

## Effiziente automatische digitale Aerotriangulation in der Praxis

Thomas Kersten, Silvio Häring  
Swissphoto Vermessung AG  
Dorfstr. 53, CH - 8105 Regensdorf-Watt, Schweiz  
Tel. +41 1 871 22 22, Fax +41 1 871 22 00  
e-mail: [thomas.kersten, silvio.haering]@swissphoto.ch

### Zusammenfassung

Aerotriangulation ist einer der Prozesse in der digitalen Photogrammetrie mit hohem Potential zur Automation und Effizienzsteigerung. In diesem Artikel stellen wir einen in der Praxis durch eigene Softwareentwicklungen angepassten und modifizierten Ansatz für die automatische digitale Aerotriangulation vor, der auf der Grundlage des automatisierten Triangulationssystem (HATS) von Leica/Helava beruht. Die vorgestellte Methode wird bei der Swissphoto Vermessung AG eingesetzt, um Luftbildblöcke mit einer Grösse von 150 bis zu 350 Bildern (Bildmassstab ca. 1: 27'000) zu triangulieren. Dabei wird eine Triangulationsrate von bis zu acht Minuten pro Photo erreicht. Als Beispiele werden die Ergebnisse von vier Teilblöcken aus der Befliegung der gesamten Schweiz, die typischen Geländecharakteristiken vom Mittelland bis zu den Alpen entsprechen, vorgestellt.

### Summary

Aerotriangulation is one of the processes in digital photogrammetry with high potential for automation and increased efficiency. In this article we introduce an approach to automatic digital aerotriangulation, which is based on the Helava automated triangulation system (HATS) from Leica/Helava which we have adapted using our own software developments. This approach is used at Swissphoto Vermessung AG to perform triangulation of blocks with 150 to 350 images (photo scale approx. 1: 27,000). A triangulation rate of up to eight minutes per photo can be achieved. As examples the results of four sub-blocks (which represent typical Swiss terrain characteristics from midland to alpine regions) from flights covering the entire area of Switzerland are introduced.

### 1. Einleitung

Der Übergang von der analytischen zur digitalen Photogrammetrie hat schon in vielen privaten photogrammetrischen Büros stattgefunden. Gründe dafür sind u.a. auch, dass die digitale Photogrammetrie ein hohes Potential bietet, Arbeitsabläufe in einer photogrammetrischen Datenproduktion zu automatisieren und damit das Preis/Leistungsverhältnis für Daten entscheidend zu verbessern. Deshalb ist heute der Schlüssel einer effizienten und erfolgreichen photogrammetrischen Produktion der Grad der Automation in den Arbeitsabläufen bei gleichzeitig integrierten Qualitätskontrollen.

Verschiedene Techniken aus den Bereichen der Bildverarbeitung, der Computer Vision und der Photogrammetrie werden heute erfolgreich eingesetzt, um Messungen und ganze Arbeitsabläufe für Anwendungen mit digitalen Luftbildern wie die innere Orientierung (Schickler, 1995; Lue, 1995; Kersten und Häring, 1997), die relative Orientierung (Schenk et al., 1990), die Punktübertragung in der photogrammetrischen Blocktriangulation (Tsingas, 1992), und die Generierung von digitalen Geländemodellen (Krzystek, 1991) zu automatisieren.

Dennoch bleibt die vollständige Automation der digitalen Aerotriangulation (AT) seit Anfang der neunziger Jahre eine grosse Herausforderung für die Photogrammetrie, da sie einer der komplexesten Prozesse in der digitalen

Photogrammetrie darstellt. Die digitale AT umfasst folgende Arbeitsschritte: Bildimport und Aufbau der Bildpyramiden, innere Orientierung, Punktübertragung, Messungen der Passpunkte, Bündelblockausgleichung und Qualitätskontrollen.

Berichte über die Automation der digitalen AT wurden von verschiedenen Seiten der Hochschulen wie z. B. der Ohio State University (Agouris und Schenk, 1996; Toth und Krupnik, 1996) und der Universität Stuttgart (Tsingas, 1992; Ackermann und Tsingas, 1994), von Systemherstellern wie z. B. Leica/Helava (DeVenecia et al., 1996) und Zeiss (Braun et al., 1996), und von Software-Anbietern wie Inpho aus Stuttgart (Krzystek et al., 1996) veröffentlicht. Zur Zeit sind die drei wichtigsten und kommerziell meist verbreitetsten Softwarepakete für automatische digitale Aerotriangulation das Helava Automated Triangulation System HATS (Leica/Helava), PHODIS-AT (Zeiss) und MATCH-AT (Inpho). Obwohl sehr viele digitale Systeme heute schon weltweit im Einsatz sind, haben nur wenige praktische Anwender (Kersten und Stallmann, 1995; Beckschäfer, 1996; Kersten und O'Sullivan, 1996b) über ihre Erfahrungen in der digitalen Aerotriangulation mit einem kommerziellen photogrammetrischen System berichtet.

Um digitale Orthophotos für die ganze Schweiz zu produzieren, hat die Swissphoto Vermessung AG, die frühere swissair Photo+Vermessungen AG, im Jahre 1995

digitale photogrammetrische Systeme von Leica/Helava gekauft. Für das Projekt *swissphoto* muss ein Triangulationsblock von mehr als 7000 Farb- bzw. Infrarotphotos in den nächsten Jahren verarbeitet werden, damit die Nachfrage nach digitalen Orthophotos als aktuelle Grundlage für viele GIS-Anwendungen befriedigt werden kann. Die grosse zu verarbeitende Datenmenge erfordert einen hohen Grad an Automation in allen Arbeitsabläufen der Datenproduktion wie z.B. beim Scannen, bei der Aerotriangulation, bei der Generierung von digitalen Geländemodellen (DGM) und Orthophotos, beim Mosaikung und beim Datenmanagement, um eine hohe Effizienz, d.h. kurze Produktionszeiten und niedrige Kosten, zu erreichen.

