

Geometrische Auswertung von DPA-Dreizeilenkameradaten*

MARTIN SCHLÜTER**

Zusammenfassung: Die digitale Dreizeilenkamertechnik kann heute als weitgehend ausgereift betrachtet werden, nicht zuletzt begünstigt durch die aktuellen Entwicklungen im Bereich integrierter DGPS/INS-Lösungen. Es ist zu erwarten, daß digitale Dreizeilenkameras bereits in naher Zukunft die klassischen analogen Luftbildaufnahmesysteme ergänzen oder sogar ablösen können. Vor diesem Hintergrund gibt dieser Aufsatz erste Erfahrungen mit der Auswertung von digitalen Dreizeilenscannerdaten wieder, welche am Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in Frankfurt a.M. gewonnen wurden.

Speziell im Hinblick auf die geometrische Qualitätsanalyse wurde am BKG ein Softwaretool zur geometrischen Entzerrung von Dreizeilenscannerdaten entworfen und implementiert, auf das algorithmische Design wird kurz eingegangen. Weitere inhaltliche Schwerpunkte sind die Diskussion von Ergebnissen aus der DPA-Befliegung 'Frankfurt-West' 1997 und daraus abgeleitete Konsequenzen für die Vorgehensweise bei der Datenaufbereitung im Hinblick auf interaktive Stereoauswertung und automatische Oberflächenrekonstruktion.

1 Einleitung

Im Rahmen der Bereitstellung von MOMS-Simulationsdaten zur Unterstützung der deutschen Nutzerbereiche bei der Realisierung ihrer Pilotprojekte im Rahmen des MOMS-2P-Weltraumprogramms wurde durch die DARA (DLR-BO) ein Aufnahmeprogramm mit der Flugzeugversion DPA (= *Digital Photogrammetric Assembly*) des MOMS-Weltraumsensors initiiert, vgl. (FEZ 1997). Diese DPA-Befliegung gilt als erster Routineeinsatz einer digitalen Luftbildkamera für Multispektral- und Stereoaufnahmen – ein wichtiger Meilenstein für die Weiterentwicklung des auf *Otto Hofmann* zurückgehenden Konzepts der digitalen Dreizeilenkamera, vgl. (Hofmann 1986), (Hofmann et al. 1993).

Im Hinblick auf die derzeitigen und zukünftigen Aufgaben des BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) sind sowohl Satelliten als auch Flugzeuge als Sensorplattformen für die direkte digitale Bilddatengewinnung aus der Luft von großem Interesse. Dabei erlauben flugzeuggetragene Systeme die flexiblere Aufnahmeplanung. Günstige Randbedingungen im Hinblick auf eine vollständige Oberflächenerfassung und einen möglichst weitgehend automatisierten Auswerteprozess können so leichter erreicht werden, z.B. durch die Wahl des konkreten Befliegungszeitpunkts in Abhängigkeit von Bewölkung, Sonnenstand, Vegetationsstand etc. Dieser Unterschied kann im Vergleich zu satellitengetragenen Systemen einen erheblichen Kostenfaktor für die Gesamtrechnung ausmachen und ist daher neben den reinen Datenbeschaffungskosten zu berücksichtigen. Für die direkte digitale

*Das dieser Veröffentlichung zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 50 EE 9604 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

**Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Richard-Strauss-Allee 11, D-60598 Frankfurt am Main, Telefon: + 49 - 69 - 6333 - 306, Email: martin.schlueter@usa.net

Bildaufnahme spricht insbesondere, daß sich gegenüber dem derzeitig üblichen Proceedere mit analoger Aufnahme und anschließender Digitalisierung eine erheblich verbesserte radiometrische Qualität erzielen läßt. Auflösungsverhältnisse ähnlich dem klassischen Luftbild und die Möglichkeit zur Farbbild- bzw. Multispektralaufzeichnung lassen sich zur Zeit nur mit der Mehrzeilentechnik operationell erreichen. Vor diesem Hintergrund konzentriert sich dieser Bericht im weiteren auf die geometrische Auswertung von DPA-Daten bis hin zur automatisierten Ableitung digitaler Oberflächenmodelle und Orthobilder.

Eine aktuelle Einführung in die Dreizeilenscannertechnik findet man bei (Albertz 1998), einen Überblick über alternative Sensorentwicklungen liefert z.B. (Kornus 1998).

