

NUMERISCHE PHOTOGRAMMETRIE - ZWISCHENBILANZ EINER INTENSIVEN ENTWICKLUNG

Von F. Ackermann, Stuttgart

1. Numerische Photogrammetrie - Rückblick

1.1 Zur Begriffsbestimmung

Am Beginn dieser Vortragsreihe ist es angebracht, eine allgemeine Standortbestimmung über Methoden und Ziele der numerischen Photogrammetrie zu geben und die Entwicklungen, über die in den nachfolgenden Vorträgen berichtet wird, entsprechend einzuordnen.

Es ist offenkundig, daß sich die numerische Photogrammetrie seit einer Reihe von Jahren in einer Phase der intensiven und erfolgreichen Entwicklung befindet. Die Gründe dafür sind nicht ohne weiteres ersichtlich, denn die Elemente und die Gegenstände dieser Entwicklung sind schon seit längerer Zeit gegeben, sie allein sind also als Erklärung nicht hinreichend.

Die numerische Photogrammetrie läßt sich zwar als die Gruppe photogrammetrischer Verfahren und Anwendungen definieren, bei denen in der Durchführung die digitale Berechnung, d.h. tatsächliche Zahlenrechnung eine wesentliche Rolle spielt. Bis vor kurzem konnte man noch sagen, daß es sich im Prinzip um alle Verfahren mit numerischen Ergebnissen handelt. Das gilt jedoch neuerdings nicht mehr, höchstens noch im Sinne wesentlicher Zwischenergebnisse.

Diese Definition besagt jedoch nichts über den konkreten Inhalt der numerischen Photogrammetrie und tatsächlich ist sie nicht vom Inhalt her, sondern nach der Arbeitsweise, d.h. operationell definiert. Damit gehören z.B. auch die

neueren Entwicklungen, die graphische Endergebnisse im wesentlichen mit numerischen Methoden ableiten, zum Arbeitsbereich der numerischen Photogrammetrie, immer vorausgesetzt, daß photogrammetrische Meßaufnahmen den wesentlichen Ausgangspunkt bilden.

Vielleicht sollte vorab auch darauf hingewiesen werden, daß mit numerischer Photogrammetrie nicht die Tatsache gemeint ist, daß die Theorie der Photogrammetrie von Anfang an mathematisch-geometrisch war, insbesondere die Modellvorstellung der Luftaufnahmen als perspektiver Abbildungen. Die Methoden und Geräte der Photogrammetrie sind schon stets mathematisch hergeleitet, begründet oder beschrieben worden.

1.2 Einige Bemerkungen zur Entwicklungsgeschichte

Bis 1920. Im Sinne der Charakterisierung der numerischen Photogrammetrie durch digital-rechnerische Arbeitsverfahren ist diese Disziplin sehr alt. Wir brauchen nur an den Koppe'schen Bildtheodolit und an den Pulfrich'schen Stereokomparator zu denken, mit denen die rechnerische Bestimmung einzelner Punkte nach Lage und Höhe möglich war. Die numerische Methode war damals praktikabel, da man bei der terrestrischen Photogrammetrie häufig vom Normalfall, zumindest aber von gegebener äußerer Orientierung der Aufnahmen ausgehen konnte.

Nach dem ersten Weltkrieg hat man verschiedentlich versucht, das Prinzip der numerischen punktwisen Auswertung auch auf Luftaufnahmen zu übertragen. Im Rückblick ist es nicht verwunderlich, daß diesen Bemühungen kein Erfolg beschieden war:

- Angesichts der Kompliziertheit der Aufgabe reichten die Rechenhilfsmittel (Logarithmentafel) nicht aus, die Berechnungen schnell und wirksam genug durchzuführen
- graphische Ergebnisse standen im Vordergrund des Interesses.

Bis 1960. Ohne auf die geschichtliche Entwicklung im einzelnen einzugehen kann sehr pauschal festgestellt werden, daß der Aufschwung und der große Erfolg der Photogrammetrie in der

Zeit von etwa 1925 bis 1960 gerade durch Abkehr von digitalen Methoden bedingt war. Die Praxis der Luftbildmessung beruhte im Gegensatz zu digitalen fast ausschließlich auf analogen Methoden, d.h. die wesentlichen Probleme wurden instrumentell gelöst. Diese Entwicklung begann mit dem Orel-Zeiss'schen Stereo-Autograph 1908 und erreichte einen gewissen Höhepunkt in der Zeit zwischen 1925 und 1940, als alle wesentlichen Instrumente und Methoden entwickelt wurden, die bis etwa um 1960 (und weitgehend noch bis heute) die Praxis der Luftbildmessung bestimmten.

Selbst die durch Koordinatenbestimmung von Einzelpunkten gekennzeichneten Aufgaben, wie z.B. die Aerotriangulation, wurden nach Möglichkeit graphisch oder mechanisch gelöst. Der große Erfolg der Blocktriangulation nach dem Schlitzschablonen-Verfahren sei hier als Beispiel genannt. Im Gegensatz dazu blieben die rein numerischen Methoden relativ erfolglos oder scheiterten kläglich, wie z.B. die numerische Radialtriangulation.

Die ganzen Denkvorstellungen waren damals so sehr auf instrumentelle, nicht numerische Verfahren ausgerichtet und auch von ihnen geprägt, daß Otto von Gruber in seinem bekannten Ausspruch rechnerische Verfahren als a priori gedankenlos hinstellen konnte. Diese einseitigen Denkvorstellungen haben zweifellos den Erfolg der Photogrammetrie getragen, sie haben aber gleichzeitig andere Entwicklungen verhindert. Zum Beispiel hätten von der Theorie und von der Technologie her schon damals Analogrechner für die Blockausgleichung entwickelt werden können.

Umschwung Ende der 50er Jahre. Der Umschwung auf numerische Verfahren bahnte sich erst kurz vor und um 1960 an. Er hatte seine Vorläufer (z.B. wurden in Großbritannien und den USA schon seit den 40er Jahren analytische Modellberechnungen angewendet), verlief im einzelnen sehr ungleichmäßig und wurde überhaupt nur an wenigen Stellen intensiv vorangetrieben.

Als Ursachen für diesen Umschwung zugunsten der numerischen Photogrammetrie werden üblicherweise 3 Punkte genannt:

- Erweiterte und neue Aufgabenbereiche (mit Punktbestimmung als Ziel) und damit zusammenhängend gesteigerte Genauigkeitsanforderungen (Ballistik, Aerotriangulation, Katasterphotogrammetrie)
- Entsprechende Geräteentwicklungen (Registriervorrichtungen und Stereokomparatoren)
- Allgemeine Entwicklung der Rechenanlagen und der elektronischen Datenverarbeitung

Diese Ursachen haben ausgereicht, um einen gewissen Trend zu numerischen Verfahren zu erzeugen. Aber eigenartigerweise waren sie nicht wirksam genug, um die numerische Photogrammetrie auf breiter Basis in die Praxis zu bringen. An einzelnen Stellen wurden die numerischen Methoden und Anwendungen zwar vorangetrieben und realisiert, aber aufs Ganze gesehen ging es doch noch über ein Jahrzehnt enttäuschend langsam voran und die Masse der praktischen Anwendungen kam lange Zeit nicht oder kaum in Bewegung. Dies war besonders deutlich in den USA zu verfolgen, wo neben einigen Zentren mit hochentwickelter analytischer Photogrammetrie und völlig unbeeinflusst von ihnen die praktische Alltagsphotogrammetrie völlig auf Analog-Instrumente und graphische Methoden ausgerichtet blieb.

Obwohl also alle Voraussetzungen und sogar Notwendigkeiten gegeben zu sein schienen, stagnierte die Einführung der numerischen Methoden in die Praxis nach gewissen Anfangserfolgen für fast ein Jahrzehnt. Dafür lassen sich im Rückblick einige Gründe aufzeigen:

- Die Leistungsfähigkeit der verfügbaren Computer wurde überbewertet

- Der Aufwand für die Programmentwicklungen und die selbständige Bedeutung der sogenannten Software wurde (und wird immer noch) weit unterschätzt.
- Der wichtigste und entscheidende Gesichtspunkt ist jedoch, daß man sich methodisch nicht von der alten Denkweise gelöst und nicht auf die neuen technischen Möglichkeiten wirklich umgestellt hat.
- Als Folge davon waren die Ergebnisse der numerischen denen herkömmlicher Methoden kaum überlegen, sodaß die Notwendigkeit einer Umstellung bezweifelt werden konnte.

Der Gesichtspunkt der Denkweise ist wesentlich und bedarf einiger Erläuterungen, da er stets eine gewisse Rolle spielt. Meiner Meinung nach ist die numerische Photogrammetrie der 60er Jahre in vielerlei Hinsicht eine Extrapolation der vorher üblichen mathematischen Denkmodelle geblieben und keine aufgrund neuer Gegebenheiten von Anfang an neu überlegte und unabhängig konzipierte Entwicklung. Es hat natürlich wichtige Ausnahmen gegeben, aber im Gesamtbild dominiert doch der Eindruck, daß die Entwicklungen der 60er Jahre weitgehend nur eine Extrapolation der vorher üblichen Denkmodelle waren. Folgende Beispiele können als Beleg dafür gelten:

- Die sogenannte analytische Photogrammetrie (abgesehen von dem allgemeinen Ansatz von H. Schmid, der zwar schon 1957 veröffentlicht, aber erst ein Jahrzehnt später realisiert wurde) war praktisch nur mit der relativen und absoluten Orientierung des Einzelmodells beschäftigt. Die weitere Behandlung der Einzelmodelle bei der Streifen- und Blockausgleichung blieb den herkömmlichen Interpolationsverfahren überlassen. Auch die Art der Modell- und Orientierungsberechnungen, einschließlich des Folgebildanschlusses bei der Streifentriangulation folgte vollständig den für instrumentelle Verfahren aus gutem Grund eingeführten traditionellen Methoden. Man war also im Vergleich zu den instrumentellen Verfahren kaum weiter gekommen und brauchte sich eigentlich nicht zu wundern, daß die analytische Photogrammetrie damals die Genauigkeitsleistungen kaum gesteigert hat.

- Die heute noch weit verbreiteten Polynom-Methoden der Streifen- und Blockausgleichung, auch wenn sie sich der Elektronenrechner bedienen, sind einfache Erweiterungen der alten graphischen oder halbmechanischen Korrekturmethode.
- Als ein weiteres Beispiel traditioneller Denk- bzw. traditioneller Organisationsmodelle kann man die Tatsache anführen, daß jeder Betrieb und jede photogrammetrische Dienststelle aus der Organisation der früheren Rechenbüros heraus ihren eigenen und damit notwendigerweise kleinen Elektronenrechner haben wollte. Diese Einstellung war verständlich und unmittelbar auch zweckmäßig. Aber sie hat zu notwendigerweise beschränkten Programmentwicklungen geführt, von denen wegen der verschiedenen Programmiersprachen ein großer Teil nicht weitergeführt werden konnte. Entscheidend ist aber, daß diese Situation den Blick auf übergeordnete Entwicklungen versperrt und sie in gewissem Sinne verhindert hat.
- Parallel mit der Einstellung auf kleine und eigene Computer, die als verbesserte Rechenmaschinen benützt wurden, hat man sowohl die Bedeutung als auch den großen Aufwand für die Entwicklung leistungsfähiger Software unterschätzt. Deshalb sind auch fast nur Großorganisationen im Ausland in der numerischen Photogrammetrie weitergekommen, die von weniger beschränkten Voraussetzungen ausgehen konnten.

