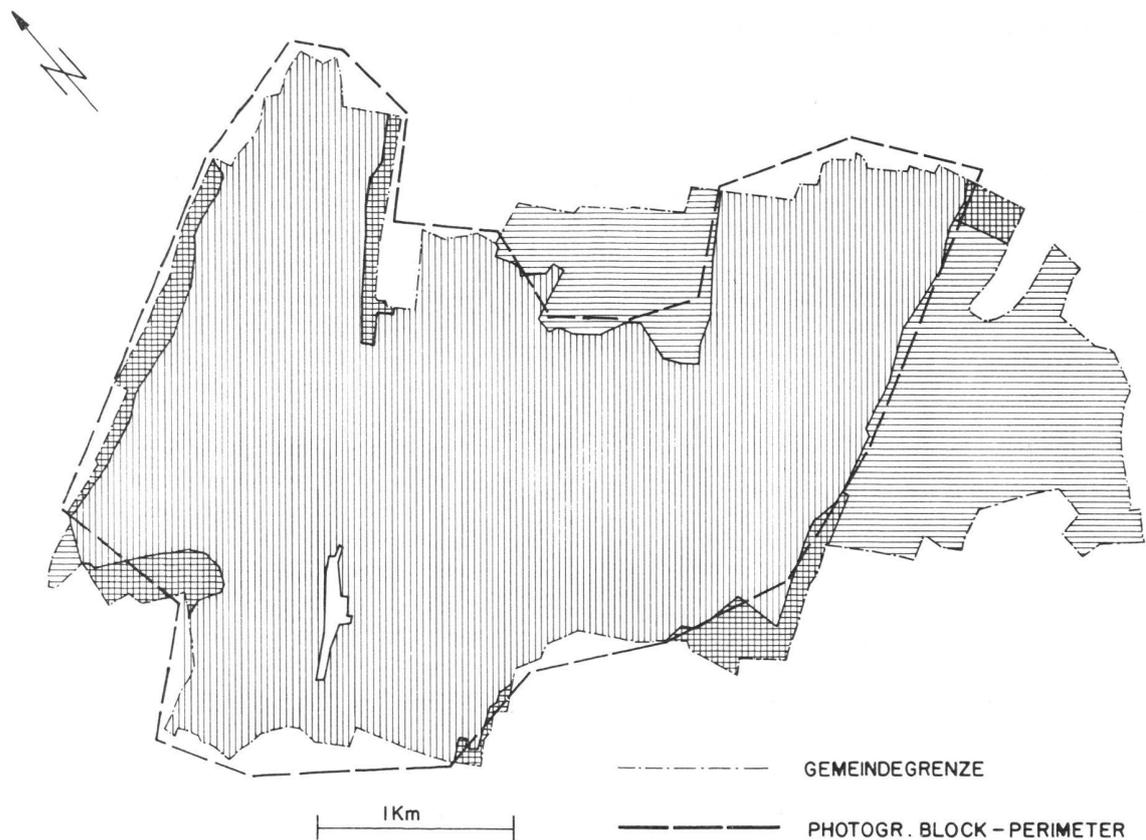
1.2 Signalisierung

Nach der Schneeschmelze im April 1972 wurde sofort mit den Signalisierungsarbeiten begonnen, da der Flug auf Ende April angesetzt war. Gleichzeitig mit der Signalisation konnte eine Kontrolle der Vermarkung ausgeführt werden, da die Güterzusammenlegung schon einige Zeit zurücklag. Die Grenzsteine (12 × 12 cm) erhielten einen weißen Anstrich. Auf etwa 10 bis 20 cm wurde noch zusätzlich das Gras entfernt. Bei den Punkten 5. Ordnung sind zum Teil Hinweissignale mit Kalk um den Punkt gesetzt worden, um die Identifikationssicherheit zu erhöhen (2 bis 4 Balken von 1 m × 30 cm). Auch sind in einigen Fällen schwarze Kontrastringe mit etwa 30 bis 40 cm Durchmesser um den Grenzstein gemalt worden, wenn der Untergrund zu hell erschien.

Insgesamt sind 2050 Grenzpunkte sowie 50 Punkte 5. Ordnung einschließlich 10 Trigonometern (Plastiktafeln 30 × 30 cm) signalisiert worden. Mit der Kontrolle der Vermarkung sowie mit laufenden Ergänzungen beschädigter Signale brauchten zwei Zweierequipen je 15 Arbeitstage.

Es wurde darauf verzichtet, aus der Luft nicht sichtbare Grenzpunkte mittels Hilfspunkten zu signalisieren, da praktisch nur eine Vermarkung solcher Hilfspunkte sich als dauerhaft genug erwiesen hätte, und dies um so mehr, da im Mai die Feldarbeiten der Bauern voll im Gang sind. In solchen Fällen ist lediglich ein Punkt 5. Ordnung für die spätere terrestrische Ergänzungsmessung in die Nähe gesetzt worden. Wenn benachbarte Grenzpunkte vorlagen, so sind wenn möglich Kontrollmaße erhoben worden (siehe 1.7).

Ein weiteres Problem boten diejenigen Zonen, die eine schwache Grenzpunktdichte aufweisen. Da die Bildtriangulation auf gute Übertragungspunkte angewiesen ist, sind an solchen Orten Signaltafeln aus Plastik (20 × 20 cm) in freier Anordnung gesetzt worden, insgesamt 250 Stück.



