

# Vom Digitalen Bild bis zum Orthofoto auf dem Laptop

Karsten Jacobsen  
Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen  
Universität Hannover  
jacobsen@ipi.uni-hannover.de

## Zusammenfassung

Durch die Entwicklung der digitalen Photogrammetrie und der PC's ist es heute kein Problem mehr, photogrammetrische Projekte vom Anfang bis zum Endprodukt auf dem Laptop zu bearbeiten. Der mit selbstentwickelten Programmen durchzuführende Arbeitsgang von der Bildkoordinatenbestimmung über die Blockausgleichung, die Bildzuordnung, die Bereinigung der Ergebnisse der Bildzuordnung bis zum Orthophoto wird beschrieben.

## 1. Einführung

In der Nahbereichsphotogrammetrie haben sich die digitalen Kameras mit Ausnahme von Objekten, bei denen die semantische Information die wichtigste Rolle spielt, weitgehend durchgesetzt. Bei Luftbildprojekten gibt es die ersten Anwendungen von mittelformatigen digitalen Kameras und 3-Zeilen-Kameras. Digitale Kameras sind von LH Systems und Z/I Imaging für das Jahr 2001 angekündigt. In der digitalen Luftbildphotogrammetrie werden zur Zeit normalerweise analoge Bilder gescannt.

Mit den Fortschritten der Rechnerentwicklung sind für digitale photogrammetrische Arbeitsstationen keine UNIX-Workstation mehr erforderlich und es werden zunehmend PC's eingesetzt. Heute ist es bereits möglich selbst Luftbilder mit 18 000 x 18 000 Pixeln auf einem Laptop auszuwerten und zu bearbeiten.

In der Universität Hannover wurden Programme entwickelt, die die Erfassung von Bildkoordinaten automatisch und rechnerunterstützt ermöglichen. Die Bestimmung der Bildorientierungen durch Bündelblockausgleichung oder die Nutzung direkt bestimmter Sensororientierungen stellt kein Problem dar. Basierend auf den Bildorientierungen und einzelnen Startpunkten auf der Objektoberfläche kann eine automatische Bildzuordnung zur Ableitung eines digitalen Höhenmodells (DHM) erfolgen. Die so ermittelten DHM's beschreiben die sichtbare Oberfläche, enthalten somit den Einfluß der Vegetation und von Gebäuden. Um die Geländeoberfläche zu ermitteln müssen sie noch überarbeitet werden, was weitgehend durch automatische Analyse der Oberfläche erfolgen kann.

Basierend auf den DHM's können digitale Orthophotos erstellt werden, die heute schon sehr häufig das Endprodukt der photogrammetrischen Auswertung darstellen.

## 2. Digitale Bilder

Panchromatische Luftbilder haben eine Auflösung von etwa 40 lp/mm. Die Relation der fotografischen Auflösung zur Pixelgröße ist kontrastabhängig und im Detail komplex. Praktische Vergleiche der Detailererfassung haben gezeigt, daß ein Linienpaar etwa 2 Pixeln entspricht. Einfache theoretische Ableitungen führen zu anderen Verhältnissen, bei digitalen Auswertungen kann jedoch der Kontrast lokal optimiert werden, was zwar auch mit Kontrastausgleichsgeräten bei fotografischen Produkten möglich ist, jedoch in

der Regel zu geometrischen Genauigkeitsverlusten führt, da die verfügbaren Kontrastausgleichsgeräte keinen ausreichenden Filmandruck gewährleisten.

Mit 80 Pixeln/mm, entsprechend 12.5µm/Pixel, hat somit ein panchromatisches Luftbild einen Informationsgehalt, der 18 000 x 18 000 Pixeln entspricht. Derartige digitale Kameras sind zur Zeit nicht verfügbar. LH Systems entwickelt in Zusammenarbeit mit der DLR eine 3-Zeilen-Kamera (Fricker u.a. 2000), die panchromatisch 24 000 Pixel und multispektral 12 000 Pixel enthalten wird. Geometrisch sind diese Bilder jedoch von der direkt bestimmten Sensor-Orientierung abhängig, die heute auf eine Standardabweichung der Objektkoordinaten von etwa +/-20cm beschränkt ist. Z/I Imaging entwickelt eine Kombination von großflächigen CCD-Flächensensoren, die panchromatisch 8 000 x 14 000 Pixel haben wird (Tang u.a. 2000).