In diesem Artikel präsentieren wir eine in der Praxis entwickelte und modifizierte Methode für die digitale AT. Die Anpassung und Modifikation bestand hauptsächlich in einer Implementierung zusätzlicher Software- und Interface-Module in das Helava Automated Triangulation System HATS, die durch die Swissphoto Vermessung AG entwickelt wurden, mit denen der Automationsgrad in der digitalen photogrammetrischen Produktionsumgebung entscheidend erhöht werden konnte. Ausserdem werden die Ergebnisse der digitalen Triangulation vorgestellt und es wird kurz gezeigt, welchen Einfluss die Geländecharakteristik auf den Ablauf und die Ergebnisse der Triangulation hinsichtlich Produktivität haben.

## 2. Triangulationsblöcke und eingesetzte photogrammetrische Systeme

### 2.1. Triangulationsblock *swissphoto*

Die vier im folgenden vorgestellten Triangulationsblöcke stellen ungefähr 10% des Triangulationsblockes *swissphoto* dar. Für das Projekt *swissphoto* (Kersten und O'Sullivan, 1996a) wurde die ganze Schweiz in drei Phasen befliegen, wobei für die Befliegung zwei Kameras mit jeweils einem Farb- und Infrarotfilm simultan eingesetzt wurden. In der Phase 1 wurden die Wirtschaftszentren und der ganze nördliche Teil des Landes zwischen Juni und August 1995 befliegen, während in Phase 2 die Alpen und alle wichtigen Täler im südlichen Teil der Schweiz von August bis Oktober 1995 befliegen wurden. In der Phase 3 wurden im Juli und September 1996 einige kleinere Gebiete der Schweiz wegen einiger Wolken und Dunst während des Bildfluges 1995 wiederholt befliegen. Die Flugstreifen waren parallel von Ost nach West und umgekehrt mit einem Azimut von ~20 bzw. 200 Grad angeordnet (siehe Abbildung 1). Dagegen wurden die Täler in der jeweiligen Talrichtung befliegen.

Der Bildmassstab variiert für den Nordteil der Schweiz ungefähr zwischen 1: 24'000 und 1: 28'000, für den Alpenbereich zwischen 1: 34'000 und 1: 45'000. Für die Alpentäler beträgt der Bildmassstab ungefähr 1: 24'000. Während der Bildflüge wurden die Kamerapositionen mit Differential-GPS durch einen Leica GPS Receiver im Flugzeug (Learjet) und durch drei Referenzstationen am Boden aufgenommen. Für die Befliegung waren 104 gut verteilte Punkte des Schweizer GPS Landesvermessungsnetzes LV'95 als Passpunkte signalisiert.

Um wegen der grossen Datenmengen und der verfügbaren Hardware die Triangulation so effizient wie möglich

	Block Aargau	Block Basel	Block Luzern	Block Brienz
Fläche:	1262 km <sup>2</sup>	1203 km <sup>2</sup>	1735 km <sup>2</sup>	1414 km <sup>2</sup>
Geländehöhe:	350 - 900 m	250 - 1300 m	380 - 1800 m	430 - 2650 m
Flughöhe ü. d. M.	~ 4800 m	~ 4500 m	~ 4800 m	~ 5000/7800 m
Kamera:	Leica RC30, 15/4 UAGA-F			
Bildmassstab:	~1: 28'200	~1: 26'700	~1: 26'700	~1:28'000/1: 40'000
Überdeckung (L/Q):	70%/30%	70%/30%	70-90%/10-30%	70-90%/10-30%
Flugstreifen:	6	7	7	12
Bilder:	152	150	216	270
Flugdatum (pro Streifen-Nr.):	30.6.95, (14-15) 19.7.95, (10) 20.7.95, (11-13)	13.7.95, (5) 19.7.95, (7-8) 1.8.95, (2-4) 4.8.95, (6)	30.6.95, (15) 30.6.95, (17-19) 10.7.95, (16) 19.7.95, (20-21)	8.7.95, (22) 19.7.95, (21) 3.8.95, (23, 26, 27) 4.8.95, (24, 25) 8.10.95, (112) 14.10.95, (30) 22.7.96, (222-225)
Film/digitale Bilder:	Farbdiapositive/Grauwert			