LEGENDE

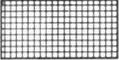
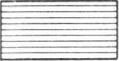
	photogrammetrisches Gebiet	8 6 1 ha	7 4,5 %
	bebaute Dorfzone	5 ha	0,5 %
	Wald	6 4 ha	5,5 %
	Weide ohne Parzellengrenze	2 2 5 ha	1 9,5 %
		<hr/>	<hr/>
		1 1 5 5 ha	1 0 0 %

Abb. 1

Wegen schlechten Wetters konnte der Flug erst einen Monat nach dem gesetzten Termin durchgeführt werden. Die Aufrechterhaltung der Signalisierung während dieser langen Zeit bedeutete einen Aufwand von weiteren 10 Tagen für eine Zweierequipe.

1.3 Flug

Da zur Zeit der Flugplanung noch nicht feststand, ob das Bildmaterial an einem Analoggerät oder einem Komparator ausgemessen werden sollte, mußte ein Bildmaßstab gefunden werden, der später beide Möglichkeiten offenließ. Um

die 12×12-cm-Grenzsteine noch genügend gut im Analoggerät identifizieren zu können, ist ein mittlerer Bildmaßstab von etwa 1:4500 gewählt worden, was bei der Weitwinkelkamera RC8 ($f = 152 \text{ mm}$) einer Flughöhe von ungefähr 685 m über Grund entspricht.

Um auch in der Längs- und Querüberdeckung nicht von vornherein zu stark eingeschränkt zu sein, sind 10 parallele Fluglinien mit einer Längsüberdeckung von 80% sowie einer Querüberdeckung von 60% geflogen worden.

Für die Kulturgrenzenauswertung in den Weidgebieten ohne Parzellierung diente eine eigene Fluglinie im Bildmaßstab 1:9900 (1500 m ü. G.).

Die Qualität des Bildmaterials muß eher als schlecht angesehen werden. Da ein längeres Aufschieben nicht mehr möglich war, wurde der Flug bei Bewölkung ausgeführt, was in vielen Bildern zu schroffen Sonne/Schatten-Zonen führte. Ferner ist zu bedenken, daß Ende Mai auch in einer Höhe von 1000 m das Gras schon eine beträchtliche Höhe erreicht hat, wodurch die Grenzsteine zum Teil schon zugedeckt wurden.

Es hat sich auch hier einmal mehr erwiesen, daß die Signalisierung und insbesondere deren Aufrechterhaltung bei schlechtem Flugwetter als schwächster Punkt des gesamten Verfahrens gelten müssen und daß oft sogar die Gefahr einer Gefährdung des Projektes besteht.

1.4 Identifikation und Numerierung

Der Bildmaßstab von 1:4500 ist zu klein, um in Gebieten mit dichter Grenzpunktbesetzung auf einem Kontakt-Positiv arbeiten zu können. Dies gilt sowohl für die Identifikation wie auch für die Numerierung. Aus diesem Grunde ist ein Bildverband ausgewählt worden, der das ganze Gebiet mit knappen Überlappungen bedeckt. Von diesen Bildern sind Vergrößerungen 50×50 cm erstellt und auf Karton aufgezogen worden. Auf diesen Bildern im Maßstab von etwa 1:2000 ließen sich alle Eintragungen mühelos vornehmen. Die Vergrößerungen waren auch für die terrestrischen Ergänzungsaufnahmen eine wertvolle Hilfe.

Die Identifikation auf dem Felde und im Büro nahm relativ wenig Zeit in Anspruch, konnte doch das ganze mit 29 Mann-Tagen bewältigt werden. Identifiziert wurden vor allem die Kulturgrenzen beziehungsweise -arten sowie die verschiedenen Wege und Mauern. Es fand jedoch keine Einmessung der im photogrammetrischen Gebiet befindlichen Häuser statt. Diese sind in einem späteren Zeitpunkt terrestrisch von eigens dazu ausgewählten, photogrammetrisch bestimmten Punkten oder von Grenzpunkten aus aufgenommen worden.

Die Numerierung geschah direkt auf den Vergrößerungen, und zwar frei, das heißt weder blatt- noch gebietsweise. Die Nummern der photogrammetrischen GP sind natürlich Bestandteil der Numerierung über die ganze Gemeinde (mit terrestrischen Zonen). Aufgewendet wurden für diese Arbeit 80 Bürostunden. Es hat sich als empfehlenswert erwiesen, die vierstellige Numerierung so vorzunehmen, daß anhand der ersten Ziffer der Charakter des Punktes (GP, 5. Ordnung, Trigonometrie, Kulturpunkt, andere) erkenntlich ist. Es war dies hier besonders nützlich, weil im Versuch die Kulturgrenzen nicht an einem Analoggerät nach vollendeter Blockausgleichung auf dem Plan gezeichnet, sondern punktweise erfaßt worden sind, um so den Automationsfluß möglichst nicht zu unterbrechen. Es sei vorweggenommen, daß diese Lösung sich als äußerst aufwendig erwiesen hat, galt es doch, ungefähr 2300 Kulturpunkte zu numerieren und dann auszumessen. Die Numerierung könnte natürlich auch automatisch durch den Computer ausgeführt werden, was aber den Nachteil der punktwisen Auswertung nicht aufheben würde. Es hat sich zudem herausgestellt, daß es nicht einfach ist, mit extrem wenigen Kulturpunkten die Kulturen einigermaßen zu erfassen. Das Verfahren wird sich daher in Zukunft nur ganz ausnahmsweise anwenden lassen.