Bislang dominiert in der Luftbildanwendung das Scannen von Bildern. Selbst wenn Desktop Publishing Scanner teilweise eine ausreichende Auflösung aufweisen, sollten sie nicht für photogrammetrische Anwendungen eingesetzt werden, da ihre geometrische Genauigkeit meist auf +/- 50µm beschränkt ist (Jacobsen u.a. 1998, Baltsavias, E. 1999). Die radiometrische Qualität der Luftbildscanner ist im Laufe der Jahre besser geworden, heute dominieren die Scanner mit einer radiometrischen Auflösung von 12 bit, die auch für eine verlustfreie direkte Objektabbildung erforderlich ist.

## **2. Sensororientierung**

Durch Kombination Inertialer Meßsysteme (IMU) und relativer kinematischer GPS-Positionierung kann die Orientierung der Luftbildkamern direkt bestimmt werden. Nur zur Ermittlung der Orientierung des IMU in Relation zur Luftbildkamera (misalignment) ist noch eine kontrollierte Bündelblockausgleichung erforderlich. Die bislang vorliegenden Ergebnisse sind erfolgversprechend (Jacobsen 2000), sind aber noch nicht für alle Anwendungen ausreichend und haben keinerlei Zuverlässigkeitsinformationen. Selbst organisatorische Fehler, wie ein Versatz der Bildnummern, können erst über das abgeleitete Produkt, zum Beispiel durch das Matchen von Orthofotos festgestellt werden. Aus diesem Grund bietet sich hier die kombinierte Blockausgleichung an, die mit einem Minimum an Paßpunkten durchgeführt werden kann. Das ist zwar bei Blöcken auch alleine mit Projektionszentren, bestimmt durch kinematische GPS-Positionierung, möglich, nicht jedoch bei Bildstreifen. Außerdem hat die Kombination von GPS und IMU den Vorteil, daß die bei kinematischer GPS-Positionierung unvermeidlichen Cycle-Slips aufgedeckt werden und so keine streifenabhängigen systematischen Fehler auftreten. Querstreifen erübrigen sich damit.

Der traditionelle Weg der Bestimmung der Bildorientierung durch Bündelblockausgleichung ist zur Zeit das Standardverfahren. Hierfür ist die Bestimmung korrespondierender Bildpunkte, der Verknüpfungspunkte, und die Bestimmung der Bildkoordinaten von Paßpunkten erforderlich. Die Verknüpfungspunkte lassen sich durch automatische Bildzuordnung bestimmen. Hierfür wurde in der Universität Hannover das Programm MEPAS (Wang 1994) entwickelt, das zu einem Kernmodul von ERDAS OrthoBase weiterentwickelt wurde, dieses arbeitet mit dem Betriebssystem Windows NT bzw. Windows 2000. Bei Pixelgrößen von 24µm wird damit eine Standardabweichung der Bildkoordinaten von durchschnittlich 9µm erreicht. Kleinere Pixelgrößen führen nur zu unwesentlichen Genauigkeitssteigerungen. Obwohl dieses Verfahren auf einem Interestoperator basiert, lassen sich systematische Fehler nicht vermeiden. Besonders bei

großmaßstäbigen Luftbildern wirkt sich die Wanderung von Gebäudeschatten bei der Verknüpfung benachbarter Bildstreifen negativ aus.

