

Von F. Ackermann, Stuttgart

1. Einleitung

1.1. Unter kontrollierten Streifen- und Blockausgleichungen versteht man Ausgleichungen, deren Ergebnisse mit einer anderen, unabhängigen Bestimmung übergeordneter Genauigkeit verglichen werden. Bei der Punktbestimmung durch Aerotriangulation handelt es sich dabei praktisch stets um den Fall, daß für eine Anzahl der photogrammetrisch bestimmten Neupunkte Lage- und/oder Höhenkoordinaten aus unabhängigen geodätischen Bestimmungen zum Vergleich vorliegen. Sind letztere so genau, daß ihre Fehler vergleichsweise unwesentlich sind, können die Koordinatendifferenzen an diesen Vergleichspunkten als wahre oder absolute Fehler der photogrammetrischen Punktbestimmung angesehen werden. Wenn weiterhin die Zahl der Vergleichspunkte nicht zu klein ist (z.B. >10) und sie einigermaßen gleichmäßig über das jeweilige Gebiet verteilt sind, gelten die quadratischen Mittelwerte der absoluten Koordinatenfehler der Vergleichspunkte als Maß für die durchschnittliche Absolutgenauigkeit des jeweiligen Streifens oder Blocks.

Bei der hohen Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung können allerdings in vielen Fällen die Fehler der terrestrisch-geodätischen Vergleichskordinaten nicht mehr vernachlässigt werden. Der Vergleich weist daher nicht die Absolutgenauigkeit der photogrammetrischen Bestimmung, sondern nur die von den Fehlern beider Verfahren verursachte Differenz aus.

1.2 Kontrollierte Streifen- und Blockausgleichungen sind in mehrfacher Hinsicht erwünscht und notwendig:

- Der Praktiker hat Anspruch darauf, unabhängig von jeder Theorie die Genauigkeitsleistung photogrammetrischer Punktbestimmungen demonstriert zu bekommen. Die Einzelergebnisse haben jedoch nur punktuelle Bedeutung, da sie ohne Theorie nicht verallgemeinert werden können.
- Größere Aussagekraft erhalten die Ergebnisse, wenn sie mit den jeweiligen theoretischen Erwartungen in Beziehung gesetzt werden.
- Wissenschaftlich strenger gefaßt handelt es sich um die bei den Natur- und Ingenieurwissenschaften stets notwendige Überprüfung der empirischen Ergebnisse auf Verträglichkeit mit den theoretischen Genauigkeitsmodellen im Sinne statistischer Hypothesenteste, unter Benützung geeigneter, möglichst repräsentativer Testgrößen.

1.3 Bei normalen Anwendungen der Aerotriangulation besteht keine Möglichkeit zur unabhängigen Überprüfung der Ergebnisse. Sämtliche gegebenen Paßpunkte werden in der Regel in der Ausgleichung benützt. Restfehler (Verbesserungen) an Paßpunkten nach der Ausgleichung sind bekanntlich nicht zur Beurteilung der erreichten Absolutgenauigkeit brauchbar.

Wenn aber genügend Paßpunkte gegeben sind, läßt sich z.B. in einer Zweitberechnung ein Teil dieser Punkte aus der Ausgleichung herausnehmen und als Vergleichspunkte verwenden. So kann man in gewissem Umfang aus dem Material praktischer Aerotriangulationen kontrollierte Ausgleichungen ableiten.

Die wichtigsten kontrollierten Ausgleichungen beziehen sich auf Testgebiete, die eigens für wissenschaftliche Untersuchungen angelegt sind. Nur damit lassen sich systematische Untersuchungen durchführen und statistisch signifikante Ergebnisse ableiten.

Testgebiete für die Aerotriangulation und damit kontrollierte Streifen- und Blockausgleichungen hat es bisher nur vereinzelt gegeben. Der Aufwand für die Anlage ausgedehnter Testgebiete und die Durchführung der erforderlichen umfangreichen Untersuchungen ist außerordentlich hoch.

1.4 Im folgenden werden die Ergebnisse einer Reihe kontrollierter Streifen- und Blockausgleichungen vorgestellt, die in den vergangenen 3 Jahren am Photogrammetrischen Institut der Universität Stuttgart bearbeitet worden sind. Die Fälle sind nach dem Ursprung des Materials und nach verschiedenen Fragestellungen gegliedert. Die Ergebnisse sollen im wesentlichen für sich selbst sprechen und werden deshalb nur kurz im Hinblick auf theoretische Erwartungen und Zusammenhänge kommentiert. Strenge Vergleiche mit der Theorie durch statistische Tests bleiben ausgeklammert.

Zum leichteren Verständnis der tabellarischen Zusammenstellungen wird auf folgende Größen hingewiesen:

- σ_0 = mittlerer Gewichtseinheitsfehler; er ist ein Maß für die Genauigkeit der Beobachtungen (vom Gewicht 1), z.B. bei Blockausgleichungen mit unabhängigen Modellen die Genauigkeit der gemessenen Modellkoordinaten. Jede Ausgleichung liefert einen Schätzwert für den mittleren Gewichtseinheitsfehler.
- μ = quadratischer Mittelwert einer Gruppe von "wahren" Koordinatenfehlern, z.B. für Lage- oder Höhenkoordinaten. Diese Mittelwerte werden aus Vergleichspunkten abgeleitet und sind ein Maß für die Absolutgenauigkeit eines Streifens oder Blocks in der jeweiligen Komponente.
- μ/σ_0 Von besonderer Bedeutung ist das Verhältnis μ/σ_0 . Falls sich dieses Verhältnis für bestimmte Fälle als invariant herausstellt, würde man jeweils von dem bei jeder Ausgleichung anfallenden σ_0 auf μ schließen können, auch wenn keine Vergleichspunkte verfügbar sind.