Im übrigen sei hier die Bemerkung erlaubt, daß im Bereich des Vermessungswesens die Loslösung von traditionellen Denkvorstellungen wesentlich langsamer und zäher verläuft als in der Photogrammetrie und neue Rechenverfahren nur sehr langsam Eingang finden.

1.3 Grundsätzliche Einstellung auf numerische Verfahren in der Gegenwart.

Im Rückblick sind die 60er Jahre als eine Anlaufs- und Vorbereitungszeit aufzufassen, in der die wichtigsten Ideen zwar alle vorhanden waren, ihr Eindringen in die reguläre

Praxis sich aber nur langsam bzw. nur an einzelnen Stellen vollzog. In den meisten Fällen wurde die Entwicklung nur soweit getrieben, bis die unmittelbaren, an herkömmlichen Zielen orientierten Anforderungen erfüllt waren.

Die neueste Entwicklung löst sich nun in zunehmendem Maße von den traditionellen Zielvorstellungen. Seit einigen Jahren greift man die Möglichkeiten der numerischen Photogrammetrie grundsätzlicher auf als bisher. Man will nicht nur gerade das verwirklichen was von der konventionellen Praxis her verlangt wird, sondern will vielmehr mit allgemeineren Methoden und Lösungen ganze Bereiche überdecken, um so einen Freiraum für neue Anwendungen oder in vieler Hinsicht gesteigerte Leistungen zu schaffen, in den die Praxis nachziehen und die gebotenen Möglichkeiten aufgreifen wird.

Die neueren Entwicklungen mit ihren zugrundeliegenden Auffassungen scheinen sich zwar nur graduell von den bisherigen abzuheben. Wesentlich ist jedoch, daß die neueste Entwicklung der numerischen Photogrammetrie Ergebnisse liefert und Anwendungen erschließt, d.h. allgemein in der Praxis Auswirkungen zeigt, die sich doch sehr deutlich vom bisher Gewohnten unterscheiden.

Konkret zeichnet sich die jüngste Entwicklung dadurch aus, daß einerseits die elektronischen Rechanlagen der dritten Generation als gegebene Hilfsmittel zugrundegelegt werden. Davon ausgehend visiert man andererseits die alten und neuen Probleme des Vermessungswesens an, die der Bewältigung harren oder verbesserter Lösungen bedürfen. Die Betrachtungsweise verschiebt sich von den unter einschränkenden technischen und sonstigen Randbedingungen gegebenen Möglichkeiten in Richtung auf allgemeineres Systemdenken und umfassende Lösungen größerer Bereiche. Für die Aufgabenstellung der Punktbestimmung sind die Entwicklungen durch die Stichworte große Datenmengen, Blockmethode, Großausgleichungen gekennzeichnet. Dabei sind hoher Automationsgrad der Rechen-

systeme einschließlich möglichst automatischer Datenverwaltung und -zuordnung mit möglichst geringer Belastung der Meßverfahren durch Anordnungs- oder Kodierungsvorschriften wesentliche Elemente.

Die jüngste Entwicklung der numerischen Photogrammetrie hat dank der mächtigen Rechenhilfsmittel bereits einen beträchtlichen Teil des unmittelbaren Aufgabenkatalogs realisieren und dadurch auf einer neuen Leistungsstufe ihre praktischen Anwendungen intensivieren und ausweiten können.

Nach diesen allgemeinen Betrachtungen beschränken sich die folgenden Ausführungen auf die Entwicklungen am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart. Sie beabsichtigen gleichzeitig, einen Überblick über die Vorträge dieses Lehrgangs zu geben und deren Zusammenhänge aufzuzeigen.

2. Photogrammetrische Punktbestimmung durch Blockausgleichung

2.1 Erster Lehrgang über numerische Photogrammetrie an der Technischen Akademie Esslingen 1971.

Das Photogrammetrische Institut der Universität Stuttgart beschäftigt sich seit mehreren Jahren mit theoretischen, methodischen und praktischen Entwicklungen zur numerischen Photogrammetrie, zunächst speziell zur rechnerischen Aerotriangulation.

Neben Veröffentlichungen sind wir im Januar 1971 durch den ersten Kurs über Numerische Photogrammetrie an der Technischen Akademie in Esslingen mit unseren Entwicklungen an die Öffentlichkeit getreten, s. [1], [2]. Wir haben damals bewußt von einer neuen Leistungsstufe der numerischen Photogrammetrie gesprochen. Diese Qualifizierung beruhte auf der Philosophie und Zielsetzung dieser Entwicklungen. Wir strebten ein sehr allgemein brauchbares, fast unbegrenzt anwendbares, sehr leistungsfähiges, aber auch in der Entwicklung sehr aufwendiges Software-System und Methodensystem für die Aerotriangulation bzw. allgemeiner für die photogrammetrische Punktbestimmung an. Dabei setzten wir leistungsfähige Rechenanlagen als Hilfsmittel voraus und stellten uns bewußt auf große Datenmengen und

Großausgleichungen ein. Damit sollten neue Anwendungsbereiche zu erschließen und eine neue Leistungsstufe zu ermöglichen sein. Zusätzlich sollten die Rechenprogramme übertragbar sein, damit ein derartig hoher Entwicklungsaufwand nicht mehrfach aufgebracht werden müßte.

Diese Spezifikationen waren bewußt gesetzt. Sie entstanden aus der Analyse der Gründe, die vorher den echten Erfolg der numerischen Photogrammetrie verhindert haben. Wir wollten wirklich die rechnerischen und methodischen Möglichkeiten der Computer der 3. Generation ausschöpfen, weil wir von der Wirksamkeit der allgemeinen Methoden und der konsequenten Anwendung rechnerischer Verfahren überzeugt waren und weil der Bedarf, wenn man über die konventionelle Praxis hinaus an die ungelösten Probleme und an die wünschenswerten Methoden dachte, offensichtlich gegeben war.

1971 konnten wir einige Rechenprogramme vorstellen, die auf dieser Philosophie beruhten und über erste erfolgreiche Versuche aus dem Bereich der Katasterphotogrammetrie berichten. Heute, zwei Jahre später, haben wir nundarzulegen, wie die Entwicklungen inzwischen weitergegangen sind. Wir haben uns der Frage zu stellen, ob die damaligen Behauptungen und Erwartungen zu hoch geschraubt waren, ob sich die Entwicklungen in der breiten praktischen Erprobung bewährt haben und ob wir generell die damaligen Standpunkte weiterhin vertreten können.

Nachfolgend werden diese Fragen in der Übersicht beantwortet, genauere Ausführungen dazu werden weitere Vorträge im Verlaufe dieses Lehrganges bringen.

2.2 Großcomputer

Unsere sämtlichen Entwicklungen setzten leistungsfähige Rechenanlagen voraus, die sich zur Durchführung von Großausgleichungen eignen. Die Gründe waren mehrfacher Art:

- Für große Aufgaben sollten ganz allgemein die angemessenen technischen Hilfsmittel benützt werden
- Großcomputer arbeiten relativ billiger als kleine
- Großcomputer sind in zunehmendem Maße verfügbar

Ende 1970 waren in der Bundesrepublik 6350 Computer installiert oder bestellt, davon konnten etwa 200 als ausgesprochene Großcomputer mit Monatsmieten über 100 000.- DM gelten. Die hohe Steigerungsrate mit einer Verdoppelung des Computerbestandes innerhalb von nur 2 1/2 Jahren ließ erwarten, daß in der Bundesrepublik in sehr kurzer Zeit genügend leistungsfähige Rechenanlagen zur Verfügung stehen müßten.

Die neueste Diebold-Statistik [3] bestätigt nach dem Stand vom 1.7.1972, daß diese Entwicklung angehalten hat, s. Abb. 1, Tabellen 1 und 2. Insbesondere ist der Anteil der Großcomputer überproportional gewachsen. Die Statistik weist für den 1.1.1972 8 164 Computer, für den 1.7.1972 8 742 Computer aus. Das entspricht einer jährlichen Steigerungsquote von 15 %. Zu den gleichen Stichtagen betrug die Zahl der Großcomputer über 80 000.- DM Monatsmiete 358 und 407 bzw. über 40 000.- DM Monatsmiete 1101 und 1246. Zu letzterer Gruppe zählen zum Beispiel Rechenanlagen des Typs IBM 370/145, die für Blockausgleichungen noch geeignet sind. Diesen Zahlen entsprechen jährliche Steigerungsquoten von 29 bzw. 28 %. Hier schlägt sich im wesentlichen der Erfolg der Modelle der 370er Serie von IBM nieder. Die Diebold-Statistik weist zum 1.7.1972 aus der IBM-Serie 370 insgesamt 128 Anlagen des Modells 145, 97 Anlagen des Modells 155 und 19 Anlagen des Modells 165 aus. Abgesehen vom letzten Typ haben sich dabei die Zahlen gegenüber dem 1. Januar 1972, also in einem Zeitraum von einem halben Jahr, mehr als verdoppelt. Am Rande sei erwähnt, daß daneben 3200 Prozeßrechner und über 35 000 Kleincomputer in der Bundesrepublik im Einsatz sind.

Der Trend zur weiteren Computerisierung in Deutschland hat also erwartungsgemäß angehalten. Durch die Einrichtung zentraler Rechenzentren bedingt hat auch die Verfügbarkeit von Großcomputern schneller als erwartet zugenommen. Dies gilt insbesondere auch für die Vermessungsbehörden in der Bundesrepublik. In mehreren Bundesländern sind heute schon Rechenanlagen des Typs IBM 370/145, /155 oder /165 oder ähnlich leistungsfähige Anlagen anderer Fabrikate verfügbar. Darüberhinaus gibt es allgemein zugängliche Rechenzentren (z.B. Control Data in Frankfurt), deren Terminalsysteme systematisch weiter ausgebaut werden.

Wir können also feststellen, daß sich das Angebot an Rechenkapazität, das im Bereich der Vermessungsverwaltungen oder über Firmen zur Verfügung steht, wesentlich schneller und günstiger als erwartet entwickelt hat.

In diesem Zusammenhang kann gleich erwähnt werden, daß sich die Übertragbarkeit der Rechenprogramme auf andere Rechenanlagen inzwischen bestätigt und bewährt hat. Das Blockprogramm PAT-M-43 ist mit mehr oder weniger großen Schwierigkeiten an insgesamt 8 verschiedenen Rechenanlagen der Fabrikate Control Data, UNIVAC und IBM installiert worden.

