

Automatische Bestimmung von Verknüpfungspunkten in HRSC-Bildern der Mars Express Mission

RALPH SCHMIDT, CHRISTIAN HEIPKE, Hannover; RÜDIGER BRAND, München;
GERHARD NEUKUM und das HRSC Co-Investigator Team

Keywords: photogrammetry, planetary, camera, matching, scanner, three-line

Zusammenfassung: Die genaue Bestimmung der äußeren Orientierung ist eine Grundvoraussetzung jeglicher photogrammetrischen Verarbeitung. Die Aufgabe stellt sich für Daten der HRSC auf Mars Express anders dar als für Bilder der Erdoberfläche. Variable Parameter wie Bildtextur, Kontrast, Datenkompression, optische Dichte und Qualität der äußeren Orientierung erschweren oftmals die Prozessierung der Bilddaten. In diesem Artikel beschreiben wir unsere Arbeit zur automatischen Bestimmung von Verknüpfungspunkten aus HRSC-Bildern der Mars Express Mission. Wir berücksichtigen die speziellen Randbedingungen der Mission, wie die besondere Geometrie der Kamera und Orbits, die obigen Einflussgrößen auf die Bilddaten, sowie eine stabile und laufzeitoptimierte Software zur operationellen und effizienten Verarbeitung großer Mengen von Bilddaten.

Summary: *Automatic determination of tie points in HRSC images of the Mars Express mission.* The accurate determination of the exterior orientation is a basic requirement for every photogrammetric processing. This task is posed differently for imagery of the HRSC on Mars Express than for imagery of the earth's surface. Variable parameters like image texture, contrast, data compression, optical depth and quality of the exterior orientation often complicate the processing of the images. In this paper we describe our work on automatic image matching for tie point generation using HRSC imagery. We consider special mission constraints like the particular geometry of the camera and the orbits, above influencing parameters, as well as a stable and run-time optimised software for operational and efficient processing of large amounts of image data.

1 Einleitung

Die HRSC (*High Resolution Stereo Camera*) an Bord der europäischen Sonde Mars Express liefert mit ihren neun Zeilensensoren hoch auflösende stereoskopische Bilddaten zur Erzeugung präziser DGMs (Digitale Geländemodelle) und farbiger Orthophotos und Orthophotomosaiken. Einen Überblick über die Mission und eine detaillierte Beschreibung der Kamera ist in NEUKUM et al. (2004) nachzulesen.

Das *Flight Dynamics Team* (FDT) vom ESOC (*European Space Operations Centre*) in Darmstadt berechnet die dreidimensionale Position der Sonde fortwährend mit Hilfe

von Doppler- und Entfernungsmessungen. Der Sternensensor und die Kreisel an Bord der Sonde richten die Lage gemäß der Aufnahmeplanung aus. Eine direkte Messung der Lage findet nicht statt. Diese Werte für Position und Lage können als genäherte äußere Orientierung in der klassischen Photogrammetrie angesehen werden. Es hat sich gezeigt, dass die absolute Genauigkeit der Orbitdaten im Bereich von 100 bis 1500 Metern liegt. Die relative Genauigkeit innerhalb eines Streifens ist dagegen deutlich höher.

Diese Daten der äußeren Orientierung können sowohl in ihrer relativen als auch in ihrer absoluten Genauigkeit verbessert werden. Die photogrammetrische Auswer-

tung erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) der Universität Hannover durch digitale Bildzuordnung automatisch Verknüpfungspunkte bestimmt. Diese Punkte nutzt das Fachgebiet für Photogrammetrie und Fernerkundung (FPF) der TU München als direkte Beobachtungen in einer Bündelausgleichung.

In Kapitel zwei dieser Arbeit werden die angewendeten Methoden der photogrammetrischen Punktbestimmung und der digitalen Bildzuordnung vorgestellt. In Kapitel drei werden die Ergebnisse der Bildzuordnung und die erzielten Genauigkeiten präsentiert und diskutiert. Die Methodik der Bündelausgleichung ist im Artikel von SPIEGEL et al. (2005) beschrieben.

2 Photogrammetrische Punktbestimmung und digitale Bildzuordnung

Das Prinzip der Punktübertragung von Objekt- zu Bildkoordinaten bei 3-Zeilen-Scannern wird in BRAND et al. (1997) erläutert. Ausgangspunkt sind die erweiterten Kollinearitätsgleichungen für 3-Zeilen-Scanner (EBNER et al. 1994), die den Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten x , y und Objektkoordinaten X , Y , Z beschreiben:

$$\begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{pmatrix} = \lambda M^T(\Delta\varphi, \Delta\omega, \Delta\kappa) \cdot D^T(\varphi, \omega, \kappa) \left[\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_0 + \Delta X_0 \\ Y_0 + \Delta Y_0 \\ Z_0 + \Delta Z_0 \end{pmatrix} \right] \quad (1)$$

Die äußere Orientierung bezieht sich auf ein Kamera-Koordinatensystem, welches für alle CCD-Zeilen gemeinsam definiert ist. Für einen bestimmten Auslesezyklus n ist die äußere Orientierung durch X_0 , Y_0 , Z_0 , φ , ω , κ gegeben. Die innere Orientierung ist durch die drei Parameter x_0 , y_0 , c pro CCD-Zeile im Bildkoordinatensystem definiert. Zusätzlich wird in einer geometrischen Kalibrierung für jede CCD-Zeile die Transformation zwischen dem Bild- und dem Kamerakoordinatensystem, gegeben durch ΔX_0 ,

ΔY_0 , ΔZ_0 , $\Delta\varphi$, $\Delta\omega$, $\Delta\kappa$, bestimmt. M und D sind Rotationsmatrizen, λ ist ein Maßstabsfaktor.

Die vor der Mission in einem Labor der Firma Dornier, Friedrichshafen, bestimmte innere Orientierung der HRSC wurde während der sechsmonatigen Reise zum Mars durch Sternenbeobachtungen überprüft. Bisher konnten keine Abweichungen festgestellt werden, so dass die innere Orientierung als stabil betrachtet wird.

Die Bildzuordnung folgt einer „vom Groben ins Feine“-Strategie (TANG & HEIPKE 1996), d. h. das Bildzuordnungsergebnis wird schrittweise mit Hilfe von Bildpyramiden verbessert. Als Eingangsdaten werden die HRSC-Bilder, die vom ESOC bestimmten Daten der äußere Orientierung, die im Folgenden als Beobachtungen interpretiert werden, und die Kalibrierungsdaten der inneren Orientierung benötigt. Ein DGM des Mars, welches aus Daten des MOLA-Instruments abgeleitet wurde (NEUMANN et al. 2003), wird als weitere Näherungsinformation genutzt.

Zu Beginn werden Punktmerkmale mit Hilfe des Förstner-Operators (FÖRSTNER 1986) extrahiert, und die Bilder werden paarweise in allen Kombinationen zugeordnet, wobei der Kreuzkorrelationskoeffizient als Ähnlichkeitsmaß dient (*Feature Based Matching*, FBM). Um Mehrdeutigkeiten und Rechenzeit zu reduzieren, werden bei der Übertragung eines Merkmals von einem Bild zum nächsten eine Näherungsposition (X , Y , Z), wobei Z anfangs aus dem MOLA-DGM kommt, und ein Suchraum für den korrespondierenden Punkt berechnet. Da für 3-Zeilen-Scanner keine Epipolargeometrie existiert, wird ein Merkmal von einem Bild zum nächsten nach Formel (1) transformiert. Die beobachteten Orientierungsparameter liegen als Funktion der Bildzeilen (Auslesezyklus) n vor. Für die Transformation vom Objekt- zum Bildkoordinatensystem muss eine zusätzliche Bedingung (2) erfüllt sein, wobei x in Flugrichtung zeigt:

$$x(n) = x(n, X, Y, Z, X_0(n), Y_0(n), Z_0(n), \varphi(n), \omega(n), \kappa(n)) \quad (2)$$

Diese Nullstellensuche kann mit der bekannten Newton-Methode iterativ gelöst werden, wobei die Ableitung $x'(n_i)$ aufgrund der lückenlosen Abtastung durch die Pixelgröße des Bildes ersetzt werden kann:

$$n_0 = \text{Initialisierungswert für die Bildzeile}$$

$$n_{i+1} = \frac{n_i - x(n_i)}{\text{Pixelgröße}} \quad i = 0, 1, \dots \quad (3)$$

Zur Bestimmung von Punkttupeln aus den zugeordneten Punktepaaren wird ein ungegerichteter Graph aufgebaut; die Knoten des Graphen werden aus den Punktmerkmalen und die Kanten aus den Zuordnungsverbindungen abgeleitet. Dieser Graph wird in Zusammenhangskomponenten unterteilt. Im nächsten Schritt werden die Punkttupel gebildet, wobei ein Tupel dadurch charakterisiert ist, dass nur ein Merkmal pro Bild zugelassen wird. Die Komplexität dieses Problems kann allerdings exponentiell wachsen. Anstatt Suchbäume oder Binärsuche anzuwenden, wird ein RANSAC (*Random Sample Consensus*) Algorithmus (FISCHLER & BOLLES 1981) verwendet (BRAND & HEIPKE 1998). Diese Methode beruht auf der Tatsache, dass die Wahrscheinlichkeit, eine gute Konfiguration (richtiges Tupel) durch zufällige Auswahl von Beobachtungen (Merkmal eines Teilgraphen) zu treffen, nach einer bestimmten Zahl von Versuchen sehr hoch ist.

Um das Bildzuordnungsergebnis weiter zu verfeinern, wird anschließend *Multi Image Least Squares Matching* (MI-LSM) nach dem Ansatz von KRUPNIK (1994) durchgeführt, in dem die Verknüpfungspunkte in allen Bildern gleichzeitig zugeordnet werden. Dabei wird auch eine Grauwertanpassung der Bildausschnitte vorgenommen, was insbesondere bei geringer Textur wichtig ist. Da *Least Squares Matching* (LSM) das genaueste bekannte Bildzuordnungsverfahren ist, kann das Ergebnis des FBM verbessert werden. In unserer Implementierung kann pro Pyramidenlevel entschieden werden, ob MI-LSM angesetzt werden soll oder nicht. Um Rechenzeit zu sparen, ist es nach unserer Erfahrung zweckmäßig, nur auf der letzten Ebene (Originalauflösung) MI-LSM durchzuführen.

Am Schluss werden auf jeder Ebene der Bildpyramide durch Vorwärtseinschneiden der Bildkoordinaten der zugeordneten Verknüpfungspunkte Modellpunkte berechnet. Diese dienen in der nächst unteren Ebene als Näherungsinformation zur Suchraumminimierung. Auf der höchsten Ebene wird das MOLA-DGM für diese Aufgabe verwendet. Eine detailliertere Beschreibung des Bildzuordnungsverfahrens ist in HEIPKE et al. (2004) beschrieben.

3 Auswertung von HRSC Bildern

In diesem Abschnitt werden zuerst die ausgewerteten HRSC-Bilder beschrieben. Die Ergebnisse der Bildzuordnung werden im zweiten Teil auf Basis der Orbits 912, 923, 934 sowie eines Blocks aus diesen Streifen präsentiert und diskutiert.

3.1 Daten

In jeder CCD-Zeile der HRSC werden 5176 Pixel genutzt, welche im Perizentrum auf der Marsoberfläche eine Breite von etwa 65 km abdecken. Die Streifen können aus bis zu 300.000 Zeilen bestehen und einen Bereich auf der Oberfläche von 4000 km in Flugrichtung überdecken. Aufgrund einer limitierten Übertragungsbandbreite zwischen Mars und Erde kann nur der Nadir-Kanal mit der vollen Auflösung empfangen werden. An Bord wird die Auflösung der zwei Stereokanäle im Allgemeinen um einen Faktor von 2, die der restlichen Kanäle um einen Faktor von 4 reduziert. Um die gleiche Skalierung der Kanäle zu erreichen wird der Nadir-Kanal für die Bildzuordnung auf die Auflösung der Stereokanäle mit einem Gauß-Filter umgerechnet. Außerdem werden die Bilder mit einer diskreten Kosinustransformation (DCT) – bekannt von der JPEG-Kompression – komprimiert. Abhängig von der überdeckten Marsregion zeigen die Bilder Bereiche mit guter Textur und Bereiche mit sehr geringem Kontrast (Abb. 1). Die Lage des gezeigten Ausschnitts ist als weißes Rechteck in Abb. 3 zu erkennen.

Die vorliegende Untersuchung beruht auf Bildstreifen der Orbits 912, 923, 934, die je-



Abb. 1: Oben: Ausschnitt aus Orbit 912 mit guter Textur. Unten: Histogramm aus Bildregion mit niedrigem Kontrast.

weils ca. 80000 Zeilen umfassen, was in etwa 1300 km auf der Marsoberfläche entspricht. Die maximale Auflösung am Boden beträgt 12 m. Da sich diese Orbits überlappen, ist auch eine Auswertung als Block möglich, wobei die Querüberdeckung von 0 bis ca. 25 Prozent schwankt (s. Abb. 2). Die Bildzuordnung wurde mit den original Level-2 Daten (ROATSCH 2000) durchgeführt, d. h. es erfolgte keine geometrische Vorkorrektur der Bilder. Die mittlere Flughöhe der Sonde über der Marsoberfläche beträgt während der Datenaufzeichnung ca. 300 km, so dass die Kamera keinen atmosphärischen Turbulenzen ausgesetzt ist und somit keine hochfrequenten Bildschwankungen entstehen. Die Bildzuordnung wird aber dennoch durch geometrische Verzerrungen aus Maßstabsunterschieden, unterschiedlichen Aufnahmeorientierungen und Belichtungszeiten erschwert. Die Bodenaufklärung der drei Orbits beträgt ca. 24 bis 47 Meter in den Ste-

reokanälen, wobei die Nadir-Kanäle in der vollen Auflösung eigentlich 11 bis 20 Meter liefern.

3.2 Ergebnisse

In einer ersten Auswertung wird die Verteilung der Verknüpfungspunkte im Bildstreifen/Block analysiert. Es hat sich gezeigt, dass unter Verwendung der vom ESOC gelieferten äußeren Orientierung bei der Streifenverknüpfung zwischen den Orbits 912 und 923 nicht genügend 6-Strahlpunkte gefunden werden. Dies ist damit zu erklären, dass die Differenzen zwischen den beobachteten Orientierungen und den tatsächlichen Werten größer sind als der Konvergenzradius unseres Algorithmus. Daraus hat sich die Strategie entwickelt, die relativ und absolut verbesserten Ergebnisse der drei Einzelstreifen (EBNER et al. 2004) für die Bildzuordnung im Blockverband zu verwenden. Durch diese Maßnahme konnte die Streifenverknüpfung erheblich verbessert werden, so dass nun ausreichend 6-Strahlpunkte zur Verfügung stehen. Der Plot in Abb. 2 zeigt eine gleichmäßige Verteilung der Verknüpfungspunkte über den gesamten Block mit einer sehr guten Verknüpfung zwischen den Orbits. Zum Vergleich ist in Abb. 3 auch das Orthophotomosaik abgebildet, das u. a. mit der vom DLR entwickelten Software erzeugt wurde (s. Beitrag SCHOLTEN et al., dieses Heft). Es ist allerdings auch zu bemerken, dass das Bildmaterial in diesem Gebiet von ausgezeichneter Qualität bezüglich Bildtextur, Kontrast, Datenkompression und optische Dichte ist. Viele andere Orbits weisen deutlich schlechtere Bedingungen auf, so dass die Bildzuordnung hier nicht so viele gleichmäßig verteilte Punkte erzielen konnte.

Als nächstes werden die Strahlenschnitte der Verknüpfungspunkte analysiert, wobei die vom ESOC bestimmten Werte der äußeren Orientierung fehlerfrei eingeführt werden. Dieses Vorgehen kann als Vorwärtsschnitt betrachtet werden. Die erreichten Werte werden mit den Ergebnissen der Bündelausgleichung verglichen, bei der für φ und κ jeweils ein Bias für die ganze Bahn