2. Ergebnisse

2.1 Streifenausgleichungen

2.1.1 Die OEEPE (Organisation Européenne d'Etudes Photographiques Experimentales), eine Forschungsorganisation sechs europäischer Länder, hat im Jahre 1969 ein 40,0 km x 62,5 km großes Versuchsgebiet zwischen Donau und Bodensee in Süd-Württemberg angelegt. Nach dem geographischen Gebiet wird es als Testfeld Oberschwaben bezeichnet. Es sind über 500 trigonometrische Punkte signalisiert worden, die als Paß- und Vergleichspunkte zur Verfügung stehen, die meisten mit Lage- und Höhenkoordinaten. Zusätzlich wurden die Verknüpfungspunkte zwischen benachbarten Modellen im Gelände signalisiert, um den Einfluß der Punktqualität und der Punktübertragung getrennt untersuchen zu können. Das Gebiet wurde jeweils im Maßstab 1:28 000 mit Zeiss RMK 15/23 (Weitwinkel) und RMK 8,5/23 (Oberweitwinkel) befliegen, abgesehen von weiteren Befliegungen mit einer Réseau-Kammer, die hier nicht aufgeführt zu werden brauchen. Die Befliegung umfaßt jeweils 15 Nord-Süd-Streifen zu je 25 Modellen, mit 60% Querüberdeckung. Die Messung und bisherige Bearbeitung, die noch nicht abgeschlossen ist, untergliedert das Material in 4 Teilblöcke, die an vier verschiedenen Zentren mit Stereokomparatoren gemessen wurden:

- IfaG Frankfurt, 8 Streifen WW, $q = 20\%$, 200 Modelle; PSK
- TH Wien, 7 Streifen WW, $q = 20\%$, 175 Modelle; StK1
- Kataster Den Haag, 8 Str.OWW, $q = 20\%$, 200 Modelle; PSK
- ITC Delft, 7 Streifen OWW, $q = 20\%$, 175 Modelle; StK1.

Aus den gemessenen und mit Korrekturen für radialsymmetrische Verzeichnung sowie für Erdkrümmung und Refraktion versehenen Bildkoordinaten wurden unabhängige Modelle berechnet und daraus Streifen gebildet. Das Centre Pilot Stuttgart führte damit folgende kontrollierte Streifenausgleichungen aus, die sich jeweils auf dasselbe Datenmaterial beziehen:

- strenge Streifenausgleichung mit unabhängigen Modellen
- Polynomgleichungen 2. und 3. Grades, jedes Polynom mit 4 verschiedenen Versionen: (1) x, y, z abhängig; (2) x, y, z unabhängig; (3) xy abhängig, z unabhängig; (4) wie (3), xy konform
- jeweils 6 verschiedene Paßpunktanordnungen, unterschieden durch die Länge i der Paßpunktintervalle, ausgedrückt in Basislängen: i=1, 2, 4, 6, 8, 12.5 (i=1 steht für: "alle Punkte als Paßpunkte benützt").

Das gesamte Programm dieser Untersuchungen umfaßt also bis hierher 1620 Streifenausgleichungen.

2.1.2 Tabelle 1 zeigt für den Block Frankfurt das einigermaßen überraschende Ergebnis, daß sich die verschiedenen Polynomversionen praktisch überhaupt nicht in der Genauigkeit unterscheiden. Falls Polynome zur Streifenausgleichung benützt werden, kann also die Entscheidung über die Art des Polynoms, d.h. über die Frage der Berücksichtigung der Abhängigkeiten zwischen den Koordinaten nach anderen Kriterien getroffen werden.

Bei gegebener Streifenlänge und gegebener Paßpunktanordnung unterscheiden sich wie erwartet Polynome 2. und 3. Grades erheblich. Ebenso deutlich bestätigt sich, daß die strengere Ausgleichung nach der Methode der unabhängigen Modelle wesentlich genauere Ergebnisse liefert als jede der Polynomgleichungen. Nur beim praktisch nicht überbestimmten Fall nähern sich strenge und Näherungsausgleichung, was ebenfalls der theoretischen Erwartung entspricht.

2.1.3 In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Streifenausgleichungen der Weitwinkelaufnahmen in Form der Mittelwerte der jeweils 8 bzw. 7 Streifen der Zentren Frankfurt und Wien zusammengestellt. Die Polynomgleichungen beziehen sich jeweils auf die Version 1 (x, y, z abhängig).

Tabelle 1 OEEPE Oberschwaben, Block Frankfurt
(WW, 1:28 000, 200 Modelle)
Absolute Genauigkeit verschiedener Verfahren der
Streifenausgleichung, für verschiedene Paßpunkt-
abstände (Angaben in μm im Bildmaßstab)