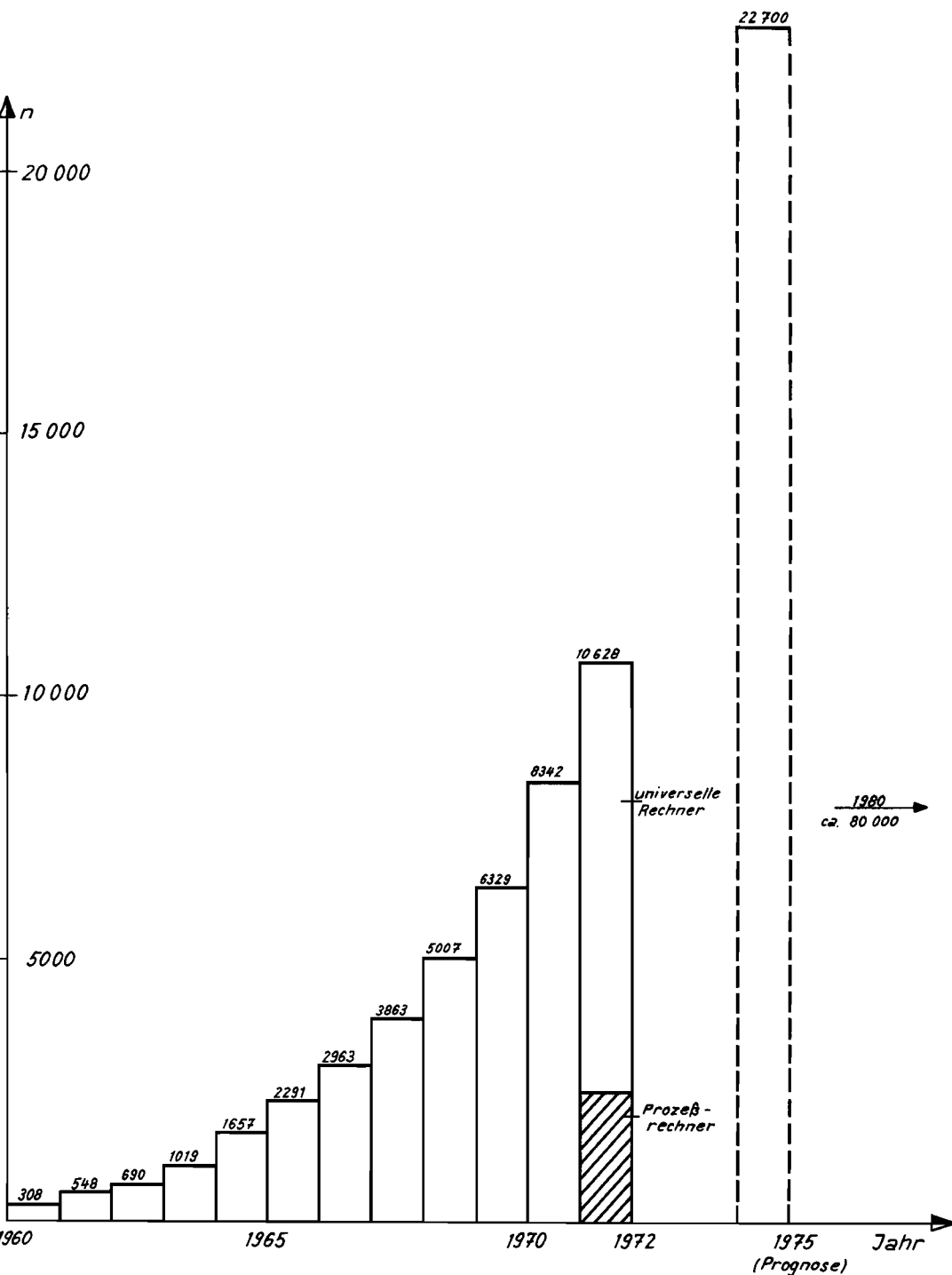


Abb. 1
 Übersicht über den Stand der elektronischen Rechenanlagen in der Bundesrepublik seit 1960 mit einer Prognose für 1975 (bzw. 1980), Quelle: Diebold-Statistik, 1972. (Monatsmiete \geq DM 2500)
 n ...Anzahl der Computer

Tabelle 1.

COMPUTER in der BUNDESREPUBLIK

 (Beispiele nach Diebold-Statistik)

| Typ | Klasse | 1.1.1972 | 1.7.1972 |
|-----------------|--------|----------|----------|
| CDC 6600 | VI | 2 | 3 |
| 6500 | VI | 1 | 2 |
| 6400 | VI | 4 | 4 |
| IBM 1130/1620 | I/II | 495 | 485 |
| 360/20 | II/III | 1625 | 1585 |
| 360/25 | III | 445 | 455 |
| 360/30 | III/IV | 800 | 795 |
| 360/40/44 | IV/V | 411 | 357 |
| 360/50 | V | 139 | 104 |
| 360/65/67 | VI | 28 | 19 |
| 360/75 | VI | 2 | 1 |
| 360/90 | VI | 1 | 1 |
| 360/195 | VI | - | 1 |
| 370/135 | IV | - | 9 |
| 370/145 | IV/V | 52 | 128 |
| 370/155 | V/VI | 37 | 97 |
| 370/165 | VI | 15 | 19 |
| Philips P 1400 | V | 1 | 3 |
| Siemens 4004/45 | IV/V | 218 | 293 |
| 4004/46 | V | 11 | 12 |
| 4004/55 | V | 19 | 19 |
| 4004/60 | V | 3 | 4 |
| 4004/150 | V/VI | - | 10 |
| 4004/151 | VI | - | 3 |
| Telefunken TR 4 | IV/V | 34 | 34 |
| TR 440 | VI | 13 | 17 |
| UNIVAC U 1106 | I/II | 5 | 5 |
| 1107 | VI | 3 | 3 |
| 1108 | VI | 16 | 16 |

Marken insgesamt:

| | | | |
|----------------|------|------|--------|
| Burroughs | 39 | 41 | 0.5 % |
| CDC | 53 | 58 | 0.7 % |
| Honeywell/Bull | 1034 | 1035 | 11.8 % |
| IBM | 5101 | 5408 | 51.8 % |
| Siemens | 578 | 701 | 8.0 % |
| Telefunken | 55 | 59 | 0.7 % |
| UNIVAC | 678 | 688 | 7.9 % |
| Zuse | 251 | 251 | 2.9 % |

Tabelle 2.

 Großcomputer in der Bundesrepublik (nach Diebold-Statistik, Okt. 1972)

| | 1.1.1972 | 1.7.1972 | jährl. Steigerung 27 % |
|--|-----------|----------|------------------------|
| Klasse IV/V | 743 | 839 | |
| davon IBM | 474 | 494 | |
| Klasse V und VI | 358 | 407 | jährl. Steigerung 29 % |
| davon IBM | 222 | 242 | |
| Zum Vergleich | | | |
| Klasse I - VI (ohne Prozeßrechner) | 8164 | 8742 | jährl. Steigerung 15 % |
| davon IBM | 5101 | 5408 | |
| Klasse IV: bis DM 80 000.- Monatsmiete | | | |
| " " " | 160 000.- | | |
| " VI: über | 160 000.- | | |

2.3 Fertigstellung der Rechenprogramme

2.3.1 PAT-M-43

Den zentralen Teil unserer Programmentwicklungen bildet bisher das Programm PAT-M-43 (Räumliche Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen). Über dieses Programm ist in Veröffentlichungen und bei dem Kurs 1971 ausführlich berichtet worden, insbesondere über seine allgemeine Konzeption, über das Prinzip der Lage- Höheniteration, die direkte Lösung der Normalgleichungen mit HYCHOL, die Optimierung der Bandbreite usw. Nachfolgend werden einige weitere Angaben darüber gemacht, da im weiteren Verlauf des Kurses die Programme nicht mehr im Detail zur Sprache kommen werden.

Die vor zwei Jahren vorgelegten Beispiele ausgeglichener Blöcke betrafen alle die reine Lageausgleichung (PAT-M-4). Es hat damals noch fast ein Jahr gedauert, bis die räumliche Version soweit fertiggestellt war, daß der erste räumliche Block berechnet werden konnte.

Inzwischen ist das räumliche Blockausgleichungsprogramm noch weiter optimiert und auf IBM-Rechenanlagen umgestellt worden. Es ist routinemäßig im Einsatz und gilt vorläufig als zu Ende entwickelt, völlig ausgetestet und erprobt, was nicht unbedingt heißt, daß nicht noch weitere Wünsche an das Programm bestehen. Der Gesamtaufwand von rund 10 000 Mann-Stunden für diese sehr gründliche und weitgesteckte Programmentwicklung ist sehr hoch. Auch wenn man von heute aus gesehen, d.h. mit der jetzt vorliegenden Erfahrung nicht mehr ganz diesen Entwicklungsaufwand treiben müßte, so zeigt die Zahl doch, um welche Größenordnung es sich nach wie vor handelt, wenn anspruchsvolle und sehr allgemein brauchbare Programme zu entwickeln sind.

Die frühere Abschätzung der Rechenzeiten hat sich empirisch gut bestätigt. Für Blockausgleichungen mittlerer Größe (bis mehrere 100 Modelle) mit dem Programm PAT-M-43 gelten für die Rechenanlage CDC 6600 durchschnittlich folgende empirisch ermittelten Rechenzeiten (Systemzeit):

- Lageausgleichung ~ 0,5 sec/Modell/Lauf
- räumliche Ausgleichung ~ 2 sec/Modell/Lauf
- Katasterblöcke¹⁾ Lage ~ 2 sec/Modell/Lauf
- Katasterblöcke¹⁾ räumlich ~ 10 sec/Modell/Lauf

Bei sehr großen Blöcken von mehr als 1000 Modellen erhöhen sich die angegebenen Rechenzeiten etwa bis um den Faktor 2.

Damit ist das Ziel erreicht, trotz aufwendiger Berechnungen ökonomische Rechenzeiten für die Blockausgleichung zu erhalten. Gegenwärtig liegen die Hauptkosten der Blockausgleichung in der Regel nicht mehr bei der Berechnung sondern bei der immer noch notwendigen manuellen Bearbeitung, d.h. bei der Suche und Eliminierung grober Fehler. In schwierigen Fällen muß man immer noch mit einem Bearbeitungsaufwand von bis zu einer Mannstunde pro Modell rechnen. Bei gut eingespielten Organisationen kommt man häufig mit 3 oder gar nur 2 Berechnungen aus. In diesen Fällen geht die Bearbeitungszeit auf 1/2 Mann-Stunde oder weniger pro Modell zurück.

Mit den praktischen Anwendungen des Blockprogramms liegen nun auch Erfahrungswerte vor über die Konvergenz der Lage-Höheniterationen, s. Tabelle 3. Es hat sich erfreulicherweise herausgestellt, daß die Konvergenz über Erwarten gut ist und sehr unempfindlich gegen den Grad der Anfangsnäherungen. Die Konvergenz der Iterationen hängt im Prinzip von den Näherungswerten ab, die hier stets mit den Neigungswerten Null angesetzt werden; es zeigt sich, daß nach allen wesentlichen Konvergenzkriterien praktisch stets zwei Iterationsschritte ausreichend wären. Es werden zwar in der Regel drei Schritte berechnet, der dritte bestätigt jedoch im allgemeinen nur, daß zwei ausgereicht hätten.

1) durch viele Punkte gekennzeichnet, z.B. > 100 Punkte/Modell, s. Tabelle 4.

Tabelle 3. Konvergenz der Lage-Höhen Iterationen mit PAT M 43

| Block | max. Koord. Änd. | Iterations-Schritt 1 Lage m Höhe m | Iterations-Schritt 2 Lage m Höhe m | Iterations-Schritt 3 Lage m Höhe m |
|----------------------------|-------------------|--|--|--|
| A 50 Modelle 1 : 3750 | Δx_{\max} | 1501 | 0,78 | 0,005 |
| | Δy_{\max} | 1758 | 0,93 | 0,006 |
| | Δz_{\max} | 318 | 0,47 | 0,005 |
| B 129 Modelle 1 : 14000 | Δx_{\max} | 10229 | 0,92 | 0,000 |
| | Δy_{\max} | 7303 | 2,68 | 0,000 |
| | Δz_{\max} | 389 | 0,78 | 0,000 |
| C 200 Modelle 1 : 28000 | Δx_{\max} | 31856 | 15,05 | 0,017 |
| | Δy_{\max} | 18031 | 16,43 | 0,023 |
| | Δz_{\max} | 477 | 4,87 | 0,016 |

Angaben bezogen auf das Gelände

Die Konvergenz der Iterationen hängt neben den Ausgangsnäherungen auch von der Kondition des Systems ab, d.h. von seiner geometrischen Bestimmtheit. Wenn auffallend schlechte Konvergenz auftritt, ist das ein Hinweis, daß das System quasi-singulär ist.