2 Zur geometrischen Entzerrung von Zeilenscannerdaten

In der Orientierungsphase der Dreizeilenscannerbilder wird pro Aufnahmezeitpunkt eines Bildzeilentripels je ein Satz Parameter der äußeren Orientierung (Projektionszentrum und drei Drehwinkel) geschätzt. Als Ausgangsinformationen stehen dafür in der Regel Winkelgeschwindigkeiten und -beschleunigungen eines Inertialmeßsystems, Bildkoordinaten von (halb-)automatisch zugeordneten Verknüpfungspunkten und manuell gemessenen Paßpunkten, DGPS-Beobachtungen bzw. -Koordinaten sowie Kamerakalibrierungsdaten zur Verfügung. Diese Daten weisen einen durchaus wünschenswerten Grad an Redundanz auf: Denn obwohl in der Literatur Lösungsvorschläge sowohl ohne die Nutzung von DGPS als auch ohne die Einbeziehung von Bildkoordinaten propagiert werden, vgl. (Haala et al. 1998), liefert doch erst die komplette Bündelausgleichung unter Einbeziehung aller Ausgangsinformationen die Möglichkeiten zur durchgreifenden Selbstkontrolle auf grobe Fehler, zur ergänzenden Selbstkalibrierung wesentlicher Kameraparameter, zur vollständigen Automatisierung der Verknüpfungspunktzuordnung und letztendlich zum Erreichen und Verifizieren von geometrischen Genauigkeiten in der Größenordnung eines Pixelelements oder darunter.

Um eine aufgeschlüsselte Fehlerbudgetierung für die Ergebnisse aus der Orientierungsbestimmung zu ermöglichen, wird hier die geometrische Entzerrung im Objektraum eingesetzt. Darüberhinaus findet dieses Werkzeug im folgenden sowohl für die Generierung von Epipolarbildern als auch für die Orthobildberechnung Verwendung. Dabei werden die einzelnen Pixelpositionen im Bildraum entsprechend ihrer Kalibrierungsdaten korrigiert, anschließend über die Elemente der äußeren Orientierung in den Objektraum projiziert und dort mit einer geometrischen Fläche (z.B. einer Horizontalebene oder einem DGM) zum Schnitt gebracht. Während die Projektion eines Bildpunktes in den Objektraum direkt berechenbar ist, kann die Rückprojektion eines Punktes vom Objektraum in den Bildraum nur iterativ durchgeführt werden und ist unter Umständen mehrdeutig. Ein Resampling auf ein regelmäßiges Stützpunktraster im Objektraum liefert wieder eine Rasterbilddarstellung, vgl. Abb. 1 und 2. Die zunächst unregelmäßig im Objektraum verteilten Punktpositionen werden hier über eine *Delaunay*-Triangulation topologisch strukturiert, vgl. (Hoschek und Lasser 1992). Warum ist diese Vorgehensweise vorteilhaft? Bei kleinen bis mittleren Drehwinkeländerungen bleiben Nachbarschaftsbeziehungen der Pixel im Bildraum, also zwischen den einzelnen Aufnahmezeilen, auch nach der Projektion in den Objektraum gültig, vgl. Abb. 1. Initialisiert man die Triangulation stets mit genau dieser Annahme, so ist der verbleibende Rechenaufwand bis zur endgültigen Triangulationslösung nicht mehr groß. Bei starken Drehwinkeländerungen wie in Abb. 2 sind die erforderlichen Änderungen ge-

