

## Mit dem „Bodensee-Test“ 1982 fing es an – Eine Erinnerung zur Entwicklung der Kamera-Positionierung für die Aerotriangulation

FRIEDRICH ACKERMANN, Stuttgart

**Keywords:** aerial photography, camera orientation data, airborne radio location, aerial triangulation, integrated block adjustment

**Zusammenfassung:** Anlässlich von Jubiläen kann es interessant sein, an historische Arbeiten zu erinnern, die am Anfang einer Entwicklungslinie standen, die sich erst später unter besseren technologischen Voraussetzungen durchsetzen sollte. So wird hier an den „Bodensee-Test“ von 1982 erinnert, den ersten Versuch auf dem Weg zur heutigen Kamera-Positionierung mit GPS für die Aerotriangulation.

**Summary:** *It started with the „Bodensee-Test“ 1982 – A recollection of the beginning of camera positioning for aerial triangulation.* Jubilees are an occasion to remember certain historical events at the beginning of developments which would be realized only later, under better technical conditions. Here, the „Bodensee-Test“ of 1982 is recalled, an initial experiment to use airborne camera positioning by radio location for aerial triangulation. It marks the take-off towards today's GPS application for aerial triangulation.

---

### 1 Hilfsdaten für die Kamera-Orientierung

Die Luftbild-Photogrammetrie hat fast von Anfang an nach Möglichkeiten gesucht, die Kamera-Orientierung im Flug zu erfassen. Die Bemühungen liefen seit den 20er und 30er Jahren des letzten Jahrhunderts unter dem Stichwort der sog. Hilfsdaten für die Kamera-Orientierung. Es handelte sich damals um Statoskop, Horizontbild-Kamera, Sonnenperiskop und auch schon um Kreiselssysteme. Sie konnten sich aber nicht in größerem Umfang durchsetzen. Ähnliches gilt für die Radio-Positionier-Systeme der 50er Jahre vor allem aus Kanada. Diesen Systemen blieb aus heutiger Sicht ein größerer Durchbruch verwehrt, weil ihre Messungen einerseits weder absolut noch relativ genau genug waren und andererseits noch keine Möglichkeit bestand, sie rechnerisch in die Aerotriangulation einzubinden.

Eine gewisse Ausnahme bildeten das in den 60er Jahren wiederbelebte Statoskop zur barometrischen Differenz-Höhenmessung im Flug und der ebenfalls barometrisch gestützte Airborne Profile Recorder (APR). Beide Systeme waren auf die Höhenbestimmung der Projektionszentren bzw. von Geländepunkten ausgerichtet. Höhen und Höhengenaugigkeit stellten damals bis in den Bereich großmaßstäbiger Kartierungen hinein deutlich höhere Anforderungen und waren vordringlicher als die Lage-Positionierung.

### 2 Blockausgleichung mit Hilfsdaten

Die nach gewissen Vorläufern etwa ab 1970 aufkommende simultane rechnerische Blockausgleichung ganzer Bildverbände bedeutete für die Praxis der Photogrammetrie einen großen Schub. Sie führte zu ganz erheblicher Einsparung von Passpunkten und zu deutlich gesteigerter absoluter wie innerer Ge-

nauigkeit, und sie bestimmte damit für zwei Jahrzehnte das Leistungsniveau der Photogrammetrie. Allerdings trat dabei die Frage der Hilfsdaten irgendwie in den Hintergrund, insbesondere bei der Bündelmethode, die sich mehr als 20 Jahre lang nicht darum kümmerte. Die Gründe seien hier dahingestellt. Dabei war die mathematische Integration verschiedener zusätzlicher Daten und Bedingungen bei den speziellen Bündel-Programmen von D. BROWN, u.a. zur Vorbereitung der Apollo-Mondlandungen, schon sehr weit getrieben gewesen (BROWN 1975). Der Ansatz wurde aber nicht in die normale Aerotriangulation übernommen, obwohl die gemeinsame Blockausgleichung dadurch kaum erschwert worden wäre.

Eine wesentliche Ausnahme bildete das Programm Pat-M-43 der Universität Stuttgart für die Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen, das Statoskop- wie auch APR-Daten als die damals einzigen in der Praxis verfügbaren und speziell auf die Höhen ausgerichteten Hilfsdaten in die simultane Ausgleichung einbeziehen konnte. Dieses Verfahren der Blockausgleichung mit Hilfsdaten war wirksam und, soweit eingesetzt in der Praxis, auch recht erfolgreich. Insbesondere konnte nachgewiesen werden, dass (mit Hilfe von linearen Transformationsparametern für die unbekannte isobare Referenzfläche) die Höhengenaugigkeit der Statoskop-Messungen im Bereich von 1 m oder besser lag und die ausgeglichenen Blöcke an Höhengenaugigkeiten bis 0,5 m aus Flughöhen von 3000 bis 4000 m herankamen (KLEIN 1976, ACKERMANN & SCHNEIDER 1983). Damit wurden für mittlere Bildmaßstäbe passpunktlose Überbrückungsdistanzen von 100 oder 200 km möglich. Dennoch hat sich das Verfahren nicht verbreiten können, vor allem weil die Statoskop-Geräteentwicklung nicht nachgezogen hat und die Verwendung des APR auf wenige Länder und kleinmaßstäbige Aufnahmen beschränkt blieb.

### 3 Systeme zur Lage-Positionierung von Flugzeug und Kamera

In den 70er Jahren wurden über Statoskop und APR hinaus von der Seite der photogrammetrischen Auswertung her keine weiteren Anforderungen an Kamera-Orientierungsdaten gestellt. Die erfolgreiche Entwicklung der Blocktriangulation und ihre Verfeinerung durch Selbstkalibrierung schien allen Anforderungen zu genügen. Die direkte Messung, insbesondere von Positionsdaten, blieb aber von der Seite der Bildflug-Navigation her akut. Im Hinblick auf gezielte Befliegungen vor allem für die direkte Orientierung von Orthophotos war damit von Anfang an die Vorstellung von der Messung möglichst aller Parameter zur Positionierung und zur Richtungs-Orientierung der Luftbilder verbunden. Solche Vorstellungen lagen Systemen wie PICS (Photogrammetric Integrated Control System) von Litton (BRULAND 1982) oder dem auf Echtzeit ausgerichteten experimentellen US/ANQ-28 System (DI CARLO & EAKIN 1965) zugrunde. Von letzterem wurde sogar erwartet, dass es leistungsfähig genug wäre, mit seinen Orientierungsdaten die Aerotriangulation zu ersetzen. Diesen höchst aufwändigen Bildflug-Navigations-Systemen der 70er Jahre war kein besonderer Erfolg beschieden, und sie sollen hier nicht weiter kommentiert werden. Das Hauptproblem bestand in der sehr ungünstigen Fehlerfortpflanzung bei der alleinigen Verwendung von Inertialsystemen (INS bzw. IMU) zur Gewinnung von Positionsdaten.

Hier soll mit dem Thomson-CSF Trident System an eine Entwicklung aus Frankreich vom Anfang der 80er Jahre erinnert werden. Es war ursprünglich für die genaue Navigation von Schiffen konzipiert, wurde aber in der Version Trident III auch für die X,Y-Positionierung von Luftfahrzeugen anwendbar (BALSAN & DUMAS 1983). Die Firma IGI mbH, Hilchenbach, integrierte dieses System in ihr CPNS (Computer-controlled Photo Navigation System), primär für Navigationszwecke und kontrollierte Bildflüge (BEUMELBURG, GRIMM & HEIMES 1983). Das Trident III System bestand im Prinzip

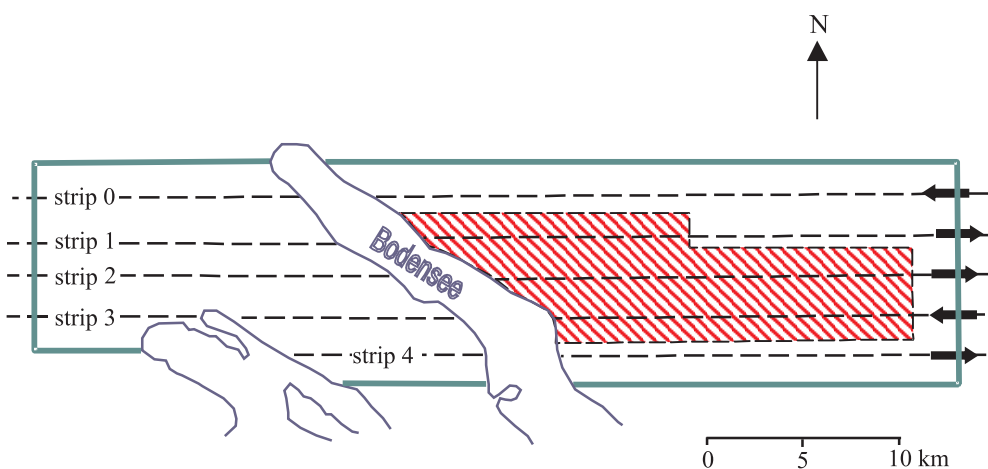
aus einem Sender/Interrogator im Flugzeug, der amplituden-modulierte Radio-Signale mit der Trägerfrequenz von 1219 MHz ( $\lambda = 0,25$  m) bzw. im 420–450 MHz Band ( $\lambda = 0,71$ – $0,67$  m) abstrahlte, die von stationären Transpondern am Boden umgesetzt und zurückgestrahlt wurden, um vom Empfänger im Flugzeug empfangen, identifiziert und registriert zu werden. Andere Frequenzbereiche (im 200–300 MHz Band) waren ebenfalls möglich. Die Reichweite war damals auf Entfernungen bis zu 260 km ausgelegt. Die Positionen von mindestens 3 Transpondern mussten geodätisch bekannt sein. Sie bildeten das Referenz-Koordinatensystem für die Positionierung des Flugzeugs. Ein Computer an Bord verarbeitete die Signale laufend durch Trilateration (mit Korrektur der Schrägentfernungen) zu Positionsangaben, die an den IGI Navigationsrechner übergeben wurden und/oder zur späteren Ableitung der Kamerapositionen registriert werden konnten. Das IGI-System konnte zur Flugplanung und zur kontrollierten Navigation mit gezielten Luftaufnahmen ausgebaut werden. Für die Navigation in Echtzeit wurde eine Positionsgenauigkeit von 20 m angegeben. Die Messgenauigkeit für die Entfernungen lag absolut bei 3 m, relativ bei 1 m, und mit 4 gut verteilten Transpondern wurde eine Systemgenauigkeit von 1 m erwartet.

## 4 Der Bodensee-Flugtest 1982 zur Kamera-Positionierung

### 4.1 Die Befliegung

Mit den genannten Genauigkeiten wurde das CSF Trident III System über die Navigationsanwendung hinaus interessant für die Kamera-Positionierung im Zusammenhang mit Aerotriangulation und integrierter Blockausgleichung. Aus der Sicht der Aerotriangulation bzw. speziell der kombinierten Blockausgleichung war schon immer klar gewesen (besonders nach den Erfahrungen mit dem Statoskop), dass auch X, Y-Kamera-Positionen, als zusätzliche gewichtete Beobachtungen in die Blockausgleichung eingebracht, sehr wirksam sein und eine weitere Ausdünnung der Lagepasspunkte erlauben würden, selbst wenn die Zusatzdaten nicht allzu genau wären.

Das Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart bekam seinerzeit im nachhinein Zugang zu den Positionierungsdaten und den Luftbildern eines Versuchsfluges, der auf Initiative der IGI mbH, Hilchenbach, 1982 von der DLR im Bereich des westlichen Bodensees mit Verwendung des Trident III Systems durchgeführt worden war. Von den 4 Transpondern befand sich einer in Konstanz am Rand des Befliegungsgebietes. Die 3 anderen waren je etwa 80 km entfernt in einem Sektor nordwestlich bis



**Abb.1:** Bildflug westlicher Bodensee 1982, 5 Streifen, 223 Bilder, Bildmaßstab 1: 16000, bearbeiteter Block 3 Streifen, 56 Bilder.

nordöstlich vom Fluggebiet verteilt. Leider wurden die Transponder nicht geodätisch eingemessen, vielmehr ihre Positionen nur aus der Topographischen Karte graphisch abgegriffen, was insgesamt höchstens eine Genauigkeit im 20 m Bereich erwarten lassen konnte. Die Luftbilder wurden mit dem Prototyp der damals neuen RC 10 A Kamera von Wild im Bildmaßstab 1:16000 ( $h = 2450$  m) aufgenommen. Wir waren leider in die Planung des Fluges nicht einbezogen, der nur auf die Bildflug-Navigation ausgerichtet war. Das westliche Drittel des aus 5 parallelen Streifen und 224 Bildern bestehenden Bildblocks war durch die breite Wasserfläche des Überlinger Arms des Bodensees völlig abgetrennt und somit für unsere Untersuchungen unbrauchbar (s. Abb. 1). Dennoch bildeten die 3 zentralen Streifen des östlichen Teils mit insgesamt 56 Bildern einen für die Untersuchung ausreichenden Bildverband, in dessen Gebiet und darauf beschränkt 34 signalisierte Lagepasspunkte und 380 topographische Höhenpasspunkte zur Verfügung standen. Außerdem waren in diesem Bereich die Verknüpfungspunkte für die Aerotriangulation, durchschnittlich 10 pro Bildpaar, im Gelände signalisiert.

#### 4.2 Aerotriangulation und Genauigkeitsuntersuchung

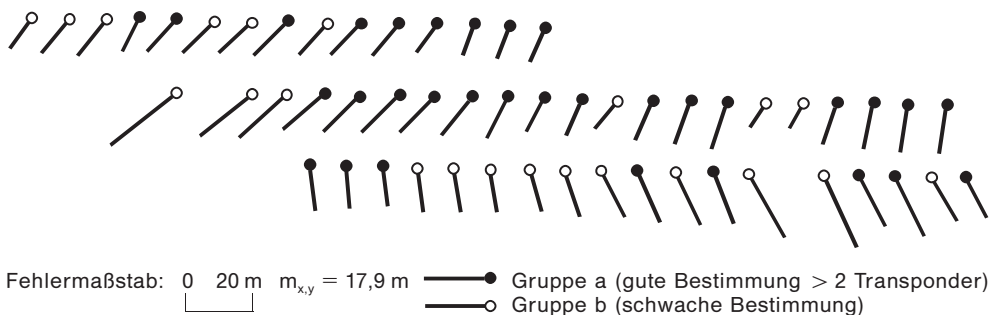
Mit den Luftbildern wurde eine Aerotriangulation konventioneller Art nach der Methode der unabhängigen Modelle durchge-

führt. Die Messungen erfolgten mit dem analytischen Plotter Zeiss Planicom C 100 im Stereokomparator-Modus. Zur Blockausgleichung wurde das Programm PAT-M-43 benutzt, das die mit dem Trident III System gemessenen X, Y-Kamera-Positionen unmittelbar als gewichtete zusätzliche Beobachtungen einzuführen erlaubte. Allerdings konnten systematische Fehler noch nicht in der Ausgleichung kompensiert werden. Es gab damals noch kein Programm, das allgemein Positionsdaten einschließlich der Korrektur systematischer Fehler hätte verarbeiten können. Die Aerotriangulation ergab für damaliges Bildmaterial und unabhängige Modelle erwartungsgemäße Ergebnisse:

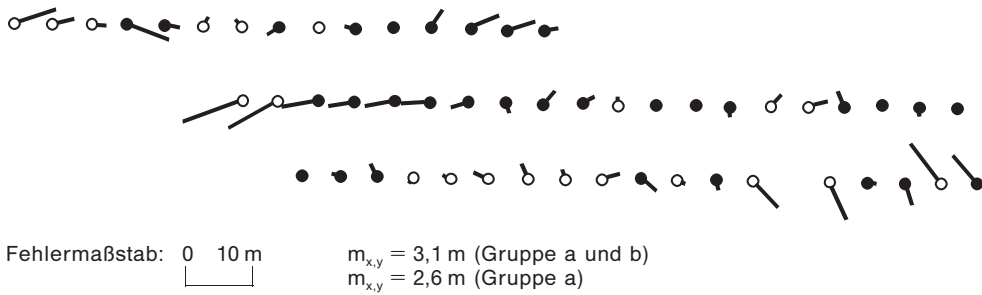
$$\sigma_{0\text{Lage}} = 0,11 \text{ m} = 7 \mu\text{m};$$

$$\sigma_{0\text{Höhe}} = 0,20 \text{ m} = 0,08\% h = 12 \mu\text{m}.$$

Die Genauigkeitsuntersuchung hatte zwei sich ergänzende Zielsetzungen. Zunächst wurde eine normale Blockausgleichung ohne die Hilfsdaten unter Verwendung aller gegebenen geodätischen Punkte als Passpunkte durchgeführt. Das Ergebnis war ein gut fixierter photogrammetrischer Block, dessen Projektionszentren etwa auf 30 cm genau waren. Mit diesen durch die Blockausgleichung ermittelten Projektionszentren wurden die Ergebnisse der Trident Positionierung verglichen (s. Abb. 2). Dabei stellte sich zunächst an allen Projektionszentren eine praktisch konstante Differenz von 17,9 m heraus, die zweifellos im Wesentlichen von der mangelhaften geodätischen Referenz der Transponder verursacht war.



**Abb. 2a:** Differenzen der Kamerapositionen zwischen der Trident-Bestimmung und der Bestimmung im photogrammetrischen Block.



**Abb. 2b:** Differenzen nach Korrektur der systematischen Fehler.

Weiterhin war ein kleinerer, von der Flugrichtung abhängiger systematischer Fehler zu erkennen. Er war in erster Linie dadurch zu erklären, dass keine Reduktion der Trident Positionierungsdaten von der Flugzeug Antenne auf die Kamera stattgefunden hatte. Diese systematischen Fehler hatten offensichtlich mit der Performance des Systems nichts zu tun und wurden deshalb für die weitere Untersuchung als nicht systeminhärent weggerechnet. Danach verblieben quadratische Koordinaten-Differenzen an den Projektionszentren von 3,1 m bzw. von 2,6 m für die von mehr als 2 Transpondern abgeleiteten Positionen. Damit war zunächst bewiesen, dass die Systemgenauigkeit jedenfalls in einem für die Photogrammetrie mit Aerotriangulation höchst interessanten Bereich lag.

Im zweiten Teil der Untersuchung wurden die (um die großen systematischen Effekte korrigierten und auf die Bildorte interpolierten) X, Y-Messungen des Trident Systems als entsprechend gewichtete zusätzliche Beobachtungen in eine integrierte Blockausgleichung eingebracht, die sich auf nur 4 Lage-Passpunkte in den Blockecken stützte. Die übrigen bekannten geodätischen Punkte wurden jetzt als Vergleichspunkte zur Abschätzung der Genauigkeit des ausgeglichenen Blocks verwendet. Im Ergebnis wiesen die quadratischen Koordinaten-Differenzen an den 30 Check-Punkten eine mittlere Genauigkeit von 23 cm in X- (Hoch-) und von 34 cm in Y- (Rechts-) Richtung aus. Dieses Ergebnis bestätigte eindeutig die Wirksamkeit der Methode. Allerdings bleibt anzumerken, dass wegen des relativ großen Bild-

maßstabs und der schwachen Gewichtung der im Verhältnis ungenauen Hilfsdaten die Blockausgleichung ohne die Zusatzmessungen nicht sehr viel ungenauer ausgefallen wäre.

Als Ergänzung wurde deshalb mit den gleichen Daten auch noch eine Blockausgleichung ganz ohne Lage-Passpunkte durchgerechnet. In diesem Fall bezog sich das Ergebnis auf das durch die Transponder Positionen definierte Referenz System. Sie ersetzen sozusagen die konventionellen Passpunkte, die dabei vollständig weggelassen werden konnten. Die quadratischen Differenzen an den 34 Vergleichspunkten ergaben für die mittlere Genauigkeit des so ausgeglichenen Blocks 36 cm in X- und 53 cm in Y-Richtung. Die Wirksamkeit der Einbeziehung der Kamera-Positionsdaten in die Blockausgleichung war damit erneut bestätigt. Auf eine genauere Analyse braucht hier nicht mehr eingegangen zu werden.

## 5 Bewertung

Das CSF Trident III System hat durch das IGN, Paris, und die IGI in der Photogrammetrie zwar für Navigationszwecke eine gewisse Anwendung erfahren (z.B. in der Antarktis). Für Kamera Positionierung zur Unterstützung der Aerotriangulation ist es, soweit bekannt, nie mehr eingesetzt worden. Insofern war der Bodensee-Test wohl der erste und einzige seiner Art.

Dieser Test war in seinen Ergebnissen trotz der gegebenen Einschränkungen sehr überzeugend. Es wurde eindeutig gezeigt, dass auch X, Y-Hilfsdaten für die Kamera-

Orientierung sehr wirkungsvoll in Verbindung mit Aerotriangulation durch kombinierte Blockausgleichung eingesetzt werden können und, dass die erreichbare Genauigkeit derartige Systeme äußerst wirtschaftlich machen könnte. Dabei beruht der wesentliche Effekt auf der Integration mit Aerotriangulation und Blockausgleichung, als die damit erreichbare Blockgenauigkeit deutlich besser ist als die individuelle Genauigkeit der Hilfsdaten selbst. Gleichzeitig wurde deutlich, dass systematische Fehler in Analogie zu den Erfahrungen mit dem Statoskop durch zusätzliche Parameter in der gemeinsamen Blockausgleichung modellierbar und korrigierbar sein würden.

Insofern bedeutete dieser erste Test einen konzeptionellen Durchbruch, und er hat die Verfahren methodisch vorbereitet, die erst ein gutes Jahrzehnt später mit der GPS Technologie erfolgreich umgesetzt werden konnten. Wenn man heute die damaligen Veröffentlichung liest (ACKERMANN 1982, 1984), ist man erstaunt, dass der heutige Status der Aerotriangulation mit und ohne Passpunkte schon vorweggenommen und konkret konzipiert war. Insofern kommt diesem Test als Vorläufer und Vorbereiter einer späteren Realisierung eine besondere Bedeutung zu, die mit den besseren technologischen Voraussetzungen des GPS heute den etablierten Leistungsstandard bildet.

## 6 Literatur

- ACKERMANN, F., 1982: Use and Benefits of X, Y, dZ Auxiliary Data for Aerial Triangulation – Results of the Test Mission „Bodensee“ 1982. – Proceedings Workshop at Siegerland-Airport, 10./11. Juni 1983, IGI mbH, S. 28–41.
- ACKERMANN, F., 1984: Utilisation of Navigation Data for Aerial Triangulation. – Presented Paper, Comm. III, ISPRS Congress, Rio de Janeiro, 1984, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXV, Part A3a: 1–9.
- ACKERMANN, F. & SCHNEIDER, W., 1983: Neue Ergebnisse zur Aerotriangulation mit Statoskop. – Bildmessung und Luftbildwesen, **51** (1): 21–37.
- BALSAN, H. & DUMAS, B., 1983: Trident III Radio Location System. – Proceedings Workshop at Siegerland-Airport, 10./11. Juni 1983, IGI mbH, S. 50–54.
- BEUMELBURG, J., GRIMM, A. & HEIMES, F. J., 1983: CPNS – The Computer-controlled Photo Navigation System. – Proceedings International Symposium, ISPRS Comm. I, Canberra Australia 1982, S. 147–154.
- BROWN, D. C., 1975: Bundle Adjustment with Strip- and Blockinvariant Parameters. – In: Proceedings of the ISP Commission III symposium held in Stuttgart, 2.–6. September 1974. – Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B: Angewandte Geodäsie, Heft Nr. **214**: 54–65.
- BRULAND, R. V., 1982: Integrated Air Survey Navigation. – Proceedings 38. Photogrammetrische Woche, Institut für Photogrammetrie Stuttgart, Heft **8**: 59–72.
- DI CARLO, C. & EAKIN, N., 1965: Mapping and Survey System Geodetic AN/USQ-28. – Archives of Photogrammetry, **15** (3).
- KLEIN, H., 1976: Genauigkeit von Höhenblöcken mit gemeinsamer Ausgleichung von Statoskop- oder APR-Hilfsdaten. – Numerische Photogrammetrie (III), Institut für Photogrammetrie, Heft **1**: 5–16, Stuttgart.

Anschrift des Verfassers:

Prof. i. R. Dr.-Ing. FRIEDRICH ACKERMANN, Pfeilstraße 22, D-70569 Stuttgart  
Tel.: 0711-68 46 11

Manuskript eingereicht: April 2003  
Angenommen: Mai 2003