2.3.2 Zusatzprogramme für die Katasterphotogrammetrie

Die für die Katasteranwendung entwickelten Zusatzprogramme (Kleinste Quadrate-Interpolation zur Beseitigung von Netzspannungen und die sogenannte Spannmaßausgleichung) sind ebenfalls schon vor zwei Jahren vorgestellt und in ersten Versuchen angewendet worden. Damals waren es noch Behelfsprogramme, die inzwischen neu geschrieben, verbessert und erweitert worden sind, so daß sie jetzt einen gewissen Abschluß erreicht haben.

Obwohl bei all diesen Programmen nicht viel hinzugekommen ist, was nicht schon vor zwei Jahren angekündigt und besprochen worden wäre, darf der Arbeitsaufwand zur ausgereiften und praxisgerechten Abschlußentwicklung dieser Programme nicht unterschätzt werden. Wir haben deutlich die Erfahrung gemacht, daß es wesentlich einfacher und auch befriedigender ist, eine Methode durch ein Behelfsprogramm zu realisieren und durch einige praktische Versuche zu bestätigen. Im Vergleich dazu ist es eine undankbare, langwierige Arbeit, die Programme zu Ende (d.h. im Grunde noch einmal neu) zu entwickeln. Diese Phase muß jedoch durchgestanden werden, wenn die Programme wirklich praxisgerecht sein sollen.

2.3.3 Programm für die Blockausgleichung von Polaraufnahmen

Im Zusammenhang mit den Entwicklungen photogrammetrischer Rechenprogramme sei erwähnt, daß parallel dazu am Institut auch ein Programm für die Berechnung großräumiger Polaraufnahmen nach der Blockmethode, d.h. nach dem Prinzip der verketteten Helmert-Transformationen entwickelt wurde, s. [4], [5]. Der Anwendungsbereich dieses Programms liegt

bei der elektronischen Tachymetrie, daher der Name PET-L = Programm elektronische Tachymetrie - Lageblockausgleichung. Dort muß ebenfalls wie in der Katasterphotogrammetrie mit großem Datenanfall gerechnet werden, so daß die Voraussetzungen zur wirkungsvollen Anwendung der Blockmethode gegeben sind.

2.4 Anwendungen der Rechenprogramme und Erfahrungen seit 1971

Photogrammetrische Punktbestimmungen durch Blockausgleichung sind in den vergangenen zwei Jahren in sehr großem Umfang angewendet und erprobt worden. Wir haben nicht nur eine Reihe von Untersuchungen und Versuchen erfolgreich durchgeführt, vielmehr - und das ist für den Praktiker wesentlich - haben wir notgedrungen als Rechenzentrum operiert und in großem Umfang praktische Streifen- und Blockausgleichungen berechnet. Es handelt sich also um Routinematerial aus der Praxis verschiedener Behörden und Firmen aus verschiedenen Ländern. Außerdem sind die Programme an verschiedenen anderen Stellen im Einsatz oder sind im Begriff, eingesetzt zu werden. Nachfolgend wird über die wichtigsten Anwendungen und über die gewonnenen Erfahrungen berichtet.

2.4.1 Katasterphotogrammetrie

Unser bisher wichtigster und umfangreichster Erfahrungsbereich ist die Anwendung der Blockausgleichung bei der photogrammetrischen Katastervermessung. Bei der größeren Zahl der Projekte (s. Tabelle 4) handelt es sich dabei um reine Lageblöcke, es sind aber auch einige dreidimensionale Blöcke berechnet worden. Die Ergebnisse beider Fälle unterscheiden sich praktisch nicht, im Rechenaufwand und hinsichtlich der Messungen und der Voraussetzungen liegen jedoch jeweils verschiedene Bedingungen vor.

Tabelle 4.

PRAKTISCHE BLOCKAUSGLEICHUNGEN 1971/72 (Katasterprojekte)

| Bild- maßst. zahl | L R | Anzahl der | | | | Bearb. Zeit/ Modell | Rechen- kosten/ Modell | σ_0 Lage | |
|-------------------------|--------|------------|---------|------------------|------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------|-----|
| | | Modelle | Lage-PP | Modell Punkte | Rechen- läufe | | | μm | cm |
| 4300 | L | 54 | 65 | 5223 | 5 | 1,1 ^h | 52 DM | 10,3 | 4,4 |
| 6000 | L | 14 | 18 | 1610 | 2 | 1,0 | 21 | 7,2 | 3,9 |
| 5000 | L | 12 | 17 | 2443 | 2 | 1,4 | 30 | 9,0 | 4,5 |
| 4300 | L | 30 | 47 | 3947 | 4 | 1,7 | 47 | 11,2 | 4,8 |
| 4300 | L | 42 | 62 | 6931 | 5 | 2,0 | 83 | 11,3 | 4,8 |
| 6000 | L | 3 | 9 | 2413 | 4 | 16,0 | 133 | 13,1 | 7,8 |
| 7500 | L | 170 | 46 | 2981 | 3 | - | - | 7,6 | 5,7 |
| 4200 | L | 6 | 34 | 590 | 3 | 2,5 | 23 | 12,0 | 5,1 |
| 4000 | L | 46 | 19 | 5527 | 10 | 1,5 | 85 | 10,3 | 4,1 |
| 6000 | L | 5 | 11 | 5288 | 4 | 6,2 | 300 | 11,7 | 7,0 |
| 6000 | L | 3 | 8 | 1092 | 1 | 3,0 | 15 | 10,0 | 6,0 |
| 7500 | L | 121 | 99 | 2279 | - | - | - | 7,3 | 5,5 |
| 6500 | L | 3 | 13 | 1286 | 2 | 6,7 | 35 | 5,7 | 3,7 |
| 4000 | L | 17 | 37 | 3500 | 4 | 2,6 | 88 | 7,3 | 2,9 |
| 6000 | L | 3 | 14 | 1914 | 2 | 4,7 | 55 | 6,6 | 4,0 |
| 8000 | L | 55 | 44 | 1210 | 6 | 0,3 | 8 | 6,6 | 5,3 |
| 6000 | L | 1 | 7 | 981 | 2 | 7,0 | 15 | 5,9 | 3,6 |
| 5000 | L | 7 | 7 | 2250 | 2 | 1,6 | 29 | 9,5 | 4,7 |
| 5000 | L | 21 | 27 | 4234 | 2 | 2,2 | 50 | 10,1 | 5,0 |
| 4000 | R | 14 | 57 | 2537 | 6 | 2,9 | 121 | 8,5 | 3,4 |
| 2800 | R | 18 | 45 | 736 | - | - | - | 9,3 | 2,6 |
| 5000 | R | 5 | 21 | 1680 | 3 | 3,0 | 44 | 8,4 | 4,2 |
| 4500 | R | 7 | 8 | 2038 | 3 | 2,6 | 45 | 9,3 | 4,2 |
| 4000 | L | 11 | 65 | 2192 | 5 | 1,8 | 38 | 12,4 | 5,0 |
| 5000 | L | 4 | 33 | 1262 | 2 | 1,7 | 24 | 7,6 | 3,8 |
| 5000 | L | 51 | 29 | 11387 | 8 | 1,4 | 170 | 12,8 | 6,4 |
| 5000 | L | 2 | 9 | 415 | 1 | 2,0 | 14 | 12,0 | 6,0 |
| 4000 | L | 7 | 19 | 1629 | 3 | 2,1 | 26 | 7,0 | 2,8 |
| 4000 | L | 5 | 6 | 2720 | 3 | 4,0 | 72 | 8,2 | 3,3 |
| 4000 | R | 5 | 22 | 756 | 1 | 1,0 | 10 | 8,2 | 3,3 |
| 4000 | L | 7 | 22 | 1031 | 1 | 1,4 | 6 | 7,5 | 3,0 |
| 4000 | L | 11 | 46 | 1691 | 3 | 1,1 | 16 | 6,4 | 2,5 |
| | | 760 | | 85773 | 3,4 | | | 9,3 | |

L = Lageblockausgleichung, R = räumliche Blockausgleichung
mit unabhängigen Modellen

Ein großer Teil der Katasterauswertungen bezieht sich auf Flurbereinigungsprojekte. Die meisten stammen vom Landesamt für Flurbereinigung und Siedlung Baden-Württemberg und wurden mit dem Zeiss Stereoplanigraph C8 bzw. Zeiss Planimat gemessen. Bei dieser Behörde ist die photogrammetrische Blockmethode inzwischen fest eingeführt. Die Flurbereinigung hat günstige Voraussetzungen für die Anwendung der Katasterphotogrammetrie, denn sie bearbeitet Projekte erheblichen Umfanges, z.B. mit bis zu 10 000 zu bestimmenden Neupunkten.

Für das Landesvermessungsamt Baden-Württemberg sind zunächst einige Versuchsberechnungen, in jüngster Zeit reguläre Katasterauswertungen behandelt worden. Sie beziehen sich, wie einige weitere ähnliche Projekte von öffentlich bestellten Vermessungs-Ingenieuren, auf Straßenschlußvermessungen, die ein dringendes Problem der Katastervermessung darstellen. Seit Oktober 1971 ist die Kataster-Photogrammetrie offiziell in Baden-Württemberg als Verfahren zugelassen, s. [6].

Eine Reihe weiterer großmaßstäbiger Streifen- und Blockausgleichungen stammen aus anderen Bundesländern sowie aus anderen Ländern (Frankreich, Mexico, Thailand, Österreich). Dabei handelt es sich teilweise um Versuchsprojekte, teilweise auch um reguläre Anwendungen.

Ober die durchschnittlichen Anwendungen hinausgehend ist auf einige Sonderanwendungen hinzuweisen, die ursprünglich nicht ohne weiteres in Betracht gezogen worden waren. Dazu gehören z.B. die Rebflurbereinigungen (sehr viele Punkte in wenigen Modellen) und der Vorstoß in extrem große Bildmaßstäbe.

Zusammenfassend kann zu den Katasteranwendungen der numerischen Photogrammetrie festgestellt werden, daß sich die Blockmethode in der Praxis außerordentlich bewährt hat und die erwarteten Leistungen mit großer Zuverlässigkeit bringt. Im einzelnen behandelt der Vortrag Nr. 2 dieses Kurses von K. Kraus die gemachten Erfahrungen und zieht die für die praktische Anwendung wichtigen Schlußfolgerungen. Da die Rechenprogramme allen Behörden in der Bundesrepublik zur Verfügung stehen, kann eine weitere Verbreitung der Anwendungen erwartet werden.

2.4.2 Räumliche Blöcke

Da das Programm zur räumlichen Blockausgleichung erst seit Anfang 1972 einsatzfähig ist, konnten 1972 nur eine geringere Anzahl von räumlichen Blockausgleichungen durchgerechnet werden. Die Fälle reichen jedoch aus, um über die praktische Bewährung ein Urteil abgeben zu können, s. Tabelle 5.

Bei den räumlichen Blockausgleichungen spielt die Anzahl und Verteilung der Höhenpaßpunkte die entscheidende Rolle für die Höhengenaugigkeit. Trotz günstiger Eigenschaften der Höhenblöcke sind dabei nicht gleich spektakuläre Ergebnisse möglich wie hinsichtlich der Lagegenauigkeit. Im übrigen konnte nachgewiesen werden, daß bei räumlichen Blockausgleichungen mit unabhängigen Modellen Lage- und Höhengenaugigkeit und damit auch Anzahl und Verteilung der Lage- und Höhenpaßpunkte für nicht-gebirgisches Gelände praktisch unabhängig voneinander sind.