Die Deutsche Steinkohle (DSK) bestimmt die durch Kohleabbau verursachten Bodenbewegungen durch Bündelausgleichung von Blöcken mit 60% Querüberdeckung und einer Querbefliegung mit 30% Querüberdeckung. Als Referenzobjekte werden Kanaldeckel in den bebauten Gebieten benutzt. Hier ist der Einsatz einer automatische Aerotriangulation nicht sinnvoll da ohnehin in den einzelnen Meßbildern bis zu 600 Kanaldeckel enthalten sind. Für ihre automatische Bestimmung wurde das digitale Meßsystem DPLX von der Universität Hannover entwickelt (Pollak u.a. 2000). Unter Nutzung der genäherten Objektkoordinaten aus vorangehender Epoche werden die Kanaldeckel in den digitalen Bildern identifiziert und deren Zentren mittels eines Ellipsenoperators berechnet. Für die automatische Identifizierung der Kanaldeckel sind Pixel von 12µm Größe erforderlich, ein digitales Bild hat somit eine Größe von 340 Mb. Um trotz dieser Bildgröße mit normalen PC's arbeiten zu können, werden die Bilder gekachelt – es wird jeweils nur mit einem Bildausschnitt gearbeitet. Für ein Projekt zur automatischen Bestimmung von Sandoberflächen für Erosionsauswirkungen mittels digitaler Bilder, aufgenommen mit einer Kodak DCS 560, wurde DPLX zu einem allgemeinen Bildmeßsystem weiterentwickelt.

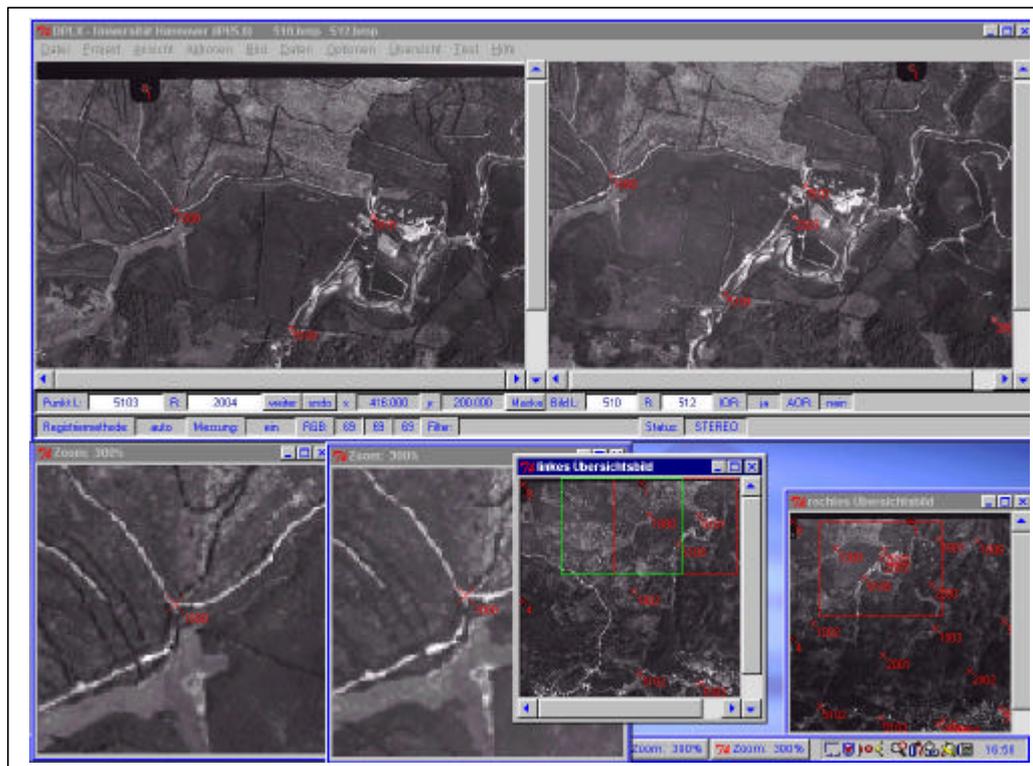


Abbildung 1

Oberfläche des Bildkoordinatenerfassungssystems DPLX

In Abbildung 1 ist die Oberfläche von DPLX dargestellt. Die Einzel Fenster sind frei positionierbar. Rechts unten sind die beiden Übersichtsfenster zu sehen, oben die Bildausschnitte in Originalgröße und links unten die Zoomfenster in denen normalerweise manuell oder automatisch mittels eines Ellipsenoperators gemessen wird.