Paßpunkt- abstände i (in Basislängen)		Ausgleichung mit								
		unabhängigen Modellen	Polynomen 2. Grades				Polynomen 3. Grades			
			(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
i = 1 (alle PP)	μ_x	6.6	16.6	15.3	16.7	16.7	13.1	12.0	13.3	13.3
	μ_y	6.7	19.9	18.7	19.4	19.3	12.6	10.5	11.9	11.6
	μ_z	10.1	21.0	21.0	21.0	21.0	16.4	16.4	16.4	16.4
	σ_0	8.8	-	-	-	-	-	-	-	-
.										
i = 2	μ_x	9.1	16.8	16.0	16.9	16.9	13.8	12.8	14.0	13.9
	μ_y	9.5	21.4	20.2	20.9	20.6	14.0	12.2	13.3	12.7
	μ_z	14.0	23.1	23.0	23.0	23.0	17.9	17.8	17.8	17.8
	σ_0	8.4	-	-	-	-	-	-	-	-
i = 4	μ_x	9.0	17.5	16.9	17.7	17.7	14.3	13.8	14.4	14.4
	μ_y	10.2	21.6	20.5	21.0	20.8	14.0	12.7	13.4	12.8
	μ_z	14.7	23.4	24.2	24.2	24.2	19.0	19.0	19.0	19.0
	σ_0	8.4	-	-	-	-	-	-	-	-
i = 6	μ_x	10.5	18.5	17.9	18.6	18.6	14.7	14.3	14.9	14.9
	μ_y	10.2	23.1	21.8	22.6	22.6	13.9	12.9	13.3	13.0
	μ_z	16.2	25.6	25.5	25.5	25.5	20.4	20.4	20.4	20.4
	σ_0	8.4	-	-	-	-	-	-	-	-
i = 8	μ_x	11.2	18.9	18.5	19.0	19.1	15.3	16.5	15.5	15.5
	μ_y	11.6	23.9	23.1	23.3	23.1	14.7	14.3	14.1	13.7
	μ_z	19.0	27.8	27.7	27.7	27.7	22.2	22.2	22.2	22.2
	σ_0	8.4	-	-	-	-	-	-	-	-
i = 12.5	μ_x	16.8	22.0	22.5	22.2	22.2	(1) xyz abhängig (2) xyz unabhängig (3) xy abhängig (4) xy konform			
	μ_y	15.4	27.7	27.3	27.2	27.0				
	μ_z	30.9	30.8	30.8	30.8	30.8				
	σ_0	8.4	-	-	-	-				

Die Tabelle bestätigt zunächst die allgemeine Untergenauigkeit der Polynomverfahren gegenüber der strengen Ausgleichung mit unabhängigen Modellen. Für letztere Methode zeigen die Ergebnisse eine bemerkenswerte Genauigkeit und ihre Abhängigkeit von der Paßpunktanordnung. Mit zunehmenden Intervallen i steigen die mittleren Koordinatenfehler, allerdings weniger schnell als bisher theoretisch erwartet wurde. Allgemein sind die erreichten Genauigkeiten sehr gut. Bei einem mittleren Gewichtseinheitsfehler von 8-9 μm liegt die mittlere Genauigkeit der Lagekoordinaten der Streifen bis zu Paßpunktabständen von 6 Basislängen im Bereich von 8-12 μm , die der Höhenkoordinaten bei 14-20 μm oder 0.09-0.13 % der Flughöhe.

2.1.4 Analog zu Tabelle 2 sind in Tabelle 3 die entsprechenden Ergebnisse der Streifenausgleichungen der Oberweitwinkelaufnahmen dargestellt. Die allgemeinen Genauigkeitsverhältnisse der Weitwinkelstreifen finden sich völlig bestätigt. Eine gewisse Überraschung bietet jedoch die Tatsache, daß bei vergleichbaren Werten von σ_0 die Absolutgenauigkeit der OWW-Streifen in den Lagekoordinaten durchschnittlich um 29 %, in den Höhen um 18 % ungünstiger ist als bei den WW-Streifen. Der Unterschied der absoluten Höhengenaugkeit macht bezogen auf die Flughöhe mehr als den Faktor 2 aus. Damit sind schon bekannte Indizien bestätigt, wonach OWW-Ergebnisse absolut genommen bei gleichem Bildmaßstab auch in der Höhe mindestens nicht besser sind als WW-Ergebnisse. Das günstigere Basis-Höhenverhältnis kommt also nicht zur Auswirkung. Somit hat sich eine der wesentlichen Begründungen für die Einführung von Oberweitwinkelaufnahmen als nicht stichhaltig erwiesen. Diese Aussage wird nicht wesentlich dadurch beeinträchtigt, daß im vorliegenden Fall die Bildqualität der OWW-Aufnahmen deutlich schwächer war als die der WW-Aufnahmen.

Tabelle 2 OEEPE Oberschwaben - Ergebnisse der Streifen-
ausgleichungen - Weitwinkel
Angaben in μm im Bildmaßstab 1:28 000

Paßpunkt- abstände i	Block Frankfurt (8 Streifen)			Block Wien (7 Streifen)			
	unabh. Mod.	Pol. 2.Grad.	Pol. 3.Grad.	unabh. Mod.	Pol. 2.Grad.	Pol. 3.Grad.	
$i = 1$ (alle PP)	μ_x	6.6	16.6	13.1	6.4	22.6	16.7
	μ_y	6.7	19.9	12.6	6.8	28.1	15.8
	μ_z	10.1	21.0	16.4	10.0	21.7	16.2
	σ_0	8.8	-	-	8.9	-	-
.....							
$i = 2$	μ_x	9.1	16.8	13.8	7.5	22.8	17.1
	μ_y	9.5	21.4	14.0	9.0	27.4	15.4
	μ_z	14.0	23.1	17.9	14.7	23.9	18.6
	σ_0	8.4	-	-	8.6	-	-
$i = 4$	μ_x	9.0	17.5	14.3	8.9	23.9	17.8
	μ_y	10.2	21.6	14.0	11.1	31.2	17.4
	μ_z	14.7	23.4	19.0	14.7	24.4	19.1
	σ_0	8.4	-	-	8.6	-	-
$i = 6$	μ_x	10.5	18.5	14.7	11.4	24.6	18.5
	μ_y	10.2	23.1	13.9	13.9	34.2	18.4
	μ_z	16.2	25.6	20.4	20.4	27.4	21.3
	σ_0	8.4	-	-	8.6	-	-
$i = 8$	μ_x	11.2	18.9	15.3	15.4	27.2	20.3
	μ_y	11.6	23.9	14.7	16.1	35.9	20.3
	μ_z	19.0	27.8	22.2	20.4	27.5	22.6
	σ_0	8.4	-	-	8.6	-	-
$i = 12.5$	μ_x	16.8	22.0	22.6	19.7	31.9	28.9
	μ_y	15.4	27.7	17.8	26.0	41.5	27.0
	μ_z	30.9	30.8	-	39.3	-	-
	σ_0	8.4	-	-	8.6	-	-