Die praktischen Ergebnisse haben die Eigenschaften des Programms bestätigt, insbesondere die schnelle Konvergenz der Iterationen (s. Tabelle 3) und die Konstanz der Rechenzeiten pro Modell.

Bei den räumlichen Blockausgleichungen handelt es sich zum Teil um Aerotriangulationen für topographische Kartierungen. In diesen Fällen sind keine signalisierten Punkte im Gelände vorhanden, insbesondere wird dabei in der Regel mit künstlichen oder natürlichen Verknüpfungspunkten und entsprechender Punktübertragung gearbeitet. Im Vergleich zu Blockausgleichungen mit signalisierten Punkten hat sich dabei ein signifikanter Unterschied im mittleren Gewichtseinheitsfehler, d.h. in der Meß-Genauigkeit der Modellpunkte herausgestellt. Während mit signalisierten Punkten die Zahlenwerte für den mittleren Gewichtseinheitsfehler selbst bei Messungen mit Analog-Geräten um $10 \mu\text{m}$, bei Komparator-Messungen stets deutlich darunter liegen, treten mit nicht signalisierten Verknüpfungspunkten in der Regel Werte zwischen 15 und 30 μm

| Bild- maßst- zahl | Instru- ment- gleich- ung | Modell- lage-PP | Anzahl der Höhen-PP | gemess. Pkte. | Rechen- läufe | Bearb. Zeit (Modell) | Rechenzeit CDC 6600 System sec | Reine Rechenkosten (Modell) DM | G ₀ Lage µm | G ₀ Höhe µm |
|-------------------------|------------------------------------|--------------------|------------------------|------------------|------------------|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 7500 | A7 | 4 | 12 | 416 | | | | | 7,3 | |
| 10000 | C8 | 33 | 150 | 4373 | 3 | 0,9 ^h | 240 | | 8,6 | |
| 6000 | A10 | 95 | 66 | 888 | 10 | 0,8 | 490 | 11,10 | 23 | |
| 2500 | - | 28 | 5 | 205 | 8 | 0,7 | 120 | 9,60 | 34 | |
| 2500 | - | 33 | 13 | 240 | 5 | 0,3 | 75 | 5,00 | 45 | |
| 5000 | - | 38 | 10 | 298 | 4 | 0,2 | 75 | 4,75 | 27 | |
| 12500 | C8 | 10 | 14 | 117 | 5 | 1,0 | 105 | 21,00 | 10,4 | 23,5 |
| 12500 | C8 | 13 | 16 | 309 | 4 | 0,6 | 105 | 17,22 | 17 | 13,5 |
| 12500 | C8 | 17 | 31 | 297 | 12 | 0,9 | 310 | 37,50 | 13,6 | 16,8 |
| 12500 | C8 | 24 | 42 | 402 | 6 | 0,6 | 170 | 14,50 | 15,4 | 19,0 |
| 6000 | C8 | 7 | 9 | 105 | 4 | 0,7 | 85 | 24,73 | 18,5 | 23,5 |
| 20000 | Pla- | 17 | 15 | 270 | 5 | 1,2 | 180 | 20,30 | 14,1 | 20,7 |
| 20000 | ni- | 13 | 30 | 215 | 2 | 0,5 | 62 | 9,36 | 20 | 13 |
| 20000 | mat | 14 | 17 | 230 | 6 | 0,7 | 175 | 25,00 | 14,2 | 16,8 |
| 8000 | " | 41 | 50 | 619 | 4 | 0,4 | 263 | 12,30 | 11 | 21 |
| 20000 | " | 100 | 139 | 1690 | 8 | 0,3 | 1150 | 22,00 | 11,2 | 18,5 |
| 20000 | " | 25 | 16 | 395 | 6 | 0,4 | 195 | 16,26 | 9,1 | 20,0 |
| 20000 | " | 23 | 37 | 405 | 4 | | | | 10,6 | 20,4 |
| 20000 | " | 13 | 21 | 249 | 4 | 0,3 | 300 | 13,71 | 11,6 | 19,7 |
| 20000 | " | 12 | 24 | 202 | 2 | | | | 11,6 | 17,8 |
| 20000 | " | 43 | 37 | 661 | 5 | | | | | |
| 20000 | " | 6 | 16 | 103 | 2 | 0,2 | 384 | 15,30 | | |
| 20000 | " | 3 | 8 | 68 | 3 | | | | | |
| | | 612 | | | 5,1 | 0,53 | | 16,08 | 13,8 | 19,1 |

auf. Wenn mit größter Sorgfalt gearbeitet wird, kann allerdings auch bei topographischen Blöcken ein mittlerer Gewichtseinheitsfehler von 10 μm erreicht werden, wie ein Beispiel aus Österreich bewiesen hat.

2.4.3 Großblöcke

Theoretische Untersuchungen, s. [1], haben nachgewiesen, daß die günstigen Eigenschaften der Lagegenauigkeit bei Randbesetzung mit Lagepaßpunkten auch bei großen und sehr großen Blöcken mit tausenden von Modellen erhalten bleiben. Es war daher zu empfehlen, für topographische Kartierungen außerordentlich große Blöcke unter drastischer Reduzierung der notwendigen Lagepaßpunkte zu benützen. Diese Empfehlung ist inzwischen in Zusammenarbeit mit unserem Institut vom Ministry of Energy, Mines and Resources (Bundesvermessungsdienst) der kanadischen Regierung aufgegriffen und zunächst an einem Versuch erprobt worden, [7]. Dieser Versuchsblock COED enthält über 2000 Modelle und bedeckt im Bildmaßstab 1:50 000 rund 100 000 qkm. Trotz gewisser Einschränkungen, die in der Qualität des Materials und der Unterlagen begründet sind, konnte nachgewiesen werden, daß bei Paßpunktabständen von über 100 km die erreichte Lagegenauigkeit noch für die topographische Karte im Maßstab 1:50 000 ausreichend ist. Angesichts der extrem hohen Kosten von Lagepaßpunkten in den nördlichen Gebieten Kandas (durchschnittlich 1500 Dollar pro Punkt, bis zu 5000 Dollar pro Punkt und mehr) bieten Großblöcke die einzige wirtschaftliche Möglichkeit zur Unterlagenbeschaffung für topographische Karten der Maßstäbe 1:50 000 und 1:100 000.

In einem kleineren Vorprojekt (Bonnet Plume, 320 Modelle, Bildmaßstab 1:60 000, überdeckte Fläche 10 000 qkm) war schon bestätigt worden, daß noch bei sehr großen Paßpunktabständen eine für die topographische Karte 1:50 000 ausreichende Lagegenauigkeit erreicht wird. Mit nur 4 Lagepaßpunkten in den Blockecken ergab sich eine mittlere Genauigkeit der Lagekoordinaten des Blocks von 5 m, s. [7].

In beiden Fällen wurden mehrere Paßpunktversionen durchgerechnet. Um bei dem COED-Block erträgliche Rechenzeiten zu erhalten, mußte das Programm nocheinmal optimiert werden, da bei sehr großem Umfang der Blockausgleichung wegen der großen Anzahl der Daten-Records Effekte auftreten, die bei kleineren Blöcken noch nicht spürbar sind. Die schließlich benötigten Rechenzeiten für den Großblock ergaben sich zu rund 1 sec/Modell/Lauf (Systemzeit mit CDC 6600, reine Lageblockausgleichung).

Die Konzeption der Großblöcke haben wir auch bei dem sogenannten Sudene-Projekt der Deutschen Technischen Hilfe in Brasilien eingeführt. Dort stehen Dreiecksketten mit 2^0 Maschenweite zur Verfügung. Es wird für die Lage völlig ausreichen, die Blockausgleichung auf diese Dreiecksketten zu stützen, ohne wie bisher üblich aufwendige Punktverdichtungen vornehmen zu müssen.

Eine zusammenfassende Betrachtung des Problems der Großblöcke gibt H. Ebner im Vortrag Nr. 4 dieses Lehrgangs. Ihre Bedeutung für kleinmaßstäbige Kartierung wird neuerdings auch an anderen Stellen erkannt. Aus Südafrika ist zum Internationalen Kongreß 1972 ebenfalls über eine Blockausgleichung über 2000 Modelle berichtet worden, s. [8].

Trotz der großen Ersparnis an Lagepaßpunkten ist bei kleinmaßstäbigen Blöcken die Höhengenaugigkeit der eigentlich wichtige und kritische Faktor. In der Regel stützt man sich auf barometrische Höhenmessungen, wie z.B. in Brasilien, oder auf Radar-Höhenprofilmessungen, die in Canada und Australien verbreitet Anwendung finden. Im Zusammenhang mit der optimalen Verwertung von Radar-Höhenmessungen wird im Abschnitt 2.6.2 noch über eine Programmerweiterung zu berichten sein.

2.5 Nachbetrachtung zur Punktbestimmung durch Blockausgleichung

Wenn wir die Anwendung der Blockmethode auf die photogrammetrische Punktbestimmung beurteilend betrachten, können wir ohne Übertreibung feststellen, daß die Entwicklung schneller verlief und weiter ausgegriffen hat als noch vor 2 Jahren erwartet. Das bezieht sich sowohl auf unerwartete Genauigkeitsleistungen als auch auf den Bereich der Anwendungen.

Abgesehen davon, daß die Aufgaben in der Praxis vorhanden und die Lösungen sozusagen überfällig waren, ist der Grund für den raschen Erfolg hauptsächlich in den allgemeinen Eigenschaften und Strukturen dieser Entwicklung zu suchen. Es seien hier noch einmal zwei Punkte besonders hervorgehoben:

- Auf dem Prinzip der gemeinsamen Ausgleichung aller Daten einschließlich des Falles großer Datenmengen beruht sowohl der Erfolg bei kleinmaßstäbigen Großblöcken als auch bei den Katasterblöcken. Damit ist zum erstenmal ein in der Landesvermessung anerkanntes und altbewährtes Prinzip in den Bereich der niederen Geodäsie übertragen worden.
- Das Prinzip, gleichartige mathematische Aufgaben mit ein und demselben Rechenprogramm zu behandeln hat sich außerordentlich bewährt. Dadurch sind Mehrfachentwicklungen unterblieben und sind verschiedene Sonderfälle ohne weiteres mit erfaßt.
- Aus heuristischer Sicht ist wesentlich, daß umfassende Lösungen offenbar so wirksam sind, daß sich die Entwicklung beschleunigt und Anwendungsbereiche erschlossen oder Leistungen erzielt werden, die zunächst überhaupt nicht im Gesichtsfeld der ursprünglichen Aufgabenstellung der Entwicklung lagen. Diesem Punkt kommt bei modernen Software-Entwicklungen größte Bedeutung zu. Es ist unbedingt notwendig, daß man die Entwicklungsziele weiter steckt als sie die Praxis unmittelbar zu fordern scheint. Die folgenden Ausführungen sollen diese These belegen:

2.5.1 Extrem große Bildmaßstäbe

Verschiedene Versuche (siehe Vortrag Nr. 7) haben ergeben, daß Luftaufnahmen mit extrem großen Bildmaßstäben bis in den Bereich von 1:1000 möglich sind. Die numerische Auswertung mit anschließender Blockausgleichung erreicht dann für signalisierte Punkte Genauigkeiten, die im Gelände im Bereich von 1 cm liegen. Damit werden der Luftbildmessung in Sonderanwendungen neue Genauigkeits- und Anwendungsbereiche erschlossen, zumal gegebenenfalls mit Hubschraubern noch größere Bildmaßstäbe erreichbar sind.