Tabelle 1: Flug- und Blockdaten der vier *swissphoto* Triangulationsblöcke

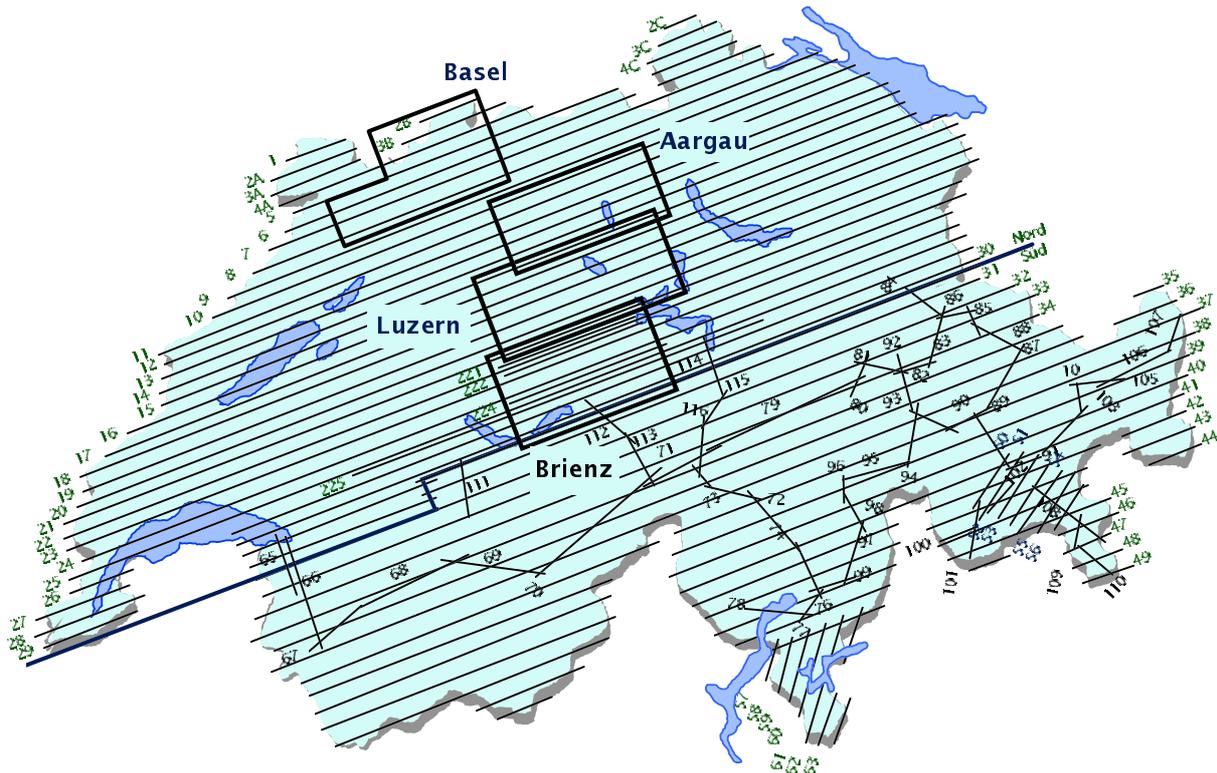


Abbildung 1: *swissphoto* Triangulationsblock Schweiz mit den Subblöcken Basel, Aargau, Luzern und Brienz

zu gestalten, wurde der *swissphoto* Triangulationsblock in 43 Subblöcke mit einer Gesamtgrösse von 150 bis 350 Bildern pro Block aufgeteilt. Die vier ausgewählten Subblöcke repräsentieren unterschiedliche Geländecharakteristika und Blockgrössen. Block Aargau besteht aus 152 Bildern (6 Flugstreifen, durchschnittlicher Bildmassstab 1: 28'200) und repräsentiert landwirtschaftliche und hügelige Geländeeigenschaften bei einer variierenden Geländehöhe zwischen 350-900 m über dem Meeresspiegel (ü. d. M.). Block Basel hat fast die gleiche Blockgrösse (150 Bilder, 7 Streifen, Bildmassstab 1: 26'700) wie Block Aargau, aber er stellt eher ein Gebiet mit städtischen Bereichen und hügelige bis bergige Geländeformen mit einer Geländehöhe von 250 m bis 1300 m dar. Im Block Luzern (216 Bilder, 7 Streifen, Bildmassstab 1: 26'700) zeigt sich im Terrain der Übergang vom hügeligen zum bergigen Gebiet (Geländehöhe von 380 m bis 1800 m), während der Block Brienz (270 Bilder) den Übergang vom bergigen zum alpinen Gelände mit Höhenunterschieden im Block zwischen 450 m und 2600 m repräsentiert. Der letzte Block enthält quer zu den anderen Fluglinien einen zusätzlichen Flugstreifen vom Talflug und innerhalb des Blockes variieren die Bildmassstäbe zwischen Streifen 27 (1: 28'000) und Streifen 30 (1: 40'000) stark. Die Flug- und Blockdaten der hier vorgestellten *swissphoto* Blöcke sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Wie in der Tabelle auch aufgeführt wird, variieren die Aufnahmezeiten der einzelnen Streifen zwischen einigen Tagen und Monaten bis zu einem

Jahr, was natürlich u.a. grosse Veränderungen in der Vegetation von Streifen zu Streifen zur Folge hat.

## 2.2. Digitale Bilddaten

Alle Bilder wurden mit der Leica/Helava Digital Scanning Workstation DSW200 im RGB-Modus gescannt. Die Scanzeit lag bei 30 Minuten pro Photo mit einer SUN Sparc 20/71. Für die Triangulation wurden die digitalisierten Farbbilder in Grauwertbilddaten konvertiert, um Speicherplatz zu sparen. Die Auflösung der Bilder betrug 25  $\mu\text{m}$  (1016 dpi), was einer Auflösung von circa 0.7 m auf dem Boden und einer Datenmenge von 80 MByte pro Bild entspricht.

## 2.3. Hardware

Die Aerotriangulationen wurden auf einer Leica/Helava Digital Photogrammetric Workstation DPW670 (Monostation) durchgeführt. Als Computer diente eine SUN Ultra 2 (167 MHz). Für die Triangulationsdaten standen insgesamt 36 GByte (4 x 9 GByte) Speicherplatz zur Verfügung.

## 2.4. Software

Für die Triangulation der vier *swissphoto* Blöcke wurde der Software-Release 3.1.2 von SOCET SET (Softcopy Exploitation Tools) eingesetzt. HATS ist ein Modul von SOCET SET, mit dem die Blocktriangulation von sich überlappenden Bildern durchgeführt wird. Der ganze Prozess der Auswahl und Messung von Verknüpfungspunkten läuft vollautomatisch ab. Der Operateur greift

im Anschluss an die automatische Punktübertragung ein, um die vom System in allen möglichen Bildkombinationen angezeigten nicht akzeptierten Punkte halbautomatisch in geeigneten Bildpositionen zu messen, falls es erforderlich ist.

### 3. Digitale Aerotriangulation

In unserer Produktionsumgebung ist die digitale AT in folgende Arbeitsschritte aufgeteilt: Datenvorbereitung (Photos und Passpunkte), automatischer Datenimport und Aufbau der Bildpyramiden, automatische innere Orientierung, automatische und halbautomatische AT Messungen, GPS unterstützte Bündelblockausgleichung und die abschliessende Qualitätskontrolle. Um den Einsatz der AT Arbeitsprozesse für den Operateur zu erleichtern, wurde zusätzliche Software für Batch-Prozesse und einfach zu verwendende graphischen Benutzeroberflächen (GUIs) von der Swissphoto Vermessung AG entwickelt.