Tabelle 3 OEEPE Oberschwaben - Ergebnisse der Streifen-
 ausgleichungen - Oberweitwinkel
 Angaben in μm im Bildmaßstab 1:28 000

Paßpunkt- abstand i (Basislängen)	Block Den Haag (8 Streifen)			Block Delft (6 Streifen)			
	unabh. Mod.	Pol. 2.Grad.	Pol. 3.Grad.	unabh. Mod.	Pol. 2.Grad.	Pol. 3.Grad.	
i = 1 (alle PP)	μ_x	8.4	27.8	16.2	7.1	17.8	13.6
	μ_y	9.9	28.6	22.4	8.2	19.1	16.8
	μ_z	11.1	34.0	22.1	9.6	24.5	19.8
	σ_0	10.2	-	-	8.7	-	-

i = 2	μ_x	11.1	29.0	17.9	9.6	18.4	14.6
	μ_y	13.9	28.4	22.2	11.1	18.9	16.6
	μ_z	17.5	37.8	25.2	15.4	26.6	22.7
	σ_0	9.6	-	-	8.1	-	-
	i = 4	μ_x	13.2	29.8	18.5	10.7	19.2
μ_y		15.0	30.7	24.6	12.8	20.2	17.3
μ_z		20.4	43.5	28.4	16.4	27.7	23.3
σ_0		9.4	-	-	7.9	-	-
i = 6		μ_x	16.1	33.2	19.5	12.1	20.6
	μ_y	17.1	33.1	25.3	14.3	22.1	19.5
	μ_z	21.8	42.8	27.8	18.2	28.6	25.4
	σ_0	9.3	-	-	7.9	-	-
	i = 8	μ_x	21.4	33.0	21.6	14.3	20.1
μ_y		20.7	34.6	28.5	17.2	24.1	20.9
μ_z		32.9	45.4	36.7	20.4	29.6	27.0
σ_0		9.2	-	-	7.9	-	-
i = 12.5		μ_x	27.1	37.8	31.7	18.9	22.6
	μ_y	28.6	41.6	36.3	19.3	26.0	22.1
	μ_z	46.4	57.1	-	33.9	37.2	-
	σ_0	9.1	-	-	7.8	-	-

2.1.5 Beim Studium der Tabellen 2 und 3 fällt auf, daß sich bei gleicher Aufnahmeart die von verschiedenen Zentren stammenden Messungen (Frankfurt/Wien und Den Haag/Delft) unter sonst gleichen Umständen in den Ergebnissen der Streifenausgleichungen unerwartet stark unterscheiden. Die Ursachen dafür sind noch ungeklärt.

Zusammenfassend bietet dieses Material wohl zum erstenmal einen umfassenden Vergleich verschiedener Methoden der Streifenausgleichung, ist empirisch die Genauigkeit als Funktion der Paßpunktabstände bestimmt und liegt unter sonst gleichen Bedingungen ein umfangreicher Vergleich von Weitwinkel- und Oberweitwinkelaufnahmen vor. Bei einer Verallgemeinerung der Ergebnisse muß berücksichtigt werden, daß sie sich hinsichtlich der Signalisierung aller Punkte einschließlich der Verknüpfungspunkte auf sehr günstige Bedingungen beziehen.

2.2. Lageblockausgleichungen mit unabhängigen Modellen

2.2.1 Die Lageblockausgleichung mit unabhängigen Modellen in Form verketteter Helmert-Transformationen hat vor allem bei großmaßstäbigen photogrammetrischen Punktbestimmungen (z.B. Katastervermessung) Anwendung gefunden. Sie setzt horizontierte Modelle voraus. Die Theorie schreibt der Methode außerordentlich günstige Genauigkeitseigenschaften zu. Insbesondere genügt es, nur die Ränder eines Blocks mit Lagepaßpunkten zu besetzen, fast unabhängig von der Blockgröße, um eine Absolutgenauigkeit im Block zu erreichen, die sich nur wenig von σ_0 bzw. wenig von der Genauigkeit eines Einzelmodells unterscheidet.

2.2.2 Tabelle 4 zeigt einige Ergebnisse aus Katasterprojekten (mit signalisierten Punkten), die genügend Lagepaßpunkte hatten, um einige als Vergleichspunkte auszuscheiden. Die Theorie der Randbesetzung scheint sich danach im wesentlichen zu bestätigen.

Tabelle 4 Lagegenauigkeit von Katasterblöcken (mit PP-Randbesetzung)

Projekt	Bildmaßstab	Instr.	$n_{Mod.}$	n_{PP}	n_{VglP}	σ_0	$\mu_{x,y}$	μ/σ_0
Hermuthausen-Steinbach	1: 6 000	WW C 8	32	42	48	4.4cm	8.0cm	1.8
Föhr	1: 7 500	WW A 7	170	32	14	5.7cm	8.0cm	1.4
Heumaden	1:10 000	WW C 8	33	13	6	8.1cm	12.0cm	1.5
Neckarsulm III	1: 3 600	WW PSK	9	18	485	1.7cm	4.4cm	2.6
	1: 1 800 ¹⁾	PSK	6	10	143	1.2cm	3.4cm	2.8
Altenfelden	1: 7 300	WW StK1	105	89	37	3.7cm	4.2cm	1.1

¹⁾RMK 60/23

2.2.3 In Tabelle 5 sind einige Ergebnisse kleinmaßstäbiger Blockausgleichungen zusammengestellt, die große Flächen umfassen. Dabei wird zunächst die bekannte Erfahrung bekräftigt, daß mit nichtsignalisierten Punkten die Werte von σ_0 deutlich größer sind als bei Katastervermessungen und Beträge von 20 bis 30 μm zu erreichen pflegen. Berücksichtigt man weiter, daß bei den Blöcken Bonnet Plume und Coed die Genauigkeit der terrestrischen Vergleichspunkte nur bei etwa 5 m bzw. 7 m liegen dürfte und das Bildmaterial des Blocks Coed aus einer 16 Jahre alten Befliegung stammt, sind die Ergebnisse in befriedigender Obereinstimmung mit der Theorie. Insbesondere ist die praktische Brauchbarkeit der Paßpunkt-Randbesetzung für topographische Kartierungen auch für Großblöcke bestätigt.