1.5 Auswahl des Bildmaterials

Die reichliche Längs- und Querüberdeckung ergab ein Total von 213 Aufnahmen. Da die Grenzpunktdichte über das ganze Gebiet sehr verschieden ist, war vorgesehen, nur Bilder mit genügend gut verteilten Übertragungspunkten heranzuziehen. Die Längsüberdeckung von 80% war vor allem deswegen gewählt worden, um durch Kombination von verschiedenen Modellen möglichst wenig verdeckte Punkte zu haben. Allerdings erwies sich nun diese Auswahl als problematisch. Erstens ist ein solches Vorgehen bei dieser Fülle von Bildmaterial äußerst zeitintensiv, und zweitens besteht dauernd die Gefahr, daß zu viele Modelle herangezogen werden, was wiederum die Zeit für das Ausmessen anwachsen läßt. Auf der anderen Seite wäre es natürlich wünschenswert, daß jeder Grenzpunkt auf möglichst zwei oder sogar noch mehr Modellen erscheint. Da diese Forderungen einander entgegenlaufen, muß hier ein vertretbarer Mittelweg gefunden werden.

Von den 10 Fluglinien sind 3 ausgelassen worden, weil sie Gebiete mit schwacher Grenzpunktdichte überdecken. Die Längsüberdeckung von 80% ist dagegen nur in einigen Modellen verwendet worden, insbesondere in denjenigen Zonen, wo die Grenzen besonders häufig in Mauern verlaufen.

Das ausgewählte Bildmaterial bildet einen Block von 7 Fluglinien und total 59 Bildern (Abb. 2).

Es ist interessant, zu vermerken, daß die Blockvorbereitung (Auswahl der Bilder, Vorbereitung für die Ausmessung) erheblich mehr Zeit in Anspruch nahm, als ursprünglich erwartet wurde, waren es doch insgesamt 20 Mann-Tage.

1.6 Messung

Für die Ausmessung der Negative stand ein Stereokomparator «Wild STK-1» mit dem Datenausgabegerät EK 6 (5-Kanal-Lochstreifen) zur Verfügung. Aus Kostengründen wurde darauf verzichtet, Glasdiapositive herzustellen. Damit mußte man in Kauf nehmen, daß die schwarze Meßmarke im schwarzen Grenzstein verschwindet. Einzig der feine symmetrische Außenkreis der Meßmarke erleichtert die Einstellung. Es wäre aber wünschenswert, wenn die Farbe der Meßmarke verändert werden könnte. Die Verwendung der Originalnegative bringt noch einen weiteren Nachteil: Die Rahmenmarken werden jeweils am Anfang und am Ende eines Modells gemessen. Bleibt nun ein Modell über mehrere Stunden im Gerät (viele Grenzpunkte, Unterbrüche), so besteht in nichtklimatisierten Räumen die Gefahr, daß einem die Kontrolle über den Filmverzug wegen Temperatur- und Feuchtigkeitsveränderungen entgleitet.

Einzelne Modelle weisen eine hohe Anzahl Grenzpunkte (Maximum 156) auf, wozu mindestens so viele Kulturpunkte hinzukommen. Im Durchschnitt ergeben sich 70 Grenzpunkte pro Modell. Zählt man noch die Messung der Rahmenmarken hinzu, so erreicht man bald eine hohe Zahl von Registrierungen pro Modell. Aus diesem Grunde ist auf eine Doppelmessung der Grenzpunkte mittels eines zweiten Durchgangs verzichtet worden. Trotzdem wurde für die rund 8200 Registrierungen eine Zeit von 183 Stunden gebraucht, was einem Durchschnitt von 45 Registrierungen pro Stunde entspricht. Pro Modell ergibt sich eine durchschnittliche Auswertzeit von 3 ½ Stunden.