#### 3.1. Datenvorbereitung

Die Datenvorbereitung beinhaltet die Konfiguration des Luftbildverbandes (Zusammenstellen und Laden der Bilddaten vom Band, falls sie nicht auf einer Disk schon verfügbar sind) und das Zusammenstellen der Passpunkte (Koordinaten, Übersichtsplot, verfügbare Punktzeichnungen). Um genügend Passpunkte in den *swissphoto* Blöcken zu haben, werden sechs verschiedene Arten von Passpunkten verwendet:

- signalisierte Punkte des Schweizer GPS Landesvermessungsnetzes LV'95
- Punkte aus zusätzlichen GPS Kampagnen
- 3-D Passpunkte aus früheren photogrammetrischen Projekten im Hause (gemessen am Leica SD2000)
- Lagepasspunkte aus Katasterplänen 1:500 - 1:2'000
- Passpunkte aus Übersichtsplänen 1:5'000/ 1:10'000
- Höhenpasspunkte aus Landeskarten 1: 25'000

Neben den signalisierten Punkten wurden für diese vier Blöcke hauptsächlich zusätzliche GPS-Punkte und Höhenpasspunkte aus den Landeskarten verwendet.

#### 3.2. Automatischer Datenimport

Bevor die eigentlichen Messungen durchgeführt werden können, müssen die digitalen Bilddaten in die photogrammetrische Station importiert werden und anschliessend die Bildpyramiden aufgebaut werden. Dieser Arbeitsschritt läuft vollautomatisch als Batch-Prozess ab und braucht zwischen 30 und 60 Sekunden pro Bild auf der SUN Ultra 2. Dabei werden die GPS Stationskoordinaten von jedem Bild auch automatisch importiert, so dass die Bildüberlappungen im Block näherungsweise vorliegen. Zusätzlich wird im Anschluss das erforderliche Triangulationsfile für den ganzen Block vollautomatisch erzeugt. Gegenüber der kommerziell erhältlichen

HATS Version ist schon bei der Vorbereitung der Operateur-Einsatz auf ein absolutes Minimum reduziert.

#### 3.3. Automatische innere Orientierung

Vor dem Start von HATS muss die innere Orientierung für jedes Bild bestimmt werden. In der offiziellen HATS Version werden die ersten beiden Rahmenmarken halbautomatisch gemessen, während die restlichen Rahmenmarken dann vom System automatisch gemessen werden. Mit dieser Methode benötigt der Operateur für die Messungen in einem Bild circa 60 Sekunden. Um auch hier die Operateur-Zeit deutlich zu reduzieren, wurde von Swissphoto Vermessung AG eine völlig operationelle automatische innere Orientierung (IO) für digitale Luftbilder entwickelt, die in der SO CET Set Software integriert wurde und ohne Operateur-Eingriff als Batch-Prozess abläuft. Die IO einer unbegrenzten Anzahl von Bildern (nur abhängig vom verfügbaren Speicherplatz) bezogen auf einen vorher festgelegten Kameratyp kann dabei zusammen mit der Qualitätskontrolle in einem Schritt durchgeführt werden. Die Geschwindigkeit der IO-Bestimmung beträgt circa 5 Sekunden pro s/w Bild. Der verwendete Algorithmus ist in Kersten und Häring (1997) beschrieben.

#### 3.4. Automatische AT Messungen

Der Arbeitsschritt der AT Messungen wie er zur Zeit in HATS verwendet wird, ist in vier Teilschritte aufgeteilt: Automatische Punkt-Messungen (APM), Interaktive Punkt-Messungen (IPM), simultane Ausgleichung (inkl. Wiederholungsmessungen) und grobe Fehlersuche.

Vor dem Start von APM muss eine Konfiguration für die Verknüpfungspunktverteilung ausgewählt werden, um sicher zustellen, dass eine gute Punktverteilung in jedem Bild zur Verknüpfung des gesamten Blockes gewährleistet ist. Für die *swissphoto* Blöcke wird eine sehr dichte Verknüpfungspunktanordnung von 98 Punkten pro Bild festgelegt. APM läuft mit dieser Vorgabe anschliessend über den ganzen Block als Batch-Prozess über Nacht oder über das Wochenende. Auf der SUN Ultra 2 benötigt APM ungefähr zwischen 10-30 Minuten pro Bild. Nach Beendigung der APM wurde eine Rate zwischen 64-94% erfolgreich gemessenen Punkten erreicht (Block Aargau 94%, Basel 89%, Luzern 80%, Brienz 64%), die von der Geländecharakteristik, von der Variation der Bildmassstäbe in jedem Block und von den unterschiedlichen Flugdaten für jeden Streifen abhängig ist.

Passpunkte und zusätzliche Punkte werden halbautomatisch mit dem Modul IPM gemessen. Falls das Datum durch Messung von drei Passpunkten oder durch die GPS-Stationskoordinaten festgelegt ist, führt das System den Operateur automatisch zur genäherten Position aller aufgerufenen Passpunkte hin.

Nach Abschluss aller Messungen werden alle Beobachtungen mit dem HATS Modul „Simultaneous Solve“ ausgeglichen. Anstatt Punkte mit groben Fehler wieder

Block	Bilder	Passpunkte H/V	Signalis. Passpunkte	$\sigma_0$ [ $\mu\text{m}$ ]	RMS X [m]	RMS Y [m]	RMS Z [m]	RMS $X_0$ [m]	RMS $Y_0$ [m]	RMS $Z_0$ [m]
Aargau	152	12/107	5	12.2	0.45	0.44	0.79	0.48	0.40	0.18
Basel	150	80/159	5	11.5	0.59	0.62	0.78	0.37	0.31	0.11
Luzern	216	22/144	5	11.8	0.55	0.64	1.01	0.59	0.57	0.13
Brienz	270	13/128	3	11.7	0.26	0.31	1.04	0.47	0.34	0.13

Tabelle 2: Resultate der GPS unterstützten Bündelblockausgleichungen

zu messen, werden alle Beobachtungen mit Residuen über einen definierten Schwellwert automatisch eliminiert. Die simultane Ausgleichung und die grobe Fehlersuche werden iterativ solange durchgeführt, bis ein bestimmter Genauigkeitswert erreicht wird. Für die Elimination grober Fehler wird nur ein bestimmtes Schwellwertkriterium verwendet, wobei eine hohe Redundanz im System vorausgesetzt werden kann. Mit dieser Methode konnte es passieren, dass wegen der schlechten Qualität der automatisch übertragenen Punkte eventuell zu viele Punkte eliminiert wurden, speziell zwischen den Streifen. Doch Gegenden mit schwacher Blockverknüpfung wurden in der späteren Qualitätskontrolle entdeckt, so dass diese Lücken (Bereiche ohne Punkte) durch halbautomatische Punktmessungen gezielt gefüllt werden konnten.