Tabelle 5 Lagegenauigkeit kleinmaßstäbiger Blöcke

Projekt	Bildmaßstab	n _{Mod.}	n _{PP}	n _{VglP}	σ_0	$\mu_{x,y}$	μ/σ_0	PP	
Bonnet Plume (Canada)	1: 52 000	WW	316	20	44	20 $\mu\text{m}=1.0\text{m}$	3.5m	3.5	Rand Ecken
			316	4	62	20 $\mu\text{m}=1.0\text{m}$	5.3m	5.3	
COED (Canada)	1: 60 000	WW	2127	29	168	22 $\mu\text{m}=1.3\text{m}$	10.8m	8.3	Rand Maschen 120 km
			2127	12	185	22 $\mu\text{m}=1.3\text{m}$	11.1m	8.6	
Venezuela	1:125 000	OWW	84	14 ¹⁾	5 ¹⁾	27 $\mu\text{m}=3.4\text{m}$	6.0m	1.8	Rand Rand
			84	8 ¹⁾		27 $\mu\text{m}=3.4\text{m}$	6.4m	1.9	

1) Punktgruppen

2.2.4 Am anderen Extrem ist das Genauigkeitsverhalten sehr großer Bildmaßstäbe von Interesse. Die Tab. 6 stellt die auf signalisierte Punkte bezogenen Ergebnisse der Versuche Neckarsulm und Böhmenkirch zusammen. Zwar mit dichtem Paßpunktfeld bestätigen sie, daß mit Luftaufnahmen der cm-Bereich erreicht werden kann. Gegenüber den für 1:4000 und kleiner geltenden Werten für σ_0 zwischen 5 und 10 μm im Bild steigt die mit großen Bildmaßstäben zu erwartende Zunahme dieser Werte bis 1:1000 nicht über den Faktor 2, so daß bezogen auf das Gelände noch stets ein Genauigkeitserfolg zu verzeichnen ist. Zum Fall Neckarsulm 1:1800 ist anzumerken, daß in dem Zahlenwert von μ ein Fehleranteil der terrestrischen Polaraufnahme (mit Redta) von etwa 2.5cm enthalten ist.

Tabelle 6 Lagegenauigkeit großmaßstäbiger Streifen und Blöcke

Projekt	Aufnahme/Messung	n			σ_0 cm	μ cm	μ/σ_0
		Mod.	PP	VglP			
Neckarsulm II	1:6000 RMK 15/23 PSK	3	23	418	3.4	4.9	1.4
	1:3600 RMK 15/23 PSK	9	30	424	1.8	4.1	2.3
	1:1800 RMK 60/23 PSK	6	13	133	1.3	3.4	2.6
	1:3600 RMK 15/23 Planimat	9	29	427	3.8	5.1	1.3
Böhmenkirch (Je 1 Streifen)	1:1500 RMK 30/23 PSK	5	13	171	1.8	1.3	0.7
	1:1500 RMK 15/23 PSK	5	11	117	1.3	1.3	1.0
	1:1000 RMK 30/23 PSK	9	12	78	1.8	1.3	0.7
	1:1000 RMK 15/23 PSK	8	11	89	1.5	1.4	0.9

2.2.5 Im Vergleich zu den bisher angeführten Beispielen bietet der Testblock Oberschwaben die Möglichkeit zu wesentlich umfassenderen, systematischen Untersuchungen. Tabelle 7 zeigt eine Zusammenstellung aus den bis jetzt vorliegenden Ergebnissen, die nach mehreren Gesichtspunkten interpretiert werden können:

In erster Linie ist auf die hervorragende Lagegenauigkeit der Blöcke mit dichtem Paßpunkttrand hinzuweisen, wobei sich die Theorie bestätigt, daß nur eine sehr geringe Abhängigkeit von der Blockgröße besteht (Gruppe a). Bei leicht aufgelockerter Paßpunktbesetzung der Blockränder (Gruppe b) fängt diese Abhängigkeit an, deutlicher hervorzutreten. Im Extremfall von nur 4 Lagepaßpunkten an den Blockecken ist die Lagegenauigkeit erwartungsgemäß sehr stark von der Blockgröße abhängig (Gruppe c).

Umgekehrt bestätigt sich bei gegebener Blockgröße die regelmäßige Genauigkeitsabnahme mit zunehmender Auflockerung der Paßpunktbesetzung der Blockränder (Gruppe d). Hierbei stimmen nach dem Kriterium μ/σ_0 die WW- und die OWW-Ergebnisse sehr gut überein, obwohl letztere nach den absoluten Werten von σ_0 und μ um 38 % bzw. 31 % ungünstiger liegen.

Auch wenn die Untersuchung noch nicht abgeschlossen ist, kann nach Tabelle 7 festgestellt werden, daß die Genauigkeitstheorie der Lageblockausgleichung mit unabhängigen Modellen in den wesentlichen Zügen so gut empirisch bestätigt ist, daß man sich für Projektplanungen verläßlich auf sie stützen kann, obwohl die bisherige Theorie nur zufällige Fehler berücksichtigt.