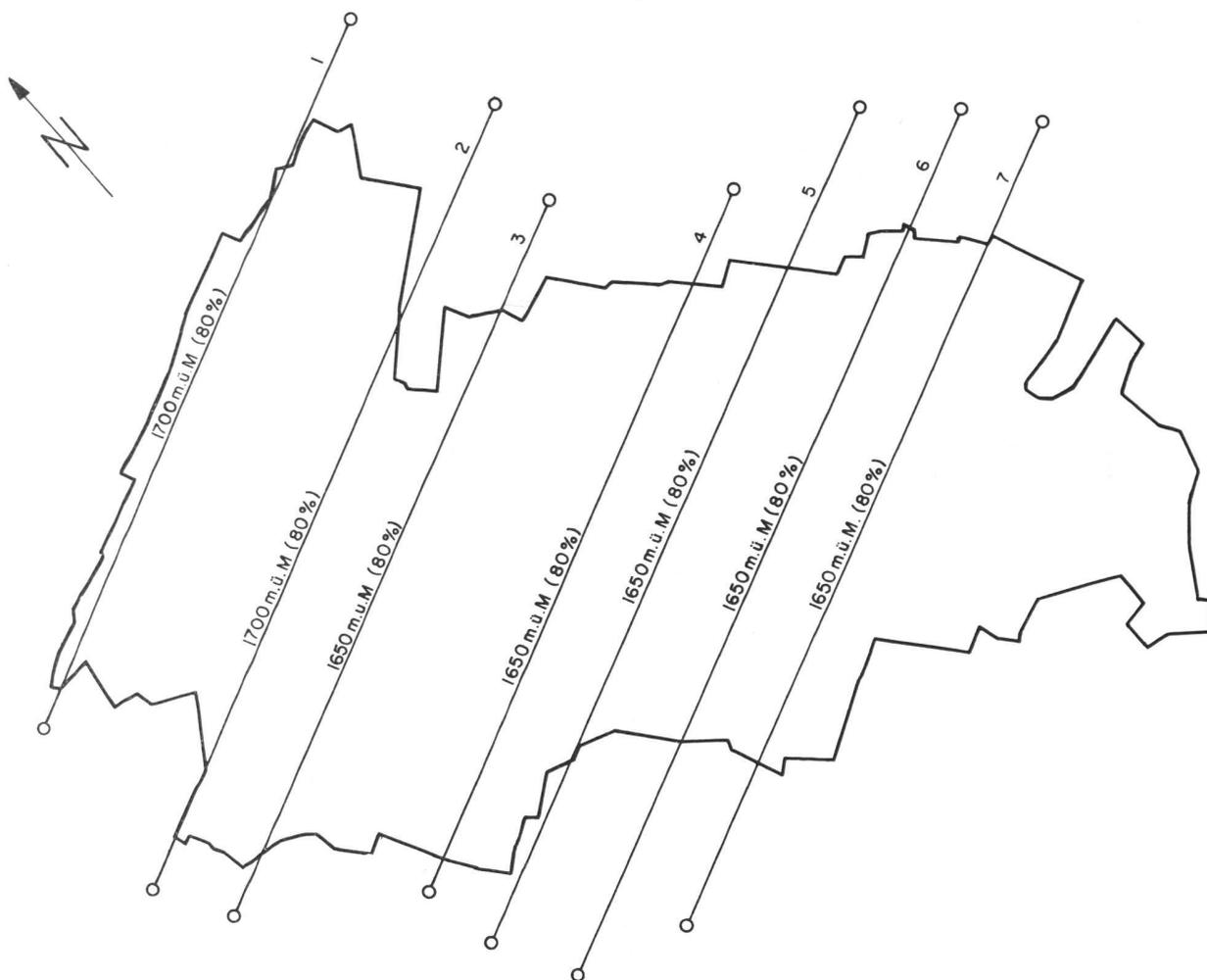


Abb. 2

Diese Zeiten sind hoch. Sie dürften zum Teil darin begründet sein, daß der Operateur das erstmal an einem Stereokomparator gearbeitet hat. Sie bestätigen aber auch die bekannte Tatsache, daß es von einer gewissen Punktzahl an lohnend ist, auf einem Analoggerät zu messen, da der Wegfall der relativen Orientierung am Komparator bald einmal durch den langsameren Meßvorgang eingeholt wird. Das Ausmessen in einem parallaxenfreien Modell ist zudem weniger ermüdend als am Komparator, wo ja nur im Meßmarkenbereich Parallaxenfreiheit herrscht.

Von den 2050 signalisierten Grenzpunkten ließen sich 130 bei der Ausmessung nicht identifizieren. Ursache für diesen hohen Prozentsatz war die zu weit fortgeschrittene Bewuchshöhe. Er entspricht einem Ausfall von rund 6% (inkl. Festpunkte), doch muß betont werden, daß alle identifizierbaren Punkte im Endergebnis eine richtige Koordinate lieferten. Dies wurde damit erreicht, daß bei etwa 10 groben Fehlern von auf zwei oder mehreren Modellen figurierenden Punkten alle Koordinatenwerte bis zum Schluß beibehalten wurden. Ein terrestrisches Kontrollmaß (siehe 1.7) ließ die richtige Koordinate sofort erkennen.

Zur Frage des Bildmaßstabes ist zu erwähnen, daß dieser für die Ausmessung am Stereokomparator eher zu groß gewählt worden ist, was bei der Punkteinstellung zum schon beschriebenen «Schwimmen» der Meßmarke im Grenzpunkt führte. Ein Maßstab von 1:5500 wäre sehr wahrscheinlich

geeigneter gewesen. Es muß an dieser Stelle in Erinnerung gerufen werden, daß es sich um die Toleranzzone III handelt. Von der Genauigkeit her gesehen wäre daher ein noch kleinerer Bildmaßstab möglich gewesen. Dann aber taucht das Problem der Signalisierung wieder auf, da die Fläche von 12×12 cm bald einmal zu klein wird und durch eine Signaltafel oder ähnliches vergrößert werden muß. Die Punktmeßmarke mit symmetrischen Außenkreisen hat am STK-1 einen Durchmesser von $20 \mu\text{m}$. Daher dürfte der Maßstab bei Steinen von 12×12 cm nicht unter etwa 1:6000 fallen.