### 3.5. GPS unterstützte Bündelblockausgleichung

Alle Beobachtungen (Bild-, Passpunkt- und GPS-Stationskoordinaten) wurden in einer GPS unterstützten Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung für jeden Block separat mit dem Bündelblockausgleichungsprogramm BLUH der Universität Hannover durchgeführt. Nach jeder Ausgleichung wurde auch hier eine sogenannte automatische grobe Fehlersuche eingesetzt, um auch hier alle Beobachtungen über einen bestimmten Schwellwert zu eliminieren. Die endgültige Blockausgleichung wurde durchgeführt, nachdem alle Residuen über 30 Mikron eliminiert waren. Die Rechenzeit betrug z. B. für den Block Brienz ca. 20 Minuten auf einem Compaq PC (Pentium 90 MHz).

Die Ergebnisse der Ausgleichungen sind in der Tabelle 2 zusammengefasst. Für alle vier Blöcke sind die Standardabweichungen (root mean square RMS-Werte) der Passpunktkoordinaten besser als 0.6 m in X und Y und besser als 1 m in Z, während die RMS-Werte der Stationskoordinaten auch besser als 0.6 m in X und Y und in Z sogar besser als 0.2 m waren. Das  $\sigma_0$  aus der Ausgleichung variierte zwischen 11.5 und 12.2  $\mu\text{m}$ , was einer Genauigkeit von etwas besser als der halben Pixelgrösse entspricht. Die Genauigkeit der digitalen AT mit automatischer Punktübertragung hängt von dem eingesetzten Matching-Algorithmus und von der Pixelgrösse der digitalisierten Bilder ab. Mit dem sogenannten Feature

Based Matching kann eine Genauigkeit von 0.3-0.4 Pixeln für die Punktübertragung erreicht werden, während man mit dem Least Squares Matching eine Genauigkeit von 0.1-0.2 Pixeln erzielen kann. Etwas detaillierte Genauigkeitsüberlegungen für die digitale AT sind in Ackermann (1996) zusammengefasst. Theoretisch sollte es möglich sein, eine Genauigkeit von mindestens 1/3 der Pixelgrösse mit dem flächenbasierten Matching-Algorithmus in SOCET SET zu erreichen, was einem  $\sigma_0$  von 8.3  $\mu\text{m}$  und einer Lagegenauigkeit von 0.22 m (Bildmassstab 1: 27'000) entsprechen würde. Die Gründe für die schlechteren Resultate, die mit den vier *swiss-photo* Triangulationsblöcken erreicht wurden, liegen in der schlechten Qualität der Passpunkte (besonders die Höhenpasspunkte der Landeskoordinaten) und die grosse Anzahl von Bildmessungen (viele Verknüpfungspunkte mit schlechter Qualität) in jedem Block, wobei auch noch Residuen von grösser als einem Pixel (25  $\mu\text{m}$ ) enthalten waren. Neben Messfehlern könnten solche grossen Residuen auch durch systematische und zufällige Fehler des Scanners verursacht worden sein (Baltsavias et al., 1997). Die grosse Anzahl der gemessenen Punkten garantiert allerdings eine grössere Zuverlässigkeit in den ausgeglichenen Stationskoordinaten. Die hier erzielten Ergebnisse entsprechen Resultaten, die mit den ersten beiden Testblöcken (St. Gallen und Zug) erreicht wurden, bei denen aber eine dünnere Verknüpfungspunktanordnung für das APM gewählt wurde und viele gut definierte Verknüpfungspunkte durch den Operateur gemessen wurden (Kersten and O'Sullivan, 1996b).

### 3.6. Qualitätskontrolle

Nach der endgültigen Bündelblockausgleichung wurden die Orientierungsdaten in jedem Bild-Supportfile und die Files mit den gemessenen Bildpunkten an der DPW670 mit Hilfe einer Schnittstelle zwischen BLUH und SOCET SET aktualisiert. Die geometrische Qualitätskontrolle ist für den Block durch die Resultate der Blockausgleichung ( $\sigma_0$ , RMS, etc.) gegeben. Darüberhinaus ist es aber aufgrund der hohen Automation in den Bildmessungen und bei der Eliminierung grober Fehler absolut notwendig, die Bildverknüpfungen in und quer zur Streifenrichtung zu überprüfen, um eine zuverlässige

Punktverteilung und Verknüpfung des Triangulationsblockes zu gewährleisten. Speziell dafür wurde von der Swissphoto Vermessung AG ein zusätzliches Softwaremodul entwickelt, das eine schnelle und einfach zu handhabende Visualisierung von Punktverknüpfungen innerhalb des Blockes erlaubt (Abb. 2). Mit diesem Werkzeug ist der Operateur in der Lage, schnell durch den Block Bild für Bild, Streifen für Streifen zu gehen, um die Anzahl der Strahlen pro Punkt, die Punktverteilung innerhalb jeden Bildes und durch Anklicken der Photonummer, welche neben dem dargestellten Bildrahmen erscheinen (siehe dazu die Bildnummern wie z. B. 16\_135 in der Abb. 2), die jeweiligen Bildverknüpfungen als farblich hervorgehobene Punktnummern (Nummer stellt bei Verknüpfungspunkten die Anzahl der Strahlen dar) zu überprüfen. Dadurch kann der Operateur die Verknüpfungen innerhalb des Blockes sauber analysieren und gegebenenfalls zusätzliche Punkte in schwach verknüpften Gegenden messen.