2.5.2 Kombination verschiedener Aufnahmesysteme

Die Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen ist nicht daran gebunden, daß die Modelle d.h. die Elementareinheiten photogrammetrischen Ursprungs sind. Es wurde schon erwähnt, daß nach demselben Prinzip auch die Standpunkteinheiten der elektronischen Tachymetrie behandelt werden können. Darüberhinaus ist es möglich, daß in eine gemeinsame Blockausgleichung Einheiten verschiedenen Ursprungs eingehen, z.B. photogrammetrische Modelle, terrestrische Polaraufnahmen und alte Orthogonalaufnahmen. Dieser Fall ist für die Katastervermessung von aktueller Bedeutung. Insbesondere erschließt sich dadurch die Möglichkeit, gegebenenfalls die bisher so aufwendige Grenzprüfung in die Blockausgleichung zu verlegen und dadurch eine ganz beträchtliche Entlastung der Feldarbeiten zu erzielen. Bei Straßenschlußvermessungen ist dieses Prinzip bereits mit gutem Erfolg angewendet worden, s. Vortrag Nr. 2.

2.5.3 Hybride Systeme

In der Ausgleichsrechnung versteht man unter hybriden Systemen die gemeinsame Ausgleich verschiedenartiger Messungen in einem Guß. Dieses Verfahren findet in der photogrammetrischen Katastervermessung mit der sogenannten Spanmaßausgleichung Anwendung, die in Wirklichkeit eine gemeinsame Ausgleichung photogrammetrischer und terrestrischer

Messungen unter Einbeziehung zusätzlicher Bedingungen (z.B. Geradenbedingungen, Rechtwinkelbedingung, Abstandsbedingungen) beinhaltet. Diese hybride Ausgleichung wird mit unseren Programmen routinemäßig angewendet. Ihr ist zu verdanken, daß das Problem der Nachbarschaftsgenauigkeit in der Katasterphotogrammetrie gegenstandslos geworden ist und daß in diesem Zusammenhang die Genauigkeit der Katasterphotogrammetrie kein Diskussionsthema mehr ist.

Die These, daß allgemeine Lösungen stets Leistungen nach sich ziehen, die über die ursprüngliche Absicht hinausgehen, ist auch bei der Spannmaußausgleichung bestätigt worden. Die gemeinsame Ausgleichung photogrammetrischer und terrestrischer Daten hat sich inzwischen zu einer Methode entwickelt, mit der das Problem der nicht luft sichtbaren Punkte und das Problem der Kontrolle der Katasteraufnahme gelöst werden konnte. Nicht luft sichtbare Punkte können durch die zusätzlichen Spannmaße zusammen mit der Blockausgleichung eingerechnet und damit in die Koordinatenbestimmung aufgenommen werden, ohne daß Sondermaßnahmen oder Nachmessungen erforderlich wären. Weiterhin erlauben Spannmaße eine durchgreifende Kontrolle der photogrammetrischen Koordinatenbestimmung und zusätzlich die Lokalisierung und häufig auch die Aufklärung grober Fehler. Damit erweist sich die Methode weit über die ursprüngliche Absicht der reinen Punktbestimmung hinaus als außerordentlich leistungsfähig und für die Katastervermessung besonders zweckmäßig.

2.5.4 Automatische Klärung grober Fehler

Bei hinreichender Oberbestimmung erlaubt das Prinzip der gemeinsamen und vollständigen Ausgleichung die automatische Aufdeckung, Klärung und Eliminierung grober Datenfehler. Dieses Problem ist bisher grundsätzlich menschlichen Bearbeitern überlassen gewesen. Das Blockprogramm für die Berechnung großräumiger Polaraufnahmen enthält bereits ein erstes automatisches Fehlersuchprogramm, das sich auf

Anhieb sehr gut bewährt hat. In der Photogrammetrie sind die Verhältnisse zwar etwas ungünstiger, es besteht aber kein Zweifel, daß durch weitere Entwicklungen ein großer Teil der groben Fehler automatisch erkannt, lokalisiert und eliminiert bzw. sogar korrigiert werden kann.

2.5.5 Photogrammetrische Verdichtung trigonometrischer Netze

Die Genauigkeitsleistungen der photogrammetrischen Punktbestimmung durch Blocktriangulation sind so gut und steigern sich noch laufend, daß Anwendungsbereiche in das Blickfeld kommen, die bisher kaum zur Diskussion standen. Auf die Ausgleichung astronomischer Kugelblöcke zur Positionsbestimmung von Fixsternen bzw. zur Überprüfung und Verbesserung vorhandener Sternkataloge sei hier nur hingewiesen [9]. Für Geodäten von unmittelbarerem Interesse ist die Möglichkeit, die Verdichtung trigonometrischer Netze mit den Mitteln der photogrammetrischen Blocktriangulation vorzunehmen. Zur Zeit sind an verschiedenen Stellen derartige Versuche geplant oder im Gange.

Diese Betrachtungen haben nun schon in das Gebiet der derzeitigen Anwendungen und Entwicklungen der photogrammetrischen Punktbestimmung geführt. Es ist deutlich, daß bei den weiteren Aufgaben zwei verschiedene Richtungen zu unterscheiden sind: Einerseits müssen auf der Grundlage der vorhandenen Methoden die skizzierten Anwendungen vertieft und neue Bereiche erschlossen werden. Dieser Bereich kann nicht primär als Aufgabe der Hochschulen angesehen werden. Vielmehr ist die Praxis aufgerufen, daran mitzuarbeiten. Die zweite Richtung der gegenwärtigen Aufgaben betrifft die weitere Genauigkeitssteigerung und die weitere methodische Entwicklung, einschließlich etwa erforderlicher Programmentwicklungen und Grundsatzuntersuchungen. Im nächsten Abschnitt wird über einige bereits eingeleitete und die weiter beabsichtigten Entwicklungen berichtet.

2.6 Weitere Entwicklungen zur photogrammetrischen Punktbestimmung

2.6.1 Theoretische und empirische Genauigkeitsuntersuchungen.

Im Vortrag Nr. 3 dieses Lehrgangs wird von H. Ebner über die Fortsetzung der theoretischen Genauigkeitsuntersuchungen großer Blöcke berichtet, wobei diesmal die Höhengenaugigkeit und die notwendige Verteilung der Höhenpaßpunkte im Vordergrund steht. Die Untersuchungen bestätigen und präzisieren die teilweise schon bekannten Zusammenhänge. Leider lassen sich bei räumlichen Blöcken mit 20 % Querüberdeckung die Höhenpaßpunkte nicht sehr weit reduzieren, wenn gute Höhengenaugigkeit erzielt werden soll. Lediglich bei 60 % Querüberdeckung oder bei Doppelbefliegungen kann man sich von den strengen Anordnungsregeln für Höhenpaßpunkte lösen.

Neben theoretischen Genauigkeitsuntersuchungen für die räumliche Blocktriangulation mit unabhängigen Modellen laufen derzeit ähnliche Untersuchungen für die strengere Bündelblockmethode, über die H. Ebner ebenfalls kurz berichten wird. Die genannten Untersuchungen scheinen sich von ähnlichen Arbeiten anderer Autoren nicht sehr zu unterscheiden, sie beruhen jedoch auf außerordentlich umfangreichen Studien und schließen ausgesprochene Großblöcke mit ein.

Parallel mit den theoretischen Genauigkeitsuntersuchungen bearbeiten wir seit einiger Zeit anhand des OEEPE-Testfeldes Oberschwaben umfangreiche empirische Genauigkeitsuntersuchungen. Mit ihnen soll überprüft werden, in wieweit sich die theoretischen Erwartungen praktisch bestätigen. Gleichzeitig sollen dadurch empirische Genauigkeitsvergleiche zwischen verschiedenen Methoden der Streifen- und Blockausgleichung gewonnen werden. Über einige Ergebnisse wird im Vortrag Nr. 7 berichtet werden.

2.6.2 Gemeinsame Ausgleichung von Blöcken und APR-Hilfsdaten

Bei kleinmaßstäbigen Aerotriangulationen, vor allem wenn sie sich mit Großblöcken über Flächen in der Größenordnung von 100 000 qkm erstrecken, ist die Beschaffung der notwendigen Höhenpaßpunkte problematisch. Dieses Problem kann gelöst werden, wenn anstelle von terrestrischen Höhenbestimmungen die aus der Luft gewonnenen Radar-Höhenprofile verwendet werden. Mit solchen APR-Höhenprofilen wird in verschiedenen Ländern seit über 20 Jahren gearbeitet. Die Benützung und Ausgleichung dieser Hilfsdaten erfolgt jedoch bisher noch weitgehend mit vereinfachten Methoden, die über eine gewisse Genauigkeit nicht hinauskommen. Durch Anwendung des Prinzips der gemeinsamen und vollständigen Ausgleichung aller Daten, d.h. durch gemeinsame Ausgleichung der photogrammetrischen Messungen und der APR-Daten ist unter der Voraussetzung, daß die APR-Flüge ein Netz mit kreuzenden Linien bilden nocheinmal eine ganz beträchtliche Genauigkeitssteigerung möglich. Es ist zu erwarten, daß damit bei Blöcken in der Größenordnung von 100 000 qkm eine absolute Höhengenaugkeit von 2 m oder besser erreicht wird, selbst wenn in dem Gebiet selber praktisch keine Höhenpaßpunkte gegeben sind. Wenn sich diese Erwartung bestätigt - die Nachprüfung wird allerdings sehr aufwendig sein und daher nicht ohne weiteres durchgeführt werden - kann man von einer Lösung des Höhenproblems für kleinmaßstäbige Kartierungen sprechen, zumindest in den Gebieten, die sich für APR-Anwendungen eignen. Es wird auch zu prüfen sein, ob die einfacher zu gewinnenden Stoskop-Messungen allein die APR-Profile ersetzen können.

Wir sind am Institut derzeit beschäftigt, dieses kombinierte APR-Block-Programm zu entwickeln. Es soll im Laufe des Jahres 1973 fertiggestellt werden. Im Vortrag Nr. 5 wird von H. Klein über die Methode und einige numerische Gesichtspunkte berichtet werden.

Obwohl die Entwicklung dieses Programms ganz speziell auf kleinmaßstäbige Kartierung in Ländern wie Kanada oder Brasilien ausgerichtet ist, birgt diese Entwicklung gegebenenfalls Möglichkeiten in sich, die auch an eine Anwendung in unserem Bereich denken lassen. Zum Beispiel muß zu gegebener Zeit geprüft werden, ob nicht das hochauflösende Laser-APR in Verbindung mit der gemeinsamen Block-Ausgleichung einen Ansatzpunkt bieten könnte für die Lösung der problematischen Höherfassung in Waldgebieten, z.B. dem Schwarzwald, für die topographischen Karten der Maßstäbe 1:25 000 und 1:50 000, evtl. sogar für die Deutsche Grundkarte 1:5000. Immerhin hat sich aus der Befliegung des Testgebietes Oberschwaben eine mittlere Stoskopgenauigkeit von rund 70 cm ergeben.