Als recht mühsam und zeitraubend erwies sich bei der Ausmessung die Tatsache, daß die vergrößerten Bilder meistens nicht den sich im Gerät befindenden zwei Bildern entsprechen. Dies verursacht oft Orientierungsschwierigkeiten beim Aufsuchen der Punkte und bedingt zudem, daß sowohl auf dem vergrößerten Bild wie auch in der Kontaktkopie gesucht werden muß. Andererseits ist es wenig sinnvoll, sämtliche Bilder vergrößern zu lassen und auf ihnen alle Punkte einzutragen. Es wird daher nicht einfach sein, hier eine bessere Lösung zu finden.

1.7 Kontrollmaße

Es war nicht vorgesehen, Kontrollmaße systematisch aufzunehmen, da die Grenzpunktdichte in den meisten Fällen

als zu schwach erschien. Kontrollmaße sind daher nur in den folgenden Fällen erhoben worden:

- a) wo Identifizierungsschwierigkeiten wegen Verdeckung zu erwarten waren,
- b) nachträglich bei Punkten, die bei Doppelbestimmung aus zwei oder mehreren Modellen Differenzen von 15 bis 20 cm aufwiesen, oder dann bei groben Numerierungs- oder Meßfehlern (etwa 10 Fälle).

Der größte Teil der unter a) aufgenommenen Maße erwies sich später als nicht unbedingt notwendig. Handkehrum hätten bei vielen Punkten auch Kontrollmaße nicht genügt, da solche Punkte auf keinem Bild zu identifizieren waren. Das führte zum schon erwähnten Ausfall von etwa 6%. Immerhin gelang es dank den Kontrollmaßen, sämtliche unter b) erwähnten Punkte eindeutig zu bestimmen. Eine Zusammenstellung der 228 gemessenen Maße zeigt eine durchschnittliche Abweichung zwischen Feldmessung und Photogrammetrie von 3 cm, was bestimmt als erfreuliches Ergebnis angesehen werden kann.

2. Berechnung nach der Bündelmethode

Zur Berechnung der Grenz- und Situationspunkte wurde das vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETHZ publizierte Programmsystem [1] benützt, das jedoch für die Berechnung einer Grundbuchvermessung nicht unmittelbar verwendbar ist, da es hauptsächlich für Aerotriangulationen konzipiert wurde.

Trachtet man bei der Programmkonzeption für Aerotriangulation hauptsächlich danach, einen möglichst großen Blockverband simultan ausgleichen zu können, so tritt dieses Problem bei einer Grundbuchvermessung wegen der flächenmäßig beschränkten Ausdehnung naturgemäß zurück. Dafür nimmt die Punktdichte stark zu: Bilder mit über 300 Punkten sind keine Seltenheit, während bei Aerotriangulationen wohl kaum mehr als 20 Punkte in einem Luftbild auftreten.

So galt es zunächst, die ETH-Version zu modifizieren, um sie den neuen Forderungen anzupassen. Es sei bereits vorweggenommen, daß die Anpassung aus zeitlichen Gründen nicht konsequent durchgeführt werden konnte. So verzichtete man auf eine Änderung des Bündelprogrammes – eine Änderung, die unterdessen nachgeholt und bei anderen Operaten mit Erfolg angewendet wurde. Darüber soll ausführlicher an anderer Stelle berichtet werden.

Wir setzen voraus, daß der generelle Rechenablauf nach der Bündelmethode bekannt ist [1, 2]. Im folgenden wird deshalb auf eine eingehende Beschreibung der Zwischenschritte verzichtet und nur deren Ergebnis mitgeteilt.

Wie erinnerlich, liegen zwischen den gemessenen Komparatorkoordinaten und der Bündelausgleichung Zwischenschritte, die vor allem zweierlei bezwecken: einerseits Berechnung von genäherten Koordinaten für alle an der Ausgleichung teilnehmenden Punkte und andererseits Prüfung des Datenmaterials auf formale Fehler (z.B. Punktnumerierungsfehler) und auf Meßfehler.

Dem zuletzt genannten Zweck kommt bei der Grundbuchvermessung angesichts der großen Datenmenge erhöhte Bedeutung zu, denn nur durch eine möglichst umfassende Fehlersuche ist es möglich, die hohe Zuverlässigkeit, wie

man sie von einer Grundbuchvermessung erwartet, zu erreichen.

2.1 Zwischenschritt: Umwandlung der Lochstreifen und Bildkoordinatenbereinigung (Programm BKBBER)

Wie in Abschnitt 1.6 erwähnt, wurden die Luftbilder an einem Stereokomparator gemessen. Die Registrierung erfolgte auf 5-Kanal-Lochstreifen.

Da am Rechenzentrum der ETHZ nur Lochstreifen im ASC II-Code direkt verwertet werden können, mußten die Streifen zunächst umgewandelt werden, um sie als Inputdaten für das BKBBER-Programm verwenden zu können. Die Umwandlung selbst bot keine Schwierigkeiten; hingegen überraschte wieder einmal die Tatsache, daß das Einlesen von Lochstreifen – technisch gesehen ein wenig anspruchsvoller Vorgang – zu erstaunlichen Schwierigkeiten führen kann.

Die umgewandelten Lochstreifen wurden auf einem Magnetband gespeichert. Eine gewisse Unannehmlichkeit bestand darin, daß das Ende eines Flugstreifens nicht mit dem physikalischen Ende eines Lochstreifens identisch war, denn alle folgenden Berechnungen basieren auf einem Flugstreifen als Einheit.