#### 4. Produktionszeiten

Die verwendete Zeit für die digitale Aerotriangulation von jedem hier vorgestellten *swissphoto* Block ist in Tabelle 3 zusammengefasst. In dieser Tabelle sind nur die Zeiten des Operateurs berücksichtigt, da die Rechenzeit des Computers mit den vielen Prozessen im Batch-Modus, die meistens über Nacht oder am Wochenende gelaufen sind, vernachlässigt wurde. Ausserdem wurden

die Zeiten für das Scannen und für die Vorbereitung von Passpunkten nicht berücksichtigt.

Als bestes Resultat wurden die insgesamt 22 Stunden für die Triangulation vom Block Aargau erreicht, was einer Triangulationsrate von 8.7 Minuten pro Bild entspricht. Dieser Block repräsentiert überwiegend landwirtschaftliches Gebiet mit grosser Textur in den Photos und mit weichen Übergängen von flachem zu hügeligen Gegend, was eigentlich ideales Terrain für die automatische Punktübertragung und dem Korrelationsalgorithmus darstellt. Ausserdem lagen die Flugdaten für die einzelnen Streifen zeitlich dicht beieinander.

Ein leicht schlechteres Ergebnisse (9.8 Minuten pro Bild) wurde mit dem Block Basel erreicht. Im Gegensatz zum vorigen Block repräsentiert dieser Block eher urbanes Gebiet im Norden (Stadt Basel) und Wald- und Landwirtschaftsgebiete sowie hügeliges Gelände im Süden mit maximalen Höhenunterschieden von bis zu 1000m. Besonders der Gebirgszug Jura mit den vielen Wäldern und Steilhängen bereitete der automatischen Bildkorrelation einige Probleme.

Der Block Luzern stellt eher den Übergang vom hügeligen zum bergigen Terrain dar. Da der Nordteil des Blockes überwiegend landwirtschaftliche Flächen enthält, wurde dieser Teil sehr erfolgreich und schnell trianguliert, während dagegen im Südteil durch die Berge etwas mehr Zeit verwendet wurde und die Ergebnisse nicht so gut wie im Nordteil waren. Dennoch war die Produktionsrate

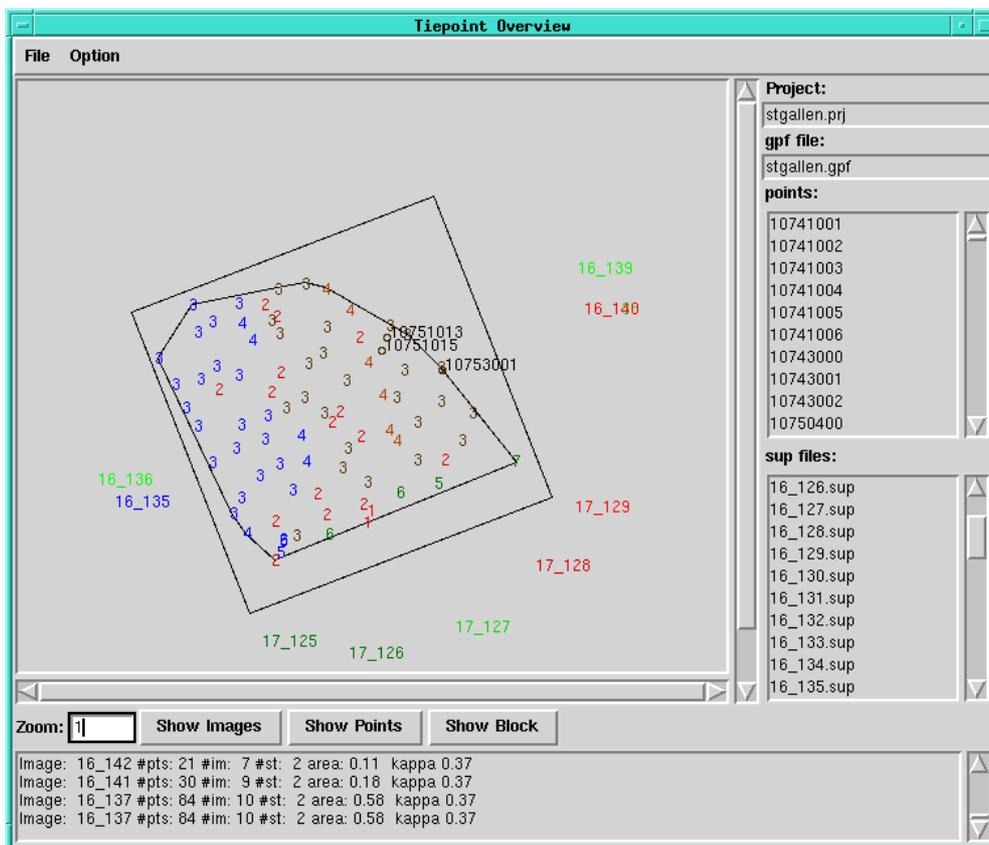


Abbildung 2: Visualisierung der Bildverknüpfungen innerhalb des Triangulationsblockes zur Qualitätskontrolle

AT Arbeitsschritte	Block Aargau	Block Basel	Block Luzern	Block Brienz
Vorbereitung (Import, Pyramide, IO)	4 h	5 h	7.5 h	9 h
AT Messungen	13 h	16.5 h	29 h	78.5 h
Bündelblockausgleichung	5 h	3 h	7 h	15 h
Verwendete Zeit total	22 h	24.5 h	43.5 h	102.5 h
Anzahl der Bilder	152	150	216	270
Verwendete Zeit pro Bild	8.7 min	9.8 min	12 min	22.8 min

Tabelle 3: Verwendete Zeit für die digitale AT mit einer in der Praxis angepassten und modifizierten Methode

mit 12 Minuten pro Bild für diesen Block noch recht gut. Allerdings konnte man in diesem Block schon sehen, dass je mehr Berge in dem Blockteil vorhanden waren, desto mehr Probleme hatte der Korrelationsalgorithmus, so dass zunehmend der Operateur eingreifen musste.