2.6.3 Bündelprogramm PAT-B

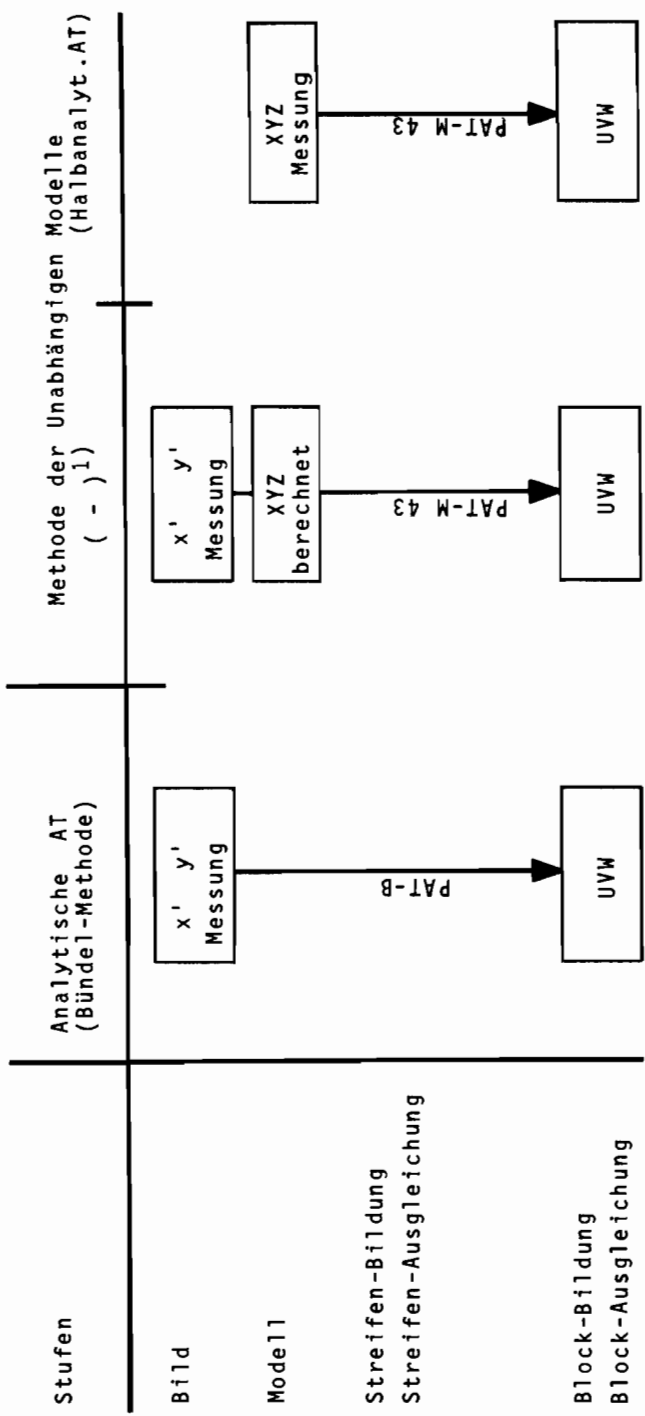
Es ist seit langem bekannt, daß das strengste mathematische Modell der Aerotriangulation im Gegensatz zum Prinzip der unabhängigen Modelle auf dem Prinzip der Bündelmethode beruht. Wenn wir trotzdem diesem Modell bei unserer Programmentwicklung nicht Priorität gegeben haben, dann aus zwei Gründen:

- Die Methode der unabhängigen Modelle ist von den instrumentellen Voraussetzungen her zur Zeit wesentlich verbreiteter anwendbar als die von Komparatoren ausgehende Bündelmethode.
- Wir vermuteten, daß die Methode der unabhängigen Modelle für sich genommen hervorragende Genauigkeitsleistungen bringen würde, um ihre Anwendung als solche zu rechtfertigen und außerdem der Bündelmethode nicht viel nachstehen würde.

Bei der Beurteilung der Methode der unabhängigen Modelle muß man deutlich unterscheiden, ob die Modelle in konventionellen Stereoauswertegeräten durch relative Orientierung erzeugt worden sind oder ob sie durch Berechnung aus Komparatormessungen entstanden sind, s. Abb. 2. Nach den Erfahrungen des Versuchs "Neckarsulm" [10] unterscheiden sich beide Fälle in der Genauigkeit um beinahe den Faktor 2. Bei Blockausgleichungen von im Zeiss-Planimat gemessenen Modellen ergab sich ein mittlerer Gewichtseinheitsfehler von $10.6\mu\text{m}$; die Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen, die anhand derselben Luftbilder aus Messungen im Zeiss-Stereokomparator PSK und anschließender analytischer Modellberechnung entstanden waren, erreichte dagegen den Wert $5.1\mu\text{m}$. Beim Vergleich der Methode der unabhängigen Modelle mit der Bündelmethode muß selbstverständlich letzterer Fall zugrunde gelegt, d.h. von Komparatormessungen ausgegangen werden.

Selbstverständlich hatten wir von Anfang an geplant, zu gegebener Zeit auch ein Blocktriangulationsprogramm nach der Bündelmethode zu entwickeln. Die Gesamtkonzeption der Ausgleichungsprogramme war von vornherein so angelegt, daß dabei verschiedene Teile, z.B. die Ordnungs- und Suchprogramme sowie das Lösungsprogramm für die Normalgleichungen übernommen werden konnten. Inzwischen ist ein vorläufiges Bündel-Blockprogramm fertiggestellt worden, über das H. Meixner im Vortrag Nr. 6 berichten wird. Dabei werden Angaben über die Beschaffung der Näherungswerte, über die Konvergenz der Iterationen und über Rechenzeiten gemacht werden.

Mit diesem Programm sind erste Streifen- und Blockausgleichungen durchgeführt worden, die zunächst dem Genauigkeitsvergleich mit der Methode der unabhängigen Modelle gewidmet sind. Die ersten Ergebnisse haben einige außerordentlich interessante Überraschungen gebracht, die wieder einmal zeigen, wie vorsichtig man mit der Pauschalbeurteilung von Methoden sein muß. Die Ergebnisse der Bündelausgleichung sind nämlich nicht um den erwarteten Faktor 1.6 besser ausgefallen als bei den entsprechenden Ausgleichungen nach der



1) Kein Name eingeführt.

Abb. 2 Schematische Übersicht über die Methoden der Blocktriangulation

Methode der unabhängigen Modelle. Vielmehr hat sich die Absolutgenauigkeit der Streifen- und Blockausgleichungen mit unabhängigen Modelle als mindestens gleichwertig bzw. sogar als günstiger erwiesen als nach der Bündelmethode.

Dieses Ergebnis kam nicht ganz so unerwartet wie es den Anschein hat. Sowohl allgemeine Überlegungen über die Zahl der Freiheitsgrade einer Ausgleichung als auch theoretische Untersuchungen über systematische Fehler, die beim Internationalen Photogrammetrikongreß in Ottawa im vergangenen Jahr vorgelegt worden waren, ließen erkennen, daß die Bündelmethode offenbar gegen systematische Bildfehler empfindlicher ist als die Methode der unabhängigen Modelle. Diese These wurde sehr deutlich bestätigt durch vergleichende Streifen- und Blockausgleichungen mit demselben Material beim Landesvermessungsamt Niedersachsen mit dem dort verfügbaren Programm [11], das sich durch die Berücksichtigung zusätzlicher Parameter der inneren Orientierung, d.h. durch zusätzliche Parameter zur Kompensation systematischer Bildfehler auszeichnet.

Mit diesen Feststellungen ist auch schon das weitere Untersuchungs- und Entwicklungsprogramm vorgezeichnet. Die Aero-triangulation wird sich mit der Erfassung der systematischen Bildfehler beschäftigen müssen.

2.6.4 Untersuchungen zur Genauigkeitsstruktur des Einzelmodells

Als Grundlagenuntersuchung für dieses neue Arbeitsprogramm sind im Rahmen einer Dissertation von E. Stark eingehende empirische, d.h. praktisch voraussetzungslose Untersuchungen zur Bestimmung der Genauigkeitsstruktur des Einzelmodells angestellt worden, über die er im Vortrag Nr. 8 berichtet. Unter Genauigkeitsstruktur sind hier die Korrelationen zwischen den Koordinaten aller Punkte im Einzelmodell gemeint. Im Ergebnis bestätigt sich die von vornherein vermutete starke Korrelation zwischen den Punkten

eines Modells. Durch Berücksichtigung dieser Korrelation bei der absoluten Orientierung, d.h. durch strenge Berechnung gelingt es, eine absolute Genauigkeit der Lagekoordinaten von $4 \mu\text{m}$ und eine absolute Höhengenaugigkeit von $7 \mu\text{m}$ im Modell zu erreichen. Dies ist ein konkreter Hinweis darauf, daß bei strengeren mathematischen und fehlertheoretischen Modellansätzen die Genauigkeit der photogrammetrischen Auswertung mit numerischen Methoden noch einmal beträchtlich gesteigert werden kann.

2.6.5 Weiteres Arbeitsprogramm

Das vorhandene Zahlenmaterial aus den Blockausgleichungen und aus den Untersuchungen des Einzelmodells, verbunden mit theoretischen Überlegungen, weist deutlich das Thema der weiteren Entwicklungen und Untersuchungen aus. Die genaue Analyse der Restfehler nach Ausgleichungen zeigt stets das deutliche Vorherrschen systematischer Restfehler in Blöcken im Größenbereich von etwa $10 \mu\text{m}$. Diese Beträge sind erfreulich klein, um der Blockausgleichung auch ohne spezielle Berücksichtigung systematischer Fehler in der Praxis die großen Anwendungs- und Genauigkeitserfolge zu sichern. Andererseits läßt sich aus dieser Tatsache ableiten, daß es durch weitere Verfeinerung der mathematischen und stochastischen Modelle, d.h. durch weitere Verfeinerung der Rechenmethoden möglich sein wird, einen großen Teil der systematischen Fehler bei der Ausgleichung zu erfassen und zu kompensieren. Diese Methode ist wesentlich erfolgversprechender als die bisher propagierte, systematische Bildfehler vor der Blockausgleichung zu korrigieren.

Für die Erfassung systematischer Bildfehler bei Blockausgleichungen bieten sich zwei verschiedene Wege an. In einem Fall werden zusätzliche Parameter für systematische Bildfehler in der Ausgleichung mitgeführt. Dieser Weg muß auf jeden Fall beschritten werden. Wir werden dabei die Einführung der zusätzlichen Parameter in die Ausgleichung etwas

anders gestalten als in [11] , um die Gefahr singulärer Normalgleichungen auszuschließen. Als zweite Möglichkeit bietet sich an, das ausgeglichene Punktfeld nachträglich durch Anwendung der kleinsten-Quadrate-Interpolation zu verbessern. Erste Versuche haben ergeben, daß dadurch zumindest für die Lagegenauigkeit deutliche Genauigkeitssteigerungen erzielbar sind.

Von diesen Entwicklungen kann man sich noch einmal eine ganz erhebliche Genauigkeitssteigerung der photogrammetrischen Punktbestimmung versprechen. Es müßten bei Blockausgleichungen eine Absolutgenauigkeit der Lagekoordinaten im Bereich von 5 μm und absolute Höhengenaugigkeiten je nach Verteilung der Höhenpaßpunkte in der Größenordnung von 10 μm erreichbar sein. Bei diesem Kampf um die Mikrons kommen natürlich alle Möglichkeiten, die zur Genauigkeitssteigerung beitragen könnten, wieder ins Spiel, auch wenn sie gegenwärtig als nicht allzu effektiv links liegen gelassen werden. Hierzu gehören z.B. Reseau-Korrekturen und verfeinerte Kammerkalibrierungen mit Hilfe von Testfeldern.

Wenn sich diese Prognosen bestätigen sollten, hätte die photogrammetrische Punktbestimmung durch Ausschöpfung aller meß- und rechentechnischen Hilfsmittel ein Genauigkeitsniveau erreicht, das nach allen bisherigen Bewertungsmaßstäben als sensationell gelten müßte. Für ein weiteres Vordringen der numerischen Photogrammetrie in Anwendungsgebiete der Geodäsie, der Ingenieurvermessungen und ungezählter Sonderanwendungen wäre dann der Weg offen.