Im Programmschritt BKBBER geht es darum, die gemessenen Punkte vom Komparator- in das Bildkoordinatensystem zu transformieren. Dies geschieht auf Grund der Rahmenmarken, deren Koordinaten in beiden Systemen bekannt sind. Gleichzeitig mit der Transformation wurden die Bildpunkte um folgende systematische Fehler korrigiert:

- Komparatorfehler: Nicht-senkrecht-Stehen der Koordinatenachsen; ungleicher Maßstab in den beiden Richtungen
- Filmverzug
- Verzeichnung
- Refraktion

Durch den Ansatz einer affinen Transformation ist es möglich, die beiden erstgenannten Fehlerquellen zu erfassen. Die Verzeichnung wird durch die numerische Auswertung der Verzeichnungskurve berücksichtigt. Der Refraktionsberechnung liegen die Daten der Normatmosphäre, festgelegt durch die International Commission for Air Navigation, zugrunde.

Da man aus Zeitgründen auf die Doppelmessung der Punkte verzichtete (siehe 1.6), entfiel eine der Kontrollmöglichkeiten des Datenmaterials.

2.2 Zwischenschritt: Programm MITTEL 1

Da am Stereokomparator modellweise gemessen wird, kommen alle Bilder zweimal vor. Das Programm MITTEL 1 vereinigt die zwei identischen Bilder und vergleicht gleichzeitig die in den beiden Modellen identischen Punkte (Modellverknüpfungspunkte). Alle Punkte, die eine frei wählbare Toleranz überschreiten, werden speziell bezeichnet.

Im Block «Le Bémont» haben 103 Punkte die Grenze von 15 μm überschritten, davon 16 auch die Grenze von 20 μm . Weitere 8 Punkte waren grob falsch (Punktnumerierungsfehler). Alle Punkte, deren Differenz größer als 20 μm war, wurden unnummeriert, damit ihre Fehler in späteren Zwischenschritten gefunden werden konnten.

Der aus den Differenzen errechnete mittlere Fehler einer Einfachmessung beträgt $\pm 5,2 \mu\text{m}$ in X- und $\pm 3,8 \mu\text{m}$ in Y-Richtung. Nebst den eigentlichen Meßfehlern sind darin auch noch systematische Anteile (z. B. Restfehler des Filmverzuges) enthalten.

2.3 Zwischenschritt: Programm STRIP

Das Programm STRIP dient der Berechnung des Folgebildanschlusses, indem aus den Bildkoordinaten eines Streifens Modellkoordinaten berechnet werden, die sich auf ein einheitliches Streifenkoordinatensystem beziehen. Diese Berechnung bezweckt zweierlei: einerseits Ermittlung von Streifenkoordinaten, aus denen sich Näherungen für die Bodenpunkte ermitteln lassen, und andererseits eine weitere Überprüfung der gemessenen Bildkoordinaten.

An der rechnerischen relativen Orientierung nehmen alle Bildpunkte teil. Da fünf Punkte ausreichen, ergibt sich eine starke Überbestimmung. Zur Genauigkeitsbeurteilung werden die Parallaxen im Modellraum errechnet (kürzester Abstand der zwei windschiefen Geraden, die sich theoretisch schneiden sollten). Der Modellmaßstab wurde gleich dem Bildmaßstab gewählt; somit lassen sich die Parallaxen direkt mit den Bildfehlern vergleichen.

In einem ersten Durchgang wurden ausschließlich die Bündelpunkte¹ verwendet. Der quadratische Mittelwert der Restparallaxen beträgt dabei nur $\pm 1,9 \mu\text{m}$. Von insgesamt etwa 1500 gemessenen Bündelpunkten wiesen deren 26 eine größere Parallaxe als $\pm 10 \mu\text{m}$ auf. Größere Werte als $\pm 15 \mu\text{m}$ traten nicht auf. Das überraschend gute Resultat ist wahrscheinlich auf die besonders sorgfältige Auswahl und Messung der Bündelpunkte zurückzuführen.

Zieht man zur Streifenbildung auch noch die Grenzpunkte bei, so steigt der quadratische Mittelwert auf $\pm 2,6 \mu\text{m}$ an, ein noch sehr guter Betrag, liegt er doch in der Größenordnung der Meßgenauigkeit. Größere systematische Bildfehler sind demnach nicht vorhanden.

2.4 Zwischenschritt: Programm SCHUT

Mit den im Abschnitt 2.3 berechneten Streifenkoordinaten wird eine provisorische Blockausgleichung mit Polynomen durchgeführt. Es handelt sich dabei um das bekannte, von Schut entwickelte Programm des National Research Council of Canada.

Die durch eine Polynomausgleichung ermittelten Koordinaten sind bereits sehr gut: Der aus den Differenzen zu den vorhandenen Festpunkten (Triangulations- und Polygonpunkte, vgl. Abb. 3) errechnete mittlere Fehler beträgt $\pm 6 \text{ cm}$ für X- und Y-Richtung sowie etwa $\pm 10 \text{ cm}$ für die Höhe.