Die Bündelblockausgleichung mit dem hannoverschen Programmsystem BLUH ermöglicht die kombinierte Blockausgleichung mit Projektionszentrenkoordinaten und auch die Bestimmung des IMU-Misalignment. Auf den heute üblichen PC's ist eine Ausgleichung von bis zu 4000 Bildern und 200 000 Objektpunkten, die in jeweils in bis zu 50 Bildern abgebildet sein können, kein Problem. Die extrem kurzen Rechenzeiten von BLUH machen sich hier positiv bemerkbar.

### **3. Ermittlung digitaler Höhenmodelle**

#### **3.1 Automatische Bildzuordnung**

Die traditionelle manuelle Messung digitaler Höhenmodelle in analytischen oder digitalen Stereoauswertestationen ist sehr zeitaufwendig. Sie hat zwar den Vorteil, daß die Geländeoberfläche direkt bestimmt und morphologische Gesichtspunkte stärker berücksichtigt werden, ist aber im offenen Gelände mit ausreichendem Kontrast nicht genauer als die automatische Bildzuordnung. In der Universität Hannover wurde eine Reihe von Bildzuordnungsprogrammen und -modulen entwickelt. Im Einsatz befinden sich die Programme MEPAS IC (Wang 1994), DPCOR, das auf den Entwicklungen von C. Heipke (Heipke u.a. 1993) basiert und das von W. Linder in der Universität Düsseldorf mit Unterstützung der Universität Hannover entwickelte Modul in LISA-FOTO (Linder 1999). MEPAS IC arbeitet mit Bildpyramiden, einer Strukturzuordnung und Interestoperator, ist damit in der Lage die Bildzuordnung ohne genäherte Bildorientierung und ohne Startpunkte durch Korrelation und Kleinste-Quadrate-Zuordnung zu ermitteln. DPCOR und LISA-FOTO arbeiten dagegen mit korrespondierenden Bildpunktkoordinaten als Startpunkte. Sie benötigen keine Bildpyramiden da ausgehend von den Startpunkten die jeweiligen Nachbarkpunkte in allen Richtungen einander zugeordnet werden (region growing) bis keine weitere Zuordnung wegen vorhandener Unstetigkeiten möglich ist. Unstetigkeitsstellen werden von anderen Startpunkten ausgehend oder auf einem anderen Weg umgangen. DPCOR ermittelt die korrespondierenden Punkte nach einer Korrelation nach der Methode der kleinsten Quadrate. In MEPAS-FOTO wird nach der Korrelation eines Stützpunktrasters eine morphologische Korrektur angebracht – die Geländeneigung wird berücksichtigt – und danach erfolgt eine erneute Bildkorrelation der so differentiell umgebildeten Bilder.

Die Ergebnisse aller drei Verfahren führen in der Praxis zu sehr guten Resultaten. LISA-FOTO ist sehr robust und einfach zu bedienen und ist als Grundlage für die Erstellung von Orthofotos ausgelegt. Die beiden anderen Verfahren haben Vorteile bei der Subpixelgenauigkeit.