3. Digitale Kartierung

Die bisherigen Ausführungen haben sich ausschließlich auf die photogrammetrische Punktbestimmung bezogen. Der lange Zeit auf diesen Komplex der Punktbestimmung beschränkte Begriffsinhalt der numerischen Photogrammetrie greift neuerdings weit über diesen Bereich hinaus. Seit einer Reihe von

Jahren beschäftigt man sich mit der Möglichkeit, graphische Ergebnisse, d.h. Strichkarten digital zu erzeugen. Dabei werden Linien als sehr dichte Folgen diskreter Einzelpunkte aufgefaßt, die im Prinzip nach den Methoden der Punktbestimmung einzeln berechnet werden können. Die allgemeine Vorstellung geht dahin, eine Karte im Prinzip in digitaler Form, d.h. zum Beispiel auf Magnetband gespeichert als Gesamtheit aller darin enthaltenen Punkte zu erzeugen. Die graphische Darstellung mit Hilfe automatischer Kartiergeräte dient dann lediglich der Veranschaulichung und kann nach beliebigen Selektions- und Darstellungsprinzipien erfolgen.

Diesen Bereich der sogenannten digitalen Kartierung, bei dem uns hier weniger die durch Registriergeräte vom Typ Ecomat 11 oder EK 8 gegebenen instrumentellen Voraussetzungen interessieren als vielmehr die methodischen und numerischen Probleme der digitalen Berechnung, beherrschen weitgehend andere Gesichtspunkte als bei der Punktbestimmung. Einerseits sind die Genauigkeitsfragen weniger kritisch und nicht ins Extrem gesteigert. Andererseits hat man es in ganz anderer Art als bei den Punktbestimmungen mit sehr großem Datenanfall zu tun. Außerdem unterscheiden sich die Probleme der digitalen Grundrißkartierung sehr grundlegend von denen der digitalen Schichtlinienkartierung.

3.1 Digitale Grundrißkartierung

Es gibt bereits einige Organisationen in verschiedenen Ländern, die digitale Grundrißkartierung in ihre Praxis eingeführt haben. Erwähnt seien hier

- die Vermessungsabteilung des Rijkswaterstaat in Delft, Holland, (großmaßstäbige Karten für Verkehrswege und Wasserstraßen), [12]
- Das Highway-Department der Provinz Ontario in Toronto, Kanada; dort werden Karten großer und mittlerer Maßstäbe in einem sehr ausgebauten Gesamtsystem digital hergestellt.

Es ist bekannt, daß an einer Reihe weiterer Stellen an Rechenprogrammen und Instrumentensystemen für die digitale Grundrißkartierung gearbeitet wird.

Am Photogrammetrischen Institut der Universität Stuttgart haben wir uns bisher nur nebenher mit der digitalen Grundrißkartierung beschäftigt. Immerhin ist als Vorbereitung eine Studien- und Experimentierversion eines Programms zur digitalen Grundrißkartierung entwickelt worden, die z.B. von Studenten im Übungsbetrieb benützt wird. Über diese Entwicklung wird im Rahmen dieses Kurses noch nicht berichtet.

3.2 Digitale Schichtlinienkartierung

Bei der Berechnung von Schichtlinien als dichte Punktfolgen besteht das Problem darin, aus beliebig verteilten, vorzugsweise jedoch in Profilen angeordneten gegebenen Höhenpunkten, die selber nicht fehlerfrei sind, Punkte der Schichtlinien abzuleiten, die gegebenenfalls noch bestimmten Kriterien der Generalisierung genügen müssen. Von diesen auf Magnetband abgespeicherten Schichtlinien kann dann mit Hilfe automatischer Kartiergeräte die Zeichnung der Schichtlinien erfolgen.

Bei der Entwicklung eines Rechenprogrammes für die Ableitung der digitalen Schichtlinien aus mehr oder weniger beliebig verteilten gegebenen Punkten hat man wiederum im wesentlichen zwei Probleme zu unterscheiden:

- Die Frage eines möglichst leistungsfähigen und allgemein gültigen Interpolationsprinzips
- Die Durchentwicklung des Programms in organisatorischer Hinsicht, um zu einem möglichst bequemen, in allen Einzelheiten ausgearbeiteten Verfahren zu kommen, das für möglichst viele Fälle der Schichtlinienkartierung unmittelbar praktisch angewendet werden kann.

Auf Grund eines Entwicklungsauftrages der Firma Wild Heerbrugg haben wir seit Herbst 1971 mit einem Personalaufwand von 2 1/2 Mann begonnen, ein Schichtlinienprogramm zu entwickeln. Der unmittelbare Ausgangspunkt war die Ableitung von Schichtlinien aus Profilmessungen, wie sie im Zusammenhang mit der Herstellung von Orthophotos entstehen.

Dem Schichtlinienprogramm liegt mathematisch die Methode der linearen Prädiktion oder der Interpolation nach kleinsten Quadraten zugrunde, die schon bei der Verbesserung der Punktbestimmung wertvolle Dienste geleistet hat und über die bereits Erfahrungen vorlagen. Die Methode ist allerdings numerisch außerordentlich aufwendig. Ihr Vorteil ist die sehr allgemeine Leistungsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit. Weiterhin wurde festgelegt, mit der Interpolation aus den gegebenen Daten nicht direkt auf die Schichtlinien zu gehen sondern zunächst ein regelmäßiges Punktraster zu interpolieren, d.h. ein digitales Geländemodell zu bestimmen.

Dieses Zwischenprodukt des digitalen Geländemodells hat sich inzwischen als sehr zweckmäßig herausgestellt, da ihm selbständige Bedeutung zukommt. Vor allem die weiteren elektronischen Rechenverfahren zur Straßenentwurfsbearbeitung gehen häufig von einem digitalen Geländemodell aus.

Die Programmentwicklung soll im Frühjahr 1973 abgeschlossen sein. Die Vorträge Nr. 9 und 10 von K. Kraus und W. Stanger werden über den inzwischen erreichten Entwicklungsstand berichten.

Von kartographischer Seite wird digital abgeleiteten Schichtlinien bisher noch große Skepsis entgegengebracht. Die vorläufigen Ergebnisse stützen jedoch hohe Erwartungen der Leistungsfähigkeit und praktischen Brauchbarkeit der digitalen Schichtlinieninterpolation. Das allgemeine Prinzip garantiert überdies, bei Bedarf fast beliebige Erweiterungen und Verfeinerungen vorzunehmen. Es ist sicher, daß die digital-interpolierten Schichtlinien mindestens die gleiche

Qualität erreichen werden wie direkt am Stereogerät gezeichnete Schichtlinien. Darüber hinaus ist abzusehen, daß auch hohe kartographische Ansprüche befriedigt werden können. Die Methode birgt weiterhin große Möglichkeiten für die Generalisierung von Schichtlinien. Sie wird außerdem über den photogrammetrischen Bereich hinausreichen und z.B. zur Ableitung von Schichtlinien aus Tachymeteraufnahmen verwendet werden können.

3.3 Abschließende Betrachtung

Diese Übersicht über unsere Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der numerischen Photogrammetrie hofft dem Anspruch zu genügen, Zwischenbilanz einer intensiven Entwicklung zu sein. Auch die Bemühungen an vielen anderen Instituten und Organisationen halten die Entwicklung im Fluß. Es ist unverkennbar, daß die Übertragung numerisch digitaler Methoden in den Bereich, der bisher der graphischen Bearbeitung vorbehalten war, erst am Anfang steht und sicherlich in kurzer Zeit zu großartigen Erfolgen führen wird. Die selbständige Bedeutung von Software-Entwicklungen zeigt sich immer mehr. Allerdings stoßen wir dabei immer wieder auf das Problem, daß der Aufwand für derartige Entwicklungen außerordentlich groß ist und einzelne Institute damit überfordert sind. Eine Koordinierung der Entwicklungsarbeiten wenigstens in der Bundesrepublik wäre dringend erforderlich.

Zum Schluß sei noch einmal auf die mehrfach berührte Frage des Begriffsinhaltes der numerischen Photogrammetrie zurückgekommen. In der ersten Stufe bedeutete dieser Begriff photogrammetrische Punktbestimmung. Auf dieser Stufe ist die Entwicklung sehr weit vorangeschritten. Es sollte jedoch deutlich geworden sein, daß immer noch beträchtliche Entwicklungen geleistet werden müssen, die voraussichtlich zu extremen Genauigkeiten führen werden. Außerdem gibt es auf dieser Stufe noch die Probleme der Punktbestimmung im Bereich der Fernerkundung, die hier ausgeklammert blieben.

In der zweiten Stufe gehört in den Bereich der numerischen Photogrammetrie der ganze Komplex der digitalen Kartierung. Auf dieser Stufe wird seit einigen Jahren sehr intensiv entwickelt. Erste Erfolge und praktische Anwendungen bestehen bereits. Es ist zu erwarten, daß in wenigen Jahren sehr weit vorangetriebene Entwicklungen vorliegen werden, die dem Fernziel der Automation in der Kartographie sehr nahegekommen sein werden. Darüber hinaus gibt es noch eine dritte Stufe, die mit dem Stichwort der völligen Digitalisierung des photographischen Bildinhaltes gekennzeichnet sei. Auf dieser Stufe darf man zwar gegen vorschnelle Erfolgserwartungen skeptisch sein, es würde jedoch allen Erfahrungen widersprechen, wenn sich bei entsprechend hohem Aufwand keine Ergebnisse einstellen würden.

Literatur

- [1] Institut für Photogrammetrie, Aerotriangulation mit unabhängigen Modellen, BuL Heft 4/1970 (7 Aufsätze).
- [2] Numerische Photogrammetrie, Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe I, Heft Nr. 53, (8 Aufsätze).
- [3] Diebold Management Report, Oktober 1972, Diebold Deutschland GmbH, Frankfurt/Main.
- [4] F. Ackermann, Ergebnisse einer Programmentwicklung zur Blockausgleichung großräumiger Polaraufnahmen, Herbert Wichmann Verlag Karlsruhe, Schriftenreihe Heft 20 (im Druck).
- [5] K. Kraus, K. Krack, Detailprobleme und Erfahrungen bei der Bearbeitung großräumiger Polaraufnahmen, Herbert Wichmann Verlag Karlsruhe, Schriftenreihe Heft 20 (im Druck).
- [6] Innenministerium Baden-Württemberg, Verwaltungsvorschriften für die Anwendung der Photogrammetrie bei Katastervermessungen (VVPPhoto), vom 14. Oktober 1971 Nr. II 5 2002/96.
- [7] R.R. Gauthier, J.H. O'Donnell, B.A. Low, The planimetric adjustment of very large blocks of models: its application to topographical mapping in Canada; presented paper, Comm. III, ISP-Congres, Ottawa, 1972.
- [8] P.R.J. Boniface, The computation of large blocks with Anblock and its application to geodetic surveys; presented paper, Comm. III, ISP-Congres, Ottawa, 1972.
- [9] C. de Vegt, H. Ebner, Blockadjustment Methods in Photographic Astrometry, Astron. and Astrophys. 17, 276 - 285, 1972.
- [10] F. Ackermann, R. Bettin, Anwendungsmöglichkeiten der Photogrammetrie bei der Katastervermessung von Straßen, Forschungsbericht über die Straßenschlußvermessung Neckarsulm, Stuttgart 1972.
- [11] J. Müller, Blocktriangulation mit Verbesserung der inneren Orientierung, BuL 3/1971, 107 - 112.
- [12] C.M.A. Van den Hout, Digitale Grundrißkartierung in großen Maßstäben, BuL 1/1970, 85 - 90.