Diese oben erwähnten Probleme trafen auf den Block Brienz besonders zu, da dort einige extreme Höhendifferenzen in den alpinen Regionen des Blockes auftraten. Erschwerend kam hinzu, dass der Bildmassstab innerhalb des Blockes stark variierte und die Zeitintervalle zwischen den Aufnahmen der einzelnen Flugstreifen recht gross (bis zu einem Jahr) waren. Diese Ursachen erforderten das vermehrte Eingreifen des Operateur und reduzierten dadurch die Produktivität der Triangulation. Für diesen Block wurde eine Zeit von 22 Minuten pro trianguliertem Bild benötigt, was eigentlich nicht schneller als die Triangulationszeit mit einem analytischen Plotten ist. Dieser Block hat gezeigt, dass in solchen Gegenden, gezielte halbautomatische Punktmessungen der Verknüpfungspunkte durch den Operateur den ganzen Triangulationsprozess gegenüber den verwendeten Ansatz sogar beschleunigen würden.

Die Produktivität, die mit den vier Triangulationblöcken erreicht wurde, stellt eine signifikante Verbesserung gegenüber den ersten beiden *swissphoto* Testblöcken St. Gallen (106 Bilder) und Zug (82 Bilder) mit hügligen und bergigen Gebiet dar. Für diese beiden Blöcke wurde HATS ohne irgendwelche Modifikationen in den Arbeitsabläufen verwendet und die benötigte Triangulationszeit betrug 28 Minuten bzw. 20 Minuten pro Bild (Kersten und O'Sullivan, 1996b).

Andere Autoren haben ähnliche Ergebnisse wie hier vorgestellt erreicht. DeVenecia et al. (1996) berichtet über totale Triangulationszeiten von circa 10 Minuten pro Bild, die bei zwei Testblöcken mit HATS erreicht wurden. Beide Testblöcke (Forssa und Wisconsin) haben einen grossen Bildmassstab von 1: 4000 und stellen eher ein sehr flachen Gebiet mit maximalen Höhenunterschieden von 10m dar. Beckschäfer (1996) berichtet über eine Rate von 66 triangulierten Bildern pro acht Stunden Schicht als das beste Resultat für digitale Aerotriangulation mit der INTERGRAPH ImageStation, was 7.3 Minuten pro Bild entspricht.

## 5. Algorithmische Aspekte

Die Qualität der Resultate und die Effizienz der Triangulation hängt von der Qualität der automatischen Punktübertragung und damit vom Korrelationsalgorithmus ab, der wiederum hauptsächlich von der Bildqualität (Film, Bilddigitalisierung und Wetterbedingungen) und von der Geländecharakteristik (z.B. Textur und Höhenunterschiede) beeinflusst wird. In unseren Untersuchungen haben folgende Aspekte Probleme für den Korrelationsalgorithmus verursacht:

- Extreme Höhendifferenzen in Bildern bzw. im Block
- Flugstreifen mit unterschiedlichen Flugdaten (Änderungen der Vegetation im Sommer)
- Schatten durch Befliegung am frühen Morgen (schlechte Qualität des abgebildeten Terrains)
- Dicht bewaldete Flächen und Seen
- Triangulationblöcke mit Variation des Bildmassstabes innerhalb des Blockes (von Streifen zu Streifen)

Um HATS hinsichtlich der Geschwindigkeit, Genauigkeit, Robustheit, Flexibilität und Benutzerfreundlichkeit zu verbessern, schlagen wir folgende Softwareverbesserungen vor:

- (1) Die Verwendung von vorhandenem DTM in APM beschleunigt den APM-Prozess und verbessert zunehmend die Genauigkeit und Robustheit, besonders in bergigen und alpinen Gegenden, so dass die Rate der erfolgreiche gemessenen Punkte zunehmen sollte. In der Schweiz zum Beispiel ist ein DTM mit einer Gitterweite von 250 m flächendeckend für das ganze Land vorhanden.
- (2) Die Implementierung einer Matching-Technik (least squares matching, Grün, 1985b), die neben den beiden Shift Parameter auch zwei Scherungen und Massstäbe verwendet, verbessert die Genauigkeit der Messungen. Der kleine Nachteil, dass dadurch die Messgeschwindigkeit reduziert wird, sollte bei den heutigen Fortschritten in der Computertechnologie vernachlässigt werden.
- (3) Die Verwendung von GPS-Daten, zusätzlichen Parametern zur Kompensation systematischer Fehler und ein effizienter Sortieralgorithmus zur Reduktion der

Bandbreite im Normalgleichungssystem führt in der simultanen Ausgleichung zu mehr Flexibilität und zu einer signifikanten Verkürzung der Rechenzeit.

(4) Der Einsatz von On-line Triangulationsalgorithmen (sequentielle Schätzung in der Bündelblockausgleichung und grobe Fehlersuche mit Hilfe des Data Snooping) während des APM Prozesses verbessert die Qualität der automatischen Messungen durch Eliminierung von groben Fehlern schon in der Messphase (Grün, 1985a).

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

In unserem Beitrag konnten wir zeigen, dass durch gewisse Anpassungen an eine Produktionsumgebung und durch Modifikationen einer kommerziellen Triangulations-Software die digitale Aerotriangulation so optimiert werden kann, dass eine hohe Effizienz in der digitalen AT erreicht wurde und der Einsatz des Operateurs auf das absolute Minimum reduziert werden konnte. Die Entwicklungen von zusätzlicher Software und Benutzeroberflächen bei Swissphoto Vermessung AG, die in diesem Artikel vorgestellt wurden, konnten die digitale Aerotriangulation mit HATS so automatisieren, dass eine Triangulationsrate von bis zu 8.7 Minuten pro Bild bei Blöcken von mehr als 150 Bildern (Bildmassstab circa 1: 27'000) erzielt wurde. Darüberhinaus konnte gezeigt werden, dass neben der Automation durch Batchprozesse andere Aspekte wie die Geländecharakteristik und die Blockkonfiguration (z.B. Unterschiede im Bildmassstab innerhalb des Blockes und im Flugdatum der Streifen) die Effizienz einer digitalen Triangulation signifikant beeinflussen können.

Im Vergleich zu der konventionellen Triangulationsmethode am analytischen Plotter stellen die präsentierten Ergebnisse eine deutliche Geschwindigkeitssteigerung dar. Auch wenn man sogar die Scanzeiten von s/w Bildern (7 Minuten pro Bild mit der DSW200/Sun Ultra 1) zu der verwendeten Triangulationszeit pro Bild addiert, dann wird deutlich, dass die digitale AT immer noch viel effizienter als die Triangulation am analytischen Plotter ist. Dennoch glauben wir, dass in der digitalen AT immer noch Potential für viele Verbesserungen steckt, so dass vielleicht in Zukunft mal eine Triangulationsrate von besser als 5 Minuten pro Bild, auch in sehr schwierigem Gelände wie es in der Schweiz vorkommt, möglich sein könnte. Eine viel höhere Produktivität erscheint schwierig, da die Passpunkte weiterhin halbautomatisch gemessen werden müssen, obwohl schon vereinzelt für spezielle Bedingungen automatische Ansätze publiziert wurden. Weiterhin erscheint es sehr wichtig zu sein, dass der erfahrene Operateur in der Lage sein muss, die Ergebnisse der automatischen Prozesse (Black-Box) zu analysieren, um eine Qualitätskontrolle zu gewährleisten. Je mehr Automation ein System bietet, desto zuverlässigere Qualitätskontrollen müssen zwischen die einzelnen Arbeitsschritte eingebaut werden, um genaue und zuverlässige Resultate zu garantieren. Aufgrund der hohen Effi-

zienz wird die digitale AT die konventionelle Methode bald verdrängt haben.

Die erzielten Resultate mit einer Genauigkeit von besser als 0.6 m in der Lage und 1 m in der Höhe sind ausreichend zur Generierung von digitalen Geländemodellen durch Bildkorrelation und zur Orthophotoerstellung mit einer Pixelgrösse von 0.75 m aus Bildern mit einem Bildmassstab von circa 1: 27'000 und kleiner.

## Literatur:

- ACKERMANN, F., 1996. Some Considerations about Automatic Digital Aerial Triangulation. *OEEPE Official Publication No. 33*, pp. 157-164.
- ACKERMANN, F., TSINGAS, V., 1994. Automatic Digital Aerial Triangulation. *Proceedings of ASPRS/ACSM Annual Convention*, Reno, pp. 1-12.
- AGOURIS, P., SCHENK, T., 1996. Automated Aerotriangulation Using Multiple Image Multipoint Matching. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 62 (6), pp. 703-710.
- BALTSAVIAS, E. P., HÄRING, S., KERSTEN, Th., 1997. Geometric and Radiometric Performance Evaluation of the Leica/Helava DSW200 Photogrammetric Film Scanner. *SPIE proceedings*, Vol. 3714.
- BECKSCHÄFER, M., 1996. Practical Experiences with Digital Aerotriangulation based on INTERGRAPH ImageStations. *OEEPE Official Publication No. 33*, pp. 151-155.
- BRAUN, J., TANG, L., DEBITSCH, R., 1996. PHODIS AT - An Automated System for Aerotriangulation. *Int. Archives of Photogr. and Remote Sensing*, Vol. 31 (B2), pp. 32-37.
- DEVENECIA, K., MILLER, S., PACEY, R., WALKER, S., 1996. Experiences with a Commercial Package for Automated Aerial Triangulation. *Proceedings of ASPRS/ACSM Annual Convention*, Vol. 1, pp. 548-557.
- GRÜN, A., 1985a. Algorithm Aspects in On-line Triangulation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 51 (4), pp. 419-436.
- GRÜN, A., 1985b. Adaptive Least Squares Correlation: A Powerful Image Matching technique. *Southafrican Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*, Vol. 14 (3), pp. 175-187.
- KERSTEN, Th., STALLMANN, D., 1995. Experiences with Semi-automatic Aerotriangulation on Digital Photogrammetric Stations, *SPIE Vol. 2646*, pp. 77-88.
- KERSTEN, Th., O'SULLIVAN, W., 1996a. Project SWISSPHOTO - Digital Orthophotos for the entire area of Switzerland. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 31 (B2), pp. 186-191.

KERSTEN, Th., O'SULLIVAN, W., 1996b. Experiences with the Helava Automated Triangulation System. *Int. Archives of Photogr. and Remote Sensing*, Vol. 31 (B3), pp. 591-596.

KERSTEN, Th., HÄRING, S., 1997. Automatic Interior Orientation of Digital Aerial Images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 63 (8).

KRZYSTEK, P., 1991. Fully Automatic Measurement of Digital Elevation Models with MATCH-T. *Proceedings of 43rd Photogrammetric Week*, Vol. 15, pp. 203-214

KRZYSTEK, P., HEUCHEL, T., HIRT, U., PETRAN, F., 1996. An Integral Approach to Automatic Aerial Triangulation and Automatic DEM Generation. *Int. Archives of Photogr. and Remote Sensing*, Vol. 31 (B3), pp. 405-414.

LUE, Y., 1995. Fully Operational Automatic Interior Orientation. *Proceedings of GeoInformatics '95*, Hong Kong, Vol. 1, pp. 26-35.

SCHENK, T., TOTH, C., LI, J-C., 1990. Zur automatischen Orientierung von digitalen Bildpaaren. *ZPF - Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, No. 6, pp. 182-189.

SCHICKLER, W., 1995. Ein operationelles Verfahren zur automatischen inneren Orientierung von Luftbildern. *ZPF - Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, No. 3, pp. 115-122.

TOTH, C., KRUPNIK, A., 1996. Concept, Implementation, and Results of an Automatic Aerotriangulation System. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 62 (6), pp. 711-717.

TSINGAS, V., 1992. Automatisierung der Punktübertragung in der Aerotriangulation durch mehrfache digitale Zuordnung. *Dissertation, DGK Reihe C*, Heft 392, München, 110 S.