#### **3.2 Bereinigung Digitaler Höhenmodelle**

Die automatische Bildzuordnung liefert die Höhen der sichtbaren Oberfläche und nicht die des Geländes. Außerdem sind einzelne Fehlzuordnungen nicht auszuschließen. Die manuelle Überarbeitung digitaler Höhenmodelle ist sehr zeitaufwendig. Besonders großmaßstäbige Bilder in bebauten Gebieten weisen viele Punkte auf Gebäuden und der Vegetation auf. Zur Bereinigung digitaler Höhenmodelle wurden deswegen die Programme DTMCOR und RASCOR entwickelt. DTMCOR kann DHM's mit unregelmäßig verteilt liegenden Punkten, wie sie von MEPAS IC und DPCOR erstellt werden, bearbeiten, während RASCOR auf ein DHM mit rastermäßiger Anordnung beschränkt ist. Da bei RASCOR die Punktzuordnung einfacher durchzuführen ist, benötigt es deutlich geringere Rechenzeiten.

Beide Programme können die minimal und maximal zulässige Höhe beschränken, was durch eine Häufigkeitsanalyse der Punkthöhen unterstützt wird. In RASCOR wird anschließend der Höhenunterschied benachbarter Punkte in X- und Y-Richtung untersucht. Wird ein Schwellwert überschritten, wird der höhergelegene Punkt

entfernt. Anschließend kann in RASCOR eine ausgleichende Gerade in X- und Y-Richtung mit wählbarer Länge und geländeabhängigem Grenzwert berechnet werden. Für die Entfernung von Punkten, die zu große Höhenunterschiede gegenüber der ausgleichenden Geraden aufweisen ist ein Data Snooping nach Baarda erforderlich, da bei fehlenden Punkten die Redundanzanteile zu unterschiedlich sind. Auf diese Weise werden kleinräumige, durch Vegetation hervorgerufene Störstellen beseitigt. Beide Programme arbeiten anschließend mit einer gleitenden Schrägebene und einer darauffolgenden Prädiktion, wobei allerdings nur die Punkte im Zentrum der Untersuchungsfläche endgültig entfernt werden. Punkte unterhalb der Geraden, Schrägebene oder Prädiktionsfläche erhalten ein höheres Gewicht, da es ansonsten dazu kommen kann, daß die Punkte nicht die Geländeebene, sondern eine höhergelegene Ebene repräsentieren.

Für Detailauswertungen ist zusätzlich noch eine manuelle Bereinigung erforderlich. Die Programme haben bei sehr umfangreichen Anwendungen durch BAE Systems ADR, Pennsauken, USA die durchschnittlichen Bereinigungszeiten nach der Bildkorrelation von 7 Stunden auf 1 Stunde je Modell reduziert.