Es muß allerdings festgehalten werden, daß sich diese Resultate nur erreichen lassen, wenn die Streifenkoordinaten auf rechnerischem Weg bestimmt werden, denn es zeigt sich, daß besonders beim Folgebildanschluß die analytische Photogrammetrie den Analoggeräten hoch überlegen ist. Weiter gilt es zu bedenken, daß derart gute Resultate nur auf Grund zahlreicher Paßpunkte (Abb. 3) erreicht werden

¹ Als Bündelpunkte werden hier diejenigen Bildpunkte bezeichnet, die an der Bündelausgleichung teilnehmen. Die übrigen Punkte werden als Grenz- beziehungsweise als Kulturgrenzpunkte bezeichnet.

können. Hier liegt ein wichtiger Unterschied zur Bündelmethode; bei ihr sind für gleich gute Resultate bedeutend weniger Paßpunkte nötig. So reichen zum Beispiel im Block Bémont bereits 6 bis 8 Paßpunkte aus, um die gleichen Resultate zu erzielen wie mit 38 Paßpunkten bei der Polynomausgleichung!

Abschließend sei noch erwähnt, daß die Grenz- und Kulturgrenzpunkte mit Hilfe der Polynomausgleichung bestimmt wurden. Als Paßpunkte kamen zu den bereits erwähnten Triangulations- und Polygonpunkten noch die Bündelpunkte, deren Sollkoordinaten durch eine Bündelausgleichung (siehe 2.5) ermittelt wurden.

2.5 Definitive Bündelausgleichung

Mit den im Abschnitt 2.4 bestimmten genäherten Bodenkoordinaten und mit den bereinigten und nach den Zwischenschritten 1 bis 4 ausführlich getesteten Bildkoordinaten erfolgte die definitive Ausgleichung nach der Bündelmethode. Wie bereits einleitend erwähnt, wurde dazu das unveränderte ETH-Programm BUEND benutzt. Dieses erlaubt lediglich, 50 Punkte pro Luftbild in die Ausgleichung zu nehmen. Da teilweise über 500 Bildpunkte auftraten, mußten die 50 Punkte bereits vor den Messungen speziell ausgewählt werden. Sie heißen Bündelpunkte. Nur nebenbei sei erwähnt, daß dieser Arbeitsvorgang inzwischen automatisiert wurde, so daß dazu keine speziellen Vorbereitungen mehr nötig sind.

Wie aus Abbildung 3 hervorgeht, sind zu den vorhandenen Triangulationspunkten noch gegen 30 Punkte 5. Ordnung terrestrisch bestimmt worden. Der vorliegende Versuch sollte auch Aufschluß geben, ob künftig solche zusätzlichen Punkte 5. Ordnung durch die Photogrammetrie selbst bestimmt werden können.

Um diese Frage zu beantworten, wurde der ganze Block nur mit den vorhandenen 12 Triangulationspunkten ausgeglichen (Abb. 3). Hierauf konnte man die Differenzen zu den terrestrisch bestimmten Punkten bilden und daraus den quadratischen Mittelwert rechnen (Tabelle 1).

Anzahl Paßpunkte	Anzahl Vergleichspunkte	Quadratische Mittelwerte (cm)			Mittlere Gewichteinheitsfehler (μm)	
		X	Y	Z	m_x	m_y
12	26	5,3 4	5,0 4	8,4 7	4,3	5,6

Tabelle 1

Die Differenz zwischen photogrammetrisch und terrestrisch bestimmten Punkten enthält natürlich neben den Fehleranteilen der Photogrammetrie auch diejenigen der terrestrischen Bestimmung und Berechnung. Wie in 1.1 angegeben, dürfte der mittlere Fehler der terrestrisch bestimmten Punkte etwa $\pm 3 \text{ cm}$ bis $\pm 5 \text{ cm}$ betragen. Bringt man diesen Anteil vom quadratischen Mittelwert in Abzug, so entsteht der rein photogrammetrische Fehleranteil. Auf der zweiten Zeile der Tabelle 1 sind die photogrammetrischen Anteile aufgeführt, nachdem an den Gesamtbeträgen ein terrestrischer Anteil von $\pm 3 \text{ cm}$ abgezogen wurde. Man erkennt, daß beide Anteile etwa gleich groß sind. Damit wird an einem praktischen Beispiel deutlich, was theoretisch vor-