Tabelle 7 OEEPE Testblock Oberschwaben, Lagegenauigkeit mit PP-Randbesetzung

	Blockgröße (Modelle)	PP-Abstd. Δp	n_{PP}	σ_0		μ		μ/σ_0
				μm	cm	μm	cm	
WW 1:28 000 Block Frankfurt	a.) 8x25=200	2b= 5km	40	7.1	20	12.5	35	1.8
	8x16=128	2b	32	6.7	19	12.8	36	1.8
	6x12= 72	2b	24	7.2	20	10.8	30	1.5
	4x 8= 32	2b	16	6.9	19	9.9	28	1.5
	2x 4= 8	2b	8	6.6	19	10.0	28	1.5
	b.) 8x25=200	4b=10km	20	6.8	19	17.5	59	2.6
	6x12= 72	4b	12	6.8	19	14.7	41	2.2
	4x 8= 32	4b	8	6.6	18	12.3	34	1.9
	2x 4= 8	4b	4	6.4	18	12.0	34	1.9
	c.) 8x25=200	16b/25b	4	6.2	17	40.3	113	6.5
	8x16=128	16b=40km	4	6.4	18	31.5	88	4.9
	6x12= 72	12b=30km	4	6.4	18	31.5	88	4.9
	4x 8= 32	8b=20km	4	6.3	18	15.6	44	2.5
	2x 4= 8	4b=10km	4	6.4	18	12.0	34	1.9
	d.) 8x25=200	2b= 5km	40	7.1	20	12.5	35	1.8
	8x25=200	4b=10km	20	6.8	19	17.4	49	2.6
8x25=200	8b=20km	10	6.5	18	25.4	71	3.9	
8x25=200	16b/25b	4	6.2	17	40.3	113	6.5	
OWW 1:28 000 Block Den Haag	d.) 8x25=200	2b= 5km	40	9.8	27	16.7	47	1.7
	8x25=200	4b=10km	20	9.4	26	23.6	66	2.5
	8x25=200	8b=20km	10	9.0	25	33.4	94	3.7
	8x25=200	16b/25b	4	8.7	24	50	140	5.8

2.3 Höhengenaugigkeit mit unabhängigen Modellen

2.3.1 In Tabelle 8 wird die für flaches Gelände gültige theoretische Erwartung empirisch bestätigt, daß bei räumlichen Blockausgleichungen die Lage- und die Höhengenaugigkeit unabhängig voneinander sind. Daher bleiben auch die Regeln für die Anordnung von Lage- und von Höhenpaßpunkten jeweils unabhängig anwendbar. Die im Abschnitt 2.2 angeführten Ergebnisse von Lageblockausgleichungen gelten somit unmittelbar auch für die Lagegenauigkeit räumlicher Blockausgleichungen mit unabhängigen Modellen. Es genügt also, im folgenden nur noch die Höhen zu betrachten.

Tabelle 8 Unabhängigkeit von Lage- und Höhengenaugigkeit
Beispiel: OWW Block Den Haag, 1:28 000, 200 Modelle
(OEEPE Oberschwaben)

	μ_x	μ_y	μ_z	σ_{oL} (Lage)	σ_{oH} (Höhe)
Lage PP: 4 Eckpunkte } Höhen PP: 7 Ketten, $i=4$ }	99 cm 35 μm	173 cm 62 μm	46 cm 17 μm	24.4 cm 8.7 μm	25.5 cm 9.1 μm
Lage PP: dichter Rand, 2b) } Höhen PP: 7 Ketten, $i=4$ }	38 cm 13 μm	54 cm 19 μm	46 cm 16 μm	27.4 cm 9.8 μm	25.8 cm 9.2 μm
Lage PP: dichter Rand, 2b) } ¹⁾ Höhen PP: 14 Randpunkte }	38 cm 14 μm	54 cm 20 μm	110 cm 39 μm	27.4 cm 9.8 μm	25.5 cm 9.1 μm
Lage PP: 4 Eckpunkte } ¹⁾ Höhen PP: 14 Randpunkte }	99 cm 35 μm	172 cm 62 μm	117 cm 42 μm	24.4 cm 8.7 μm	25.2 cm 9.0 μm

¹⁾ schlechte Höhenpaßpunktbesetzung, System fast singulär.

2.3.2 Die Zusammenstellung der Tabelle 9 zeigt die Höhengenaugigkeiten von Blockausgleichungen aus der Praxis, einschließlich einiger Ergebnisse aus dem Testmaterial Oberschwaben und dem von Studenten bearbeiteten Versuchsblock Riedlingen.

Die Ergebnisse zeigen in den wesentlichen Genauigkeitsparametern eine größere Variationsbreite als bei den entsprechenden Maßstäben der Lageblockausgleichung. Offenbar reagieren die Höhen empfindlicher auf nicht signalisierte, natürliche Übertragungspunkte sowie auf etwaige systematische Bildfehler. Bei großen Bildmaßstäben wird die Grenze der Höhengenaugigkeit selbst bei signalisierten Punkten durch

die Vegetation und Geländerauhigkeit bei 5-10 cm gesetzt, was plausibel erscheint. Auch 60 % Querüberdeckung (Riedlingen) vermag diese Grenze nicht wesentlich zu drücken.

Was die Methode der Höhenblocktriangulation leisten kann, wenn äußere Umstände nicht den begrenzenden Faktor darstellen, zeigen die Ergebnisse der Blöcke Altenfelden und Oberschwaben: Für den mittleren Gewichtseinheitsfehler σ_{OH} der Höhenausgleichung¹⁾ werden Beträge von 10 μm im Bildmaßstab unterschritten. Und die absolute Höhengenaugigkeit für Paßpunktabstände von 4 Basislängen erreicht mit 15 μm im Bildmaßstab ($WW, \triangle 0.1\%$ von h) bzw. 17 μm (OWW, $\triangle 0.2\%$ von h) ausgezeichnete Werte.