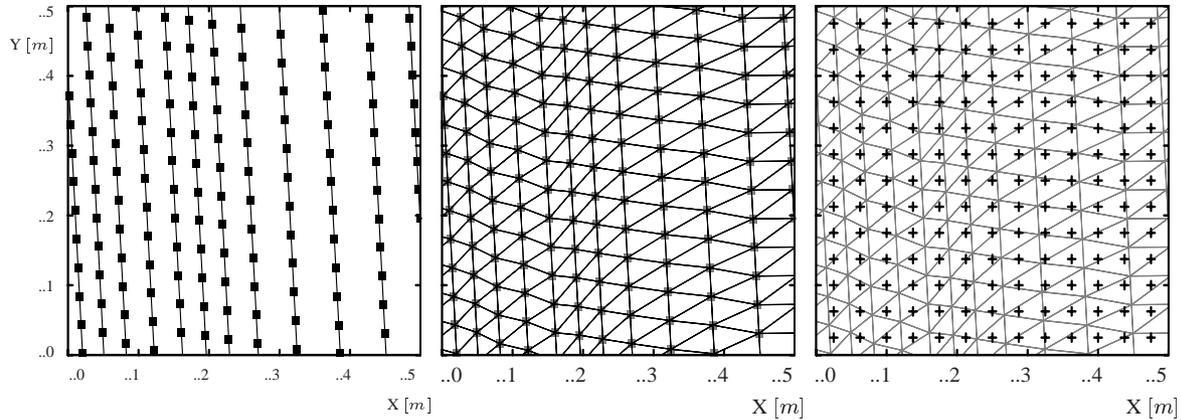


Abb. 1: Beispiel für die geometrische Entzerrung bei mittleren Drehwinkeländerungen. (a): Sensorzeilen und Pixelpositionen eines Bildausschnitts nach der Projektion in den Objektraum. (b): Delaunay-Triangulation der Pixelpositionen. (c): Resampling auf ein regelmäßiges Raster im Objektraum.

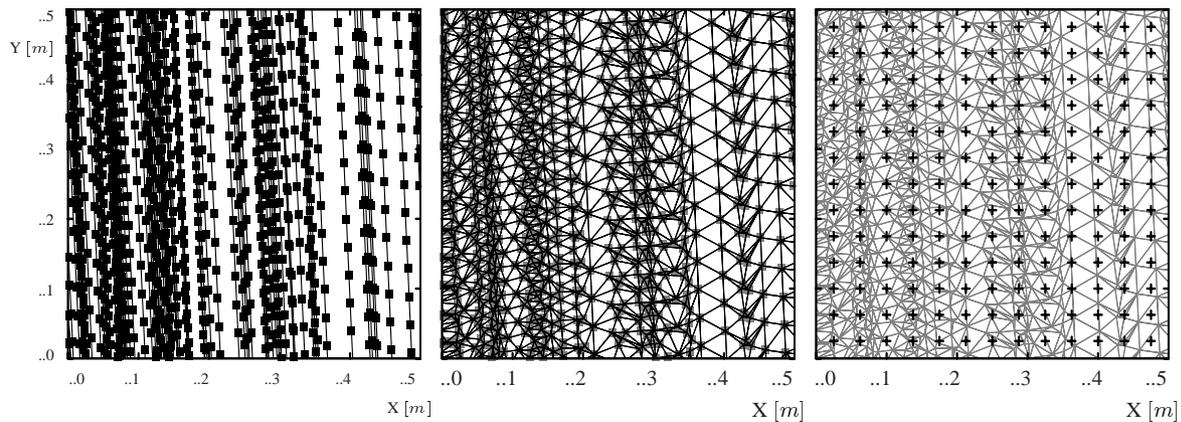


Abb. 2: Beispiel für die geometrische Entzerrung bei starken Drehwinkeländerungen. (a): Sensorzeilen und Pixelpositionen eines Bildausschnitts nach der Projektion in den Objektraum. (b): Delaunay-Triangulation der Pixelpositionen. (c): Resampling auf ein regelmäßiges Raster im Objektraum.

genüber der Initialtriangulation aber erheblich. Nun zählt sich aus, daß bezüglich der Verteilung der einzelnen Punkte keinerlei Prämissen eingeführt wurden. Daher wird stets die optimale Lösung gefunden, selbst wenn sich beispielsweise die Abbilder einzelner Sensorzeilen im Objektraum schleifend kreuzen, vgl. Abb. 2.

3 Ergebnisse der DPA-Befliegung 'Frankfurt-West'

Abb. 3 gibt einen Überblick über einen der beiden Flugstreifen der Befliegung 'Frankfurt-West'. Der Ortskundige erkennt Hofheim am Taunus im zentralen Bildbereich. Mit der mittleren Flughöhe von $3000m$ über Grund erhält man eine durchschnittliche Pixelgröße am Boden von $\approx 37.5cm$ bei einer nutzbaren Streifenbreite von etwas mehr als $4km$.

Als erste Kontrolle einer Befliegung bietet sich eine geometrische Vorentzerrung an, die zunächst vollständig auf die Einbeziehung von Verknüpfungs- und Paßpunktinformationen



Grauwertrohdaten (12 000 × 24 000 Pixel)
 ⇒ Flugrichtung ⇒



Geometrische Entzerrung

Abb. 3: Beispiel für die geometrische Entzerrung eines gesamten Flugstreifens.

verzichtet und auch Driftfehler der Inertialmeßeinheit vorläufig außer Acht läßt. Die Entzerrung in Abb. 4, sie zeigt einen Abschnitt der Autobahn A66, wurde unter diesen Annahmen berechnet und zeigt ein auf den ersten Blick plausibles Ergebnis.