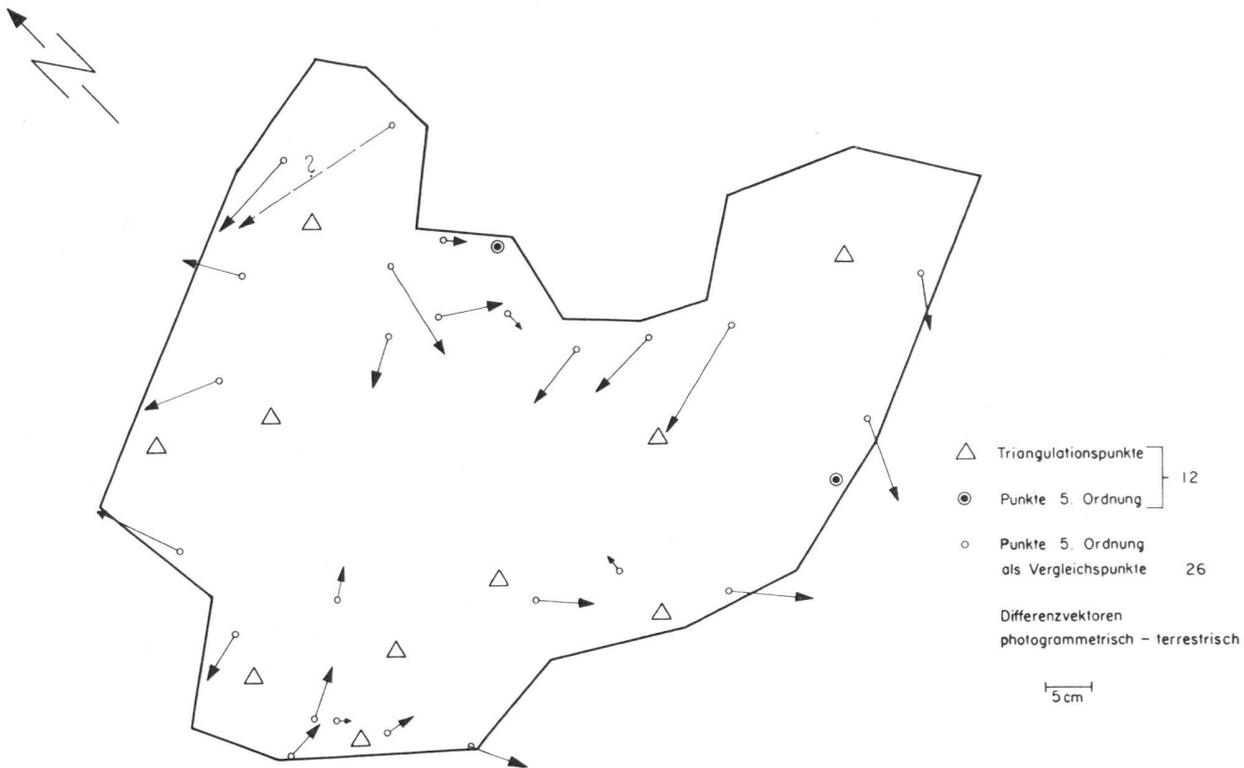


Abb. 3

auszusehen war: Punkte 5. Ordnung lassen sich ohne weiteres photogrammetrisch durch eine Bündelausgleichung bestimmen. Die dabei erreichte Genauigkeit entspricht derjenigen, wie sie durch Präzisionspolygonierung mit elektrooptisch gemessenen Distanzen erhalten wird.

3. Abschließende Beurteilung

Um das Positive vorwegzunehmen: Der Versuch hat genauigkeitsmäßig die in ihn gesteckten Erwartungen nicht nur erreicht, sondern übertroffen. Die Genauigkeit erfüllt höhere Ansprüche als die der Toleranzzone III; sie hätte auch für die Toleranzzone II genügt.

In Zukunft könnten gewisse Dinge besser gemacht werden. So ist zum Beispiel ein kleinerer Bildmaßstab von etwa 1:6000 bestimmt von Vorteil, da sich damit die Genauigkeit nicht wesentlich reduziert, aber viel weniger Bildmaterial anfällt. Die Nachteile der punktwisen Kulturauswertung sind schon in 1.4 aufgezeigt worden.

Der Versuch hat vor allem ein Problem der analytischen Photogrammetrie aufgezeigt. Deren Methoden verlangen, insbesondere was die Meß- und die Rechenarbeiten betrifft, einen hohen technologischen Stand; und dies bedingt ein großes Know-how, um die Methode überhaupt zum Spielen zu bringen. Dieses Know-how kann nur aufrechterhalten und erweitert werden, wenn eine eingespielte Equipe jährlich mehrere derartige Neuvermessungen bearbeiten kann.

In gewissem Sinne muß dabei die Photogrammetrie industrialisiert werden. Fehlt eine solche Auftragskonstanz, so läuft man Gefahr, gewisse Fehler immer wieder zu begehen. Ein weiterer Punkt betrifft die notwendigen Investitionen. Es kann von keinem Geometerbüro erwartet werden, daß es sich einen Komparator sowie ein Bündelprogramm erwirbt, wenn es nur alle zwei Jahre eine photogrammetrische Neuvermessung durchzuführen hat. Es besteht hier eine analoge Situation wie bei der Berechnung von terrestrisch aufgenommenen Grundbuchvermessungen mittels EDV, wo ja auch nur gewisse spezialisierte Zentren die Arbeit ausführen können.

Sind diese Voraussetzungen erfüllt, so kann die analytische Photogrammetrie – und dies hat der Versuch mit aller Deutlichkeit gezeigt – sehr genaue Ergebnisse liefern. Bei richtiger Anwendung liegen hier Möglichkeiten, die nach Meinung der Verfasser bei Neuvermessungen besonders in unwegsamen Gebieten zu einem Zeitgewinn und letztlich auch zu einer Kostenreduktion führen können.

Literatur

- [1] T. Schenk: FORTRAN-Programme zur photogrammetrischen Blocktriangulation nach der Bündelmethode. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETHZ. Computerprogramme Nr. 2.
- [2] T. Schenk: Arbeiten und Entwicklungen zur analytischen Photogrammetrie am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETHZ. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik Nr. 3, 1972.