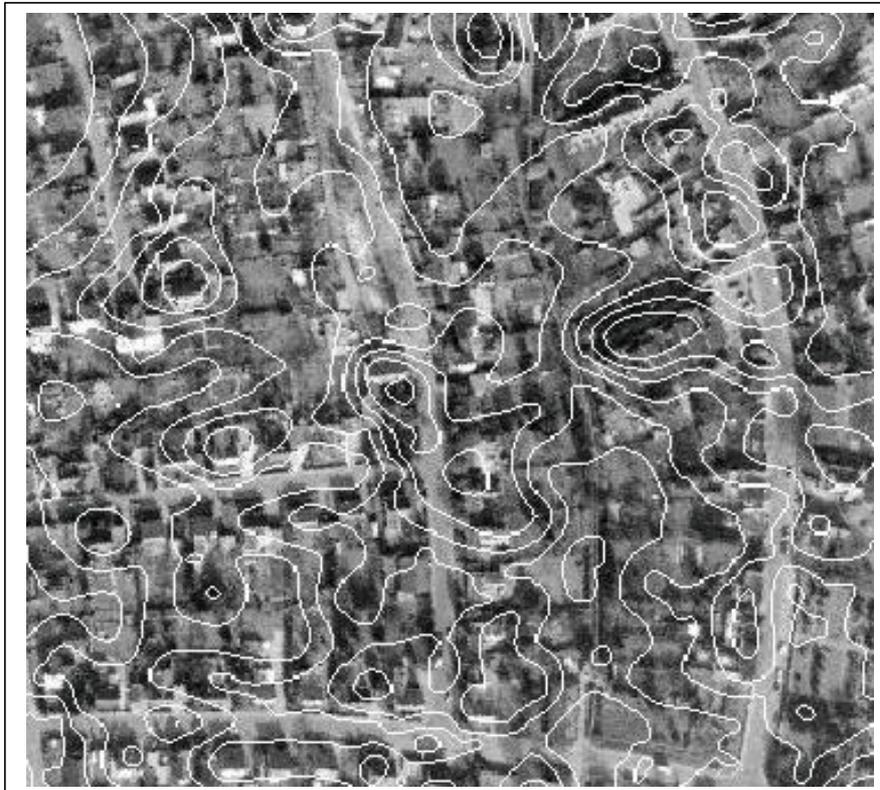


Abbildung 2:

Höhenunterschiede zwischen einem bereinigten und einem unbereinigten DHM in bebautem Gebiet  
Äquidistanz = 1m

Allgemein werden 40 – 60% der korrelierten Punkte entfernt, die meisten Punkte durch die gleitende Schrägebene. Bei stark bewegtem Gelände ist die Prädiktion von grundlegender Bedeutung. Die Einführung einer minimalen und maximalen akzeptierten Höhe führt nur bei relativ ebenem Gelände zum Erfolg.

#### **4. Erstellung von Orthofotos**

Die Erstellung digitaler Orthofotos stellt heute eine Standardaufgabe dar, die in jedem Softwarepaket für die digitale Photogrammetrie enthalten ist. In der Universität Hannover ist sie u.a. durch das Programm OPHO gelöst, auch in LISA-FOTO ist ein Orthofoto-Modul enthalten. Ebenso sind Schräg- oder Perspektivansichten eine

Grundaufgabe, die keinen großen Aufwand darstellt, wenn bereits ein Orthofoto und ein DHM vorhanden ist. In LISA-FOTO ist eine linien- und punktförmige Auswertung möglich. OPHO arbeitet in Verbindung mit ARC-Info und ARC-View, womit auch dort die weitere Auswertung gewährleistet ist.

## 5. Schlußfolgerung

Die Handhabung photogrammetrischer Aufgaben auf einem PC und damit auch einem Laptop stellt heute kein Problem dar. Mit der von der Universität Hannover und der Universität Düsseldorf entwickelten Software sind keine teuren kommerziellen Programme erforderlich um von digitalen Bildern bis zum Orthofoto den ganzen Arbeitsfluß durchzuführen. Die entwickelten Programme sind praxisreif und werden bereits außerhalb der Universitäten eingesetzt.

## Literatur

- Baltsavias, E. (1999): On the Performance of Photogrammetric Scanners, Photogrammetrische Woche 99, Wichmann Verlag
- Fricke, P., Sandau, R., Walker, S. (2000): Development of Airborne Digital Sensor for Photogrammetric and Remote Sensing Applications, ASPRS Annual Convention, Washington 2000
- Heipke, C., Kornus, W. (1993): Nicht-semantische Auswertung digitaler Bilddaten – praktische Durchführung an Beispielen einer SPOT Stereoszene, ZPF 61 (3), S. 122 – 130, 1993
- Jacobsen, K., Gaffga, R. (1998): Geometric and Radiometric Investigation of the Photogrammetric Image Scanner Rastermaster RM1, GIM 1998 (7), S. 6 - 9
- Jacobsen, K. (2000): Potential and Limitation of Direct Sensor Orientation, IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam 2000
- Linder, W. (1999): Geo-Informationssysteme, Springer Verlag 1999
- Pollak, B., Jacobsen, K. (2000): Automatic Measurement of Sewer Man-Holes in Large Scale Aerial Images, IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam 2000
- Tang, L., Dörstel, C., Jacobsen, K., Heipke, C., Hinz, A. (2000): Geometric Accuracy Potential of the Digital Modular Camera, IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam 2000
- Wang, Y. (1994): Strukturzuordnung zur automatischen Oberflächenrekonstruktion, Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 207, 1994