Die Abhängigkeit der Höhengenaugigkeit von den Paßpunktabständen tritt in den Oberschwaben-Ergebnissen zwar deutlich hervor, ist jedoch geringer, d.h. günstiger als von der Theorie erwartet. Im übrigen kann als bestätigt gelten, daß sich Höhenblöcke hinsichtlich der Genauigkeit und der Paßpunktanordnungen ähnlich wie Streifen verhalten. Ein Vergleich mit Tabelle 3 zeigt jedoch, daß bei gleichen Paßpunktabständen die Höhengenaugigkeit im Block wesentlich günstiger ausfällt als bei Streifen (für OWW bei $i=12.5$ Faktor 1.9).

Zwar scheinen die empirischen Ergebnisse der auf der Annahme zufälliger Fehler beruhenden Theorie der Höhengenaugigkeit von Blöcken mit unabhängigen Modellen in den wesentlichen Zusammenhängen zu entsprechen, ob und wie weit von Übereinstimmung gesprochen werden kann, muß die Anwendung statistischer Tests erweisen.

¹⁾ Die Blockausgleichung mit PAT-M43 weist σ_0 -Werte für Lage und Höhe getrennt aus.

belle 9 Höhengenaugigkeit verschiedener Blöcke
(Ausgleichung mit unabhängigen Modellen)

ock	Höhen-PP- Version	n _{HPP} n _{Vgl.}		σ_{oH}		μ_z (cm)		μ/σ_o	
		nat.sign.		μm	cm	nat.P.sign.	P		
henzollern, 8000 , 50 Mod.,PSK türk. Punkte, sign.	4 Ketten,i=3	33	182	40	18.1	14.5	21.6	17.5	1.5(1.2)
	3 Ketten,i=5	26	180	49	18.1	14.5	22.0	19.7	1.5(1.4)
edlingen, 3000 , 41 Modelle, = 20%, PSK	Ketten,i=6	12		185	27	8.1	20.1		2.5
	Ketten,i=6	16		181	27	8.1	13.6		1.7
	+4Randpunkte Ketten,i=4	22		175	28	8.3	10.8		1.3
	+6Randpunkte Ketten,i=2.5	24		173	27	8.2	10.1		1.2
edlingen 3000 , 68 Modelle, = 60%, PSK	Ketten,i=4	28		187	26	7.7	9.7		1.3
	Ketten,i=4	34		181	26	7.7	8.5		1.1
	+6Randpunkte Maschen,i=2	21		150	25	7.5	7.1		0.9
tenfelden 7300, , 105 Mod., k 1	dichter Rand	88		37	9.5	6.9	7.2		1.0
en 1:26 000, , 55 Mod.,A7	Rand	16	67	-	15.5	40	110	-	2.8
erschwaben 28 000 (Frankfurt) 10 Modelle,PSK	7 Ketten,i=4	63		~500	8.4	23.5	42.2		1.8
erschwaben 28 000 W (Den Haag) 10 Modelle,PSK	7 Ketten,i=4	63		~500	9.1	25.5	46		1.8
	4 Ketten,i=8	36		~500	9.1	25.5	60		2.4
	3 Ketten,i=12.5	27		~500	9.1	25.5	70		2.7

2.4 Bündelblockausgleichung

2.4.1 Als strengste Methode der photogrammetrischen Punktbestimmung gilt seit langem die analytische oder Bündelmethode. Sie arbeitet direkt mit den Bildkoordinaten als Beobachtungen. Im Gegensatz dazu ist die Methode der unabhängigen Modelle durch die als getrennten Schritt berechnete relative Orientierung ein 2-Stufen-Verfahren und damit ein Näherungsverfahren. Das Genauigkeitsverhältnis beider Methoden ist noch weitgehend ungeklärt. Die auf zufälligen Fehlern beruhende Theorie schreibt der Bündelmethode eine Genauigkeitssteigerung gegenüber der Methode der unabhängigen Modelle bei 20% Querüberdeckung und unter sonst gleichen Umständen um den Faktor 1.6 für die Lage und je nach Paßpunktdichte für die Höhen um einen Faktor zwischen 1.2 und 1.9 zu.

2.4.2 Die empirische Überprüfung dieser Theorie anhand des Oberschwaben-Materials ist zur Zeit in Bearbeitung. Schon die ersten Ergebnisse deuten aber, im Ausmaß überraschend, an, daß die Bündelmethode die hohen theoretischen Genauigkeitserwartungen nicht zu erfüllen scheint und sogar gegenüber den unabhängigen Modellen abfällt. Diese Ergebnisse bedürfen noch der Bestätigung und sollen im Zusammenhang an anderer Stelle veröffentlicht werden.

2.5 Systematische Fehler

2.5.1 Das im Vergleich zur theoretischen Erwartung verhältnismäßig ungünstige Abschneiden der Bündelblockausgleichung ist zwar im Ausmaß überraschend, in der Sache jedoch nicht ganz unerwartet. Unabhängig davon, ob die weiteren Untersuchungen den Grad der Nichtübereinstimmung mit der Theorie mildern werden, ist die Erklärung für die Diskrepanz in der Existenz systematischer Bildfehler zu suchen, die in der bisherigen Genauigkeitstheorie nicht

berücksichtigt worden sind. Offenbar bestätigt sich das im Zusammenhang mit den Freiheitsgraden der Modell- bzw. Bildtransformationen plausible, in [4] erstmals ausgesprochene theoretische Ergebnis, daß die Bündelmethode anfälliger gegen systematische Fehler ist als die unabhängigen Modelle.

2.5.2 Für das Vorhandensein beträchtlicher systematischer Fehler im Bildmaterial des Versuchs Oberschwaben gibt es auch aus den Blockausgleichungen mit unabhängigen Modellen deutliche Hinweise:

- σ_0 ist nicht konstant, sondern von der Paßpunktdichte abhängig
- Das Verhältnis μ/σ_0 unterscheidet sich teilweise beträchtlich von der theoretischen Erwartung
- Ein Vektordiagramm der Fehler der Vergleichspunkte nach der Blockausgleichung zeigt deutlich regionale systematische Tendenzen. (Auf eine Abbildung muß hier aus Platzgründen verzichtet werden.)

2.5.3 Es ist offensichtlich, daß zur weiteren Genauigkeitssteigerung der photogrammetrischen Punktbestimmung Maßnahmen gegen systematische Fehler getroffen werden müssen und können. Abgesehen von verbesserter Kalibrierung, die hier nicht zur Diskussion steht, gibt es zwei erfolgversprechende Möglichkeiten:

- Nachträgliche Verbesserung durch die Interpolation nach kleinsten Quadraten, im Anschluß an die normale Blockausgleichung mit Bündeln oder Modellen
- Verfeinerter mathematischer Ansatz für die Blockausgleichung durch Einbeziehung zusätzlicher Parameter für die Korrektur systematischer Fehler der Bilder oder der unabhängigen Modelle.

Für die Wirksamkeit der Interpolation nach der Blockausgleichung kann folgendes Beispiel angeführt werden:

Der OEEPE Block Frankfurt (WW, 200 Modelle) ergab bei dichtem Paßpunktrand eine Genauigkeit der Lagekoordinaten von $12.5 \mu\text{m} = 35 \text{ cm}$. Die nachträgliche Interpolation, unter Benützung derselben Rand-Paßpunkte steigerte die Lagegenauigkeit des Blocks auf $8.8 \mu\text{m} = 25 \text{ cm}$ oder um 30%. Ähnliche Ergebnisse sind in Tabelle 10 ausgewiesen.

Tabelle 10 Beispiele für die Korrektur systematischer Fehler nach [3]
(WW-Teilblock Oberschwaben, 1:28 000,
4 Streifen, 100 Mod.)

Fall	Bündelausgleichung	σ_0 (μm)	μ_x (μm)	μ_y (μm)	μ_z (μm)
A 18 Lage PP am Rand 40 Höhen PP 6 Ketten	ohne zus.Parameter	5.0	18.4	18.5	19.6
	mit zus.Parametern	3.5	5.9	5.4	13.6
	ohne zus.Parameter + Interpolation	(5.0)	12.8	13.2	19.6
B 57 Lage PP gestreut 81 Höhen PP 12 Ketten	ohne zus.Parameter	5.8	10.7	9.9	15.7
	mit zus.Parametern	3.8	5.5	5.0	12.5
	ohne zus.Parameter + Interpolation	(5.8)	7.1	6.6	15.3

2.5.4 In Tabelle 10 ist die Wirkung zusätzlicher Parameter, die zur Erfassung systematischer Bildfehler in die Bündelblockausgleichung eingeführt werden, an 2 Beispielen aufgezeigt. Sie sind dem presented paper [3] entnommen und beziehen sich auf das Bündelprogramm BAP von H. BAUER, Hannover. Als Testmaterial dienten 4 WW Streifen des Blocks Oberschwaben.

Die Wirkung der zusätzlichen Parameter ist in diesen Beispielen vielleicht größer, als im Durchschnitt erwartet werden kann, da die 4 Streifen aus einem Bildflug stammen und daher in hohem Maße gemeinsame systematische Fehler aufweisen. Aber auch bei geringerer Genauigkeitssteigerung ist die Methode äußerst erfolgversprechend.

2.5.5 Im Rückblick auf die hier zusammengestellten Ergebnisse kontrollierter Streifen- und Blockausgleichungen, die inhaltlich als typisch für die Gesamtsituation der Aerotriangulation gelten können, kann festgestellt werden, daß die photogrammetrische Punktbestimmung insbesondere durch Blocktriangulation dabei ist, sich auf einem Genauigkeitsniveau zu konsolidieren, das vor wenigen Jahren für die Praxis noch unerreichbar schien.

Gleichzeitig wird sichtbar, daß die Methoden an die Schwelle gestoßen sind, wo die systematischen Bildfehler wirksam werden. Damit ist klar, daß sich die weitere Entwicklung bemühen muß, die systematischen Fehler in den Griff zu bekommen. Die methodischen Hilfsmittel dafür stehen bereit. Die vorliegenden Indizien lassen keinen Zweifel daran, daß ihre Anwendung noch einmal eine sehr beträchtliche Genauigkeitssteigerung bringen wird. Reguläre Genauigkeitsleistungen der Blocktriangulation von $6 \mu\text{m}$ in den Lagekoordinaten und $10 \mu\text{m}$ in der Höhe können schon als realistisches Entwicklungsziel gelten.

Diese hervorragende und immer noch zu steigernde Genauigkeit der Blocktriangulation sichert der Photogrammetrie einen selbständigen Platz unter den Methoden der Punktbestimmung und wird ihr sicherlich neue Anwendungsgebiete im geodätischen Bereich erschließen.

Literatur

- [1] Ackermann, F.: Gesetzmäßigkeiten der absoluten Lagegenauigkeit von Blöcken, BuL 36, 3-15, 1968.
- [2] Ebner, H.: Theoretical Accuracy Models for Block Triangulation, BuL, 40, 214-221, 1972.
- [3] Bauer, H. und Müller, J.: Height Accuracy of Blocks and Bundle Adjustment with Additional Parameters, Presented Paper, IGP-Kongress, Ottawa 1972.
- [4] Kubik, K., Eckhardt, D., Clerici, E., Bosman, E.R.: Systematic Image Errors in Aerial Triangulation, Invited Paper, IGP-Kongress, Ottawa 1972.