Bildausschnitt (560 × 800 Pixel²) mit
 extremen Änderungen $\Delta\phi(t)$ und $\Delta\omega(t)$



Geometrische Entzerrung auf eine Horizontalebene
 im Objektraum

Abb. 4: Ausschnitte aus Abb. 3.

Zur Bestimmung der endgültigen absoluten Orientierungen wurden seitens des BKG Frankfurt a.M. pro Flugstreifen jeweils 9 natürliche Paßpunkte via DGPS mit Genauigkeiten unter $\pm 10\text{cm}$ bestimmt und bereitgestellt. Die auf dieser Basis am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart durchgeführte Bündelausgleichung konnte leider die hohen Erwartungen an die geometrische Genauigkeit nicht vollends bestätigen, es verblieben Restfehler in der Größenordnung von ca. 3-5 Pixeln. In der Folgezeit konnten drei potentielle Ursachen ausgemacht werden, deren Beseitigung ein zumindest pixelgenaues Ergebnis erwarten läßt. Sie sollen kurz diskutiert werden.

Die Sensorzeilen des panchromatischen Aufnahmesystems der DPA-Kamera bilden keine physikalische Einheit, sondern bestehen aus je zwei CCD-Zeilen à 6000 Pixeln, wobei sowohl für die drei links- als auch für die drei rechtsseitigen Sensorzeilen ein eigenes Objektiv vorgesehen ist, vgl. (Müller 1991). An der 'Nahtstelle' zwischen jeweils zwei zugehörigen Sensorbausteinen ergibt sich somit die Möglichkeit für eine einfache Plausibilitätskontrolle der Kamerakalibrierungsdaten durch die Grauwertprojektion in den Objektraum. Bei einer der drei Blickrichtungen wurde ein Kalibrierungsfehler in der Größenordnung von

ca. 2-3 Pixeln nachgewiesen. Effekte dieser Art sind durchaus keine Ausnahme: So belegen beispielsweise (Jacobsen 1997) für IRS-1C und (Kornus et al. 1998) für MOMS-2P die Notwendigkeit einer Inflight-Kalibrierung als Ergänzung zur Laborkalibrierung um das Genauigkeitspotential der jeweiligen Sensoren ausschöpfen zu können.

Im Unterschied zu satellitengetragenen Kameras sind bei flugzeuggetragenen digitalen Aufnahmesystemen gerade die hochfrequenten Anteile der Winkelgeschwindigkeiten und -beschleunigungen von besonderer Bedeutung. Sie sind vor der Driftbereinigung von den eher niederfrequenten Anteilen abzuspalten und *posteriori* wieder unverfälscht zu ergänzen. Zu große Orientierungspunktabstände bei der Umsetzung der Bündelausgleichung haben sich bei einem der beiden betrachteten Flugstreifen im Falle extremer Winkeländerungen negativ auf das Gesamtergebnis ausgewirkt – mit einer ausreichenden Anzahl von Verknüpfungspunkten und adäquat gewählten Orientierungspunktabständen sollte dieses Problem nicht mehr auftreten.

In seiner Gesamtwirkung schwer abgrenzbar ist die dritte Fehlerquelle, die in einem (inzwischen seitens der DASA behobenen) hardwaretechnischen Ausfall eines Bits bei der Datenübertragung seitens der Inertialmeßeinheit bestand, vgl. (Haala et al. 1998).

Diese Erfahrungen belegen, daß sich die Lösung der Orientierungsaufgabe für flugzeuggetragene Dreizeilenscanner bei angemessenen Genauigkeitsansprüchen stets auf eine integrierte Lösung unter Einbeziehung von Paßpunkten, DGPS-Daten, IME-Daten und photogrammetrischen Verknüpfungen stützen sollte. Dabei vereinfachen DGPS-Koordinaten das automatisierte Auffinden homologer Punkte erheblich. Im Gegenzug sichern die gewonnenen Verknüpfungen die direkten Orientierungsbeobachtungen in geeigneter Art und Weise ab. Die redundanten Beobachtungen stehen bei Bedarf auch für eine Nachbesserung der Laborkalibrierung über einen Selbstkalibrierungsansatz im Sinne der photogrammetrischen Bündelausgleichung zur Verfügung.

4 Stereobetrachtung und DGM-Rekonstruktion

Eine stereoskopische Betrachtung der digitalen Flugzeugscannerdaten ist ohne Vorentzerung in der Regel nicht möglich, vgl. (Brand et al. 1997). Das Problem des Übergangs auf zeilenweise Epipolarbilder wird hier, im Gegensatz zu strikt bildraumorientierten Verfahren wie beispielsweise bei (Dörstel und Ohlhof 1996), mit Blick auf den Objektraum gelöst. Bedingt durch eine mehr oder weniger unregelmäßige Flugbahn lassen sich aus Dreizeilenscannerbildern – im Gegensatz zum analogen Luftbild – keine Epipolarbilder bei völliger Unkenntnis des Oberflächenverlaufs im Objektraum berechnen. Abb. 5 zeigt den Grund: Bei Flugrichtung in X resultiert aus den Verschiebungen ΔY_O und ΔZ_O des Projektionszentrums zwischen der Aufzeichnung eines Bodenpunktes im Vor- und im Rückblick eine Restparallaxe Y_P nach der Projektion in den Objektraum. Die Größenordnung der lokalen Restparallaxen kann bereits durch die Vorgabe eines relativ groben, stark geglätteten Digitalen Oberflächenmodells (= 'glatte Approximation' in Abb. 5) auf den Subpixelbereich reduziert werden. Die Genauigkeitsansprüche für das grobe DOM sind in der Regel so gering, daß die Objektrauminformation aus der Orientierungsphase oder das Ergebnis einer vollautomatisch durchgeführten digitalen Bildzuordnung auf einer höheren (4.–8.) Bildpyramidenstufe vollkommen ausreicht.

In den resultierenden zeilenweisen Epipolarbildern verbleiben nur die Höhendifferenzen des wahren Oberflächenverlaufs gegenüber der stark geglätteten DOM-Vorgabe als Paralla-

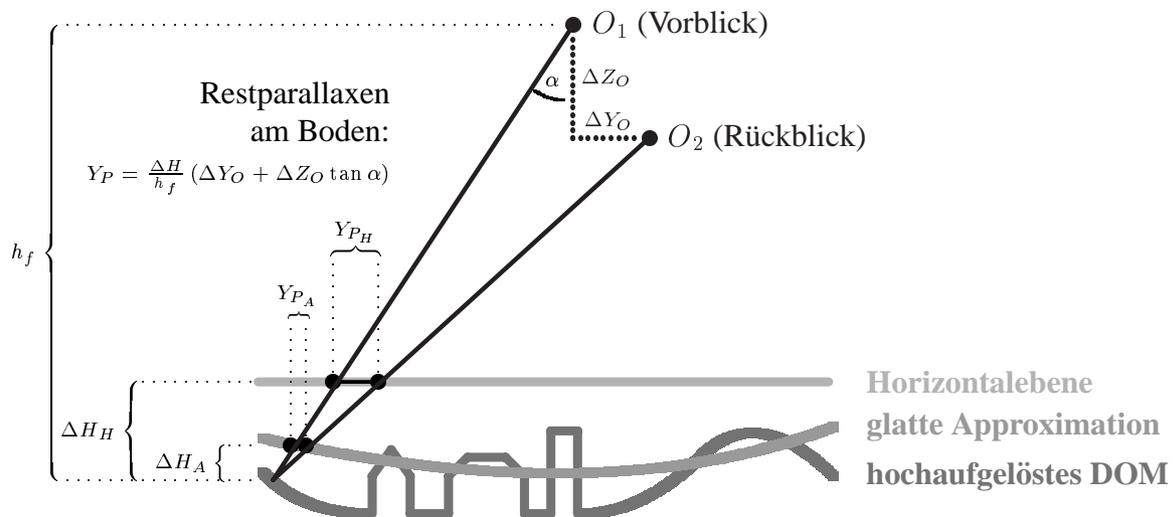


Abb. 5: Restparallaxen bei der Vorentzerrung in Abhängigkeit von der Flugbahn und dem vorgegebenen Digitalen Oberflächenmodell (DOM).

xeninformation. Die endgültige Auswertung kann dann beispielsweise interaktiv am Stereoschirm erfolgen. Der bei Versuchen zur interaktiven Gebäudeerfassung mit der HELAVA-DPW 770 erzielte visuelle Stereoeindruck steht dem eines Luftbildpaares in nichts nach, durch das äußerst geringe Grauertrauschen sind auch starke Ausschnittsvergrößerungen noch bequem betrachtbar.

Weiterhin ermöglicht die nun vorliegende Epipolarbildgeometrie auch den Einsatz einer Reihe von kommerziellen Softwareprodukten für die automatische Oberflächenrekonstruktion, welche auf der Epipolargeometrie aufbauen. Am BKG wurde experimentell mit den Programmen ARCOS, vgl. (Boochs und Hartfiel 1989), für das bereits die satellitengestützte Zeilenabtastergeometrie (MOMS) realisiert ist, und der HELAVA-DPW 770 gearbeitet. Die HELAVA-DPW 770 wurde im Luftbildmodus eingesetzt, wobei nur festgelegte Streifenabschnitte von ca. 6000×12000 Pixeln für die Rekonstruktion Verwendung fanden, um die oben genannten Probleme mit der absoluten äußeren Orientierung zumindest lokal in den Griff zu bekommen. Die Objektkoordinaten aus der Bildzuordnung wurden a posteriori von der unterstellten Luftbildgeometrie über die Zeilenabtastergeometrie der Epipolarbilder in die ursprüngliche Zeilenabtastergeometrie zurückgerechnet, um zu korrekten absoluten Koordinaten im ursprünglichen System der äußeren Orientierung zu gelangen. Diese Umrechnung erfolgt über die bekannten Abbildungsgleichungen. Abb. 6 zeigt das Ergebnis dieser Verarbeitungskette, wobei der berechneten Oberflächengeometrie das ebenfalls aus den DPA-Daten ermittelte digitale Orthobild überlagert wurde.

5 Wertung und Ausblick

Obwohl bei der Auswertung der DPA-Befliegung 'Frankfurt-West' die angestrebte geometrische Genauigkeit in der Größenordnung eines Pixels nicht erreicht wurde, hat sich das Konzept der Dreizeilenkamera insgesamt als erfolgreich erwiesen. Die verantwortlichen Fehlerquellen ließen sich sehr scharf eingrenzen und wurden, soweit sie hardwaretechnischer Natur waren, inzwischen seitens der DASA beseitigt. Die Auswertung einer erneuten Befliegung vom Spätherbst 1998 ist zur Zeit in Bearbeitung.

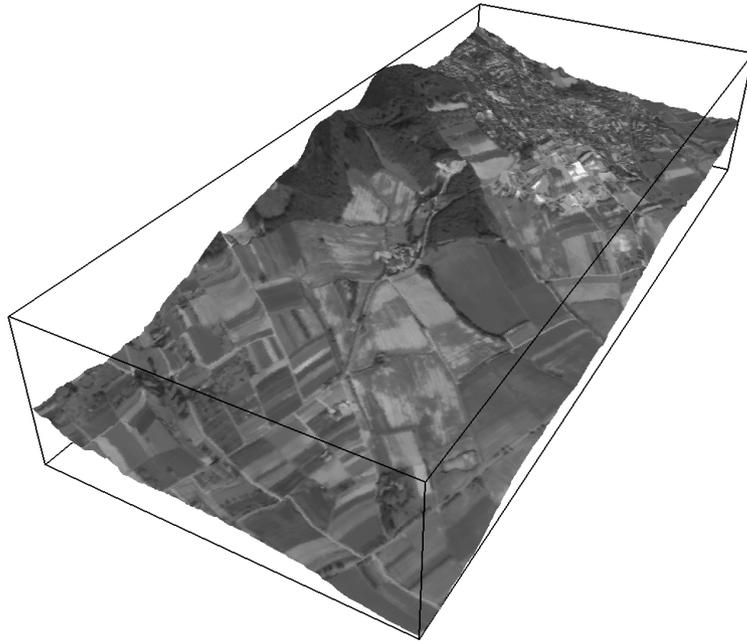


Abb. 6: Oberflächenrekonstruktion Kelkheim.

Trotz der angesprochenen Probleme konnte die photogrammetrische Verarbeitungskette bis hin zur interaktiven Auswertung am Stereoschirm bzw. zu den Endprodukten *Digitales Orthobild* und automatisch generiertes *Digitales Oberflächenmodell* erfolgreich aufgebaut und erprobt werden. Insgesamt gesehen stellt die digitale Dreizeilentechnik das mittelfristig erfolgversprechendste Konzept einer digitalen Luftbildkamera dar. Es wird als wünschenswert erachtet, daß das BKG die Entwicklung digitaler Luftbildkameras weiterhin aktiv mitgestaltet, um auch in Zukunft den Anforderungen eines modernen Geodatenzentrums gewachsen zu sein.

Literatur

- Albertz, J. (1998): *The geometric restitution of line scanner imagery – three decades of technical development*. In *Festschrift Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c.mult. Gottfried Konecny zur Emeritierung*, Bd. 227 von *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover*, S. 25–34.
- Boochs, F.; P. Hartfiel (1989): *Festigung von Sicherheit und Zuverlässigkeit der DGM-Bestimmung bei Einsatz der Bildkorrelation*. *Bildmessung und Luftbildwesen (BuL)* 57(3): 103–112.
- Brand, R.; T. Ohlhof; M. Stephani (1997): *Processing of 3-line imagery on a digital photogrammetric workstation*. In McKeown, Jr., D. M.; J. C. McGlone; O. Jamet, Hrsg., *Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision III*, Bd. 3072, S. 2–10. *Proceedings of SPIE*, Orlando, Florida.
- Dörstel, C.; T. Ohlhof (1996): *Processing and display of three-line imagery at a digital photogrammetric workstation*. In *ISPRS 18th Congress*, Bd. IAPRS 31(B2) Comm. II, S. 72–77. Wien.
- FEZ (1997): *Kurzinformation zur Durchführung der DPA-Befliegung*. Fernerkundungszentrum Potsdam GmbH. Internet: <http://www.fez-potsdam.de/projekte/dpa97/index.html>.

- Haala, N.; D. Stallmann; M. Cramer (1998): *Calibration of directly measured position and attitude by aerotriangulation of three-line airborne imagery*. In *ISPRS Comm. III Symposium 'Object Recognition and Scene Classification from Multispectral and Multisensor Pixels'*, Bd. IAPRS 32(3/1), S. 23–30. Columbus, Ohio.
- Hofmann, O. (1986): *Dynamische Photogrammetrie*. *Bildmessung und Luftbildwesen (BuL)* 54(3): 3–19.
- Hofmann, O.; A. Kaltenecker; F. Müller (1993): *Das flugzeuggestützte, digitale Dreizeilenaufnahme- und Auswertesystem DPA – erste Erprobungsergebnisse*. In Fritsch, D.; D. Hobbie, Hrsg., *Photogrammetric Week '93*, S. 97–107. Wichmann, Karlsruhe.
- Hoschek, J.; D. Lasser (1992): *Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung*. Teubner, Stuttgart, 2. Aufl.
- Jacobsen, K. (1997): *Self-calibration of IRS-1C PAN-camera*. In *ISPRS Joint Workshop 'Sensors and Mapping from Space'*, S. 163–170. Hannover.
- Kornus, W. (1998): *Dreidimensionale Objektrekonstruktion mit digitalen Dreizeilenscannerdaten des Weltraumprojekts MOMS-02/D2*. Dissertation, TU München.
- Kornus, W.; M. Lehner; M. Schroeder (1998): *Geometric inflight calibration of the stereoscopic CCD-linescanner MOMS-2P*. In *ISPRS Comm. I Symposium 'Earth Observation Systems for Sustainable Development'*. Bangalore, Indien.
- Müller, F. (1991): *Photogrammetrische Punktbestimmung mit Bilddaten digitaler Dreizeilenkameras*. Dissertation, TU München, DGK C 372, München.

Dank

Ich bedanke mich bei Prof. Dr.-Ing. B.-S. Schulz (BKG Frankfurt am Main) und Prof. Dr.-Ing. F. Boochs (FH Mainz) für die vertrauensvolle und erfolgreiche Zusammenarbeit. Der intensive Austausch mit dem Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart und dem Institut für Optoelektronik des DLR Oberpfaffenhofen (Abt. Optische Fernerkundung) gestaltete sich äußerst fruchtbar. Weiterhin sei Prof. Dr.-Ing. H. Ebner, Dr.-Ing. O. Hofmann, Dr.-Ing. W. Kornus und Dr.-Ing. F. Müller (DASA) für ihre Bereitschaft zum offenen Gespräch herzlich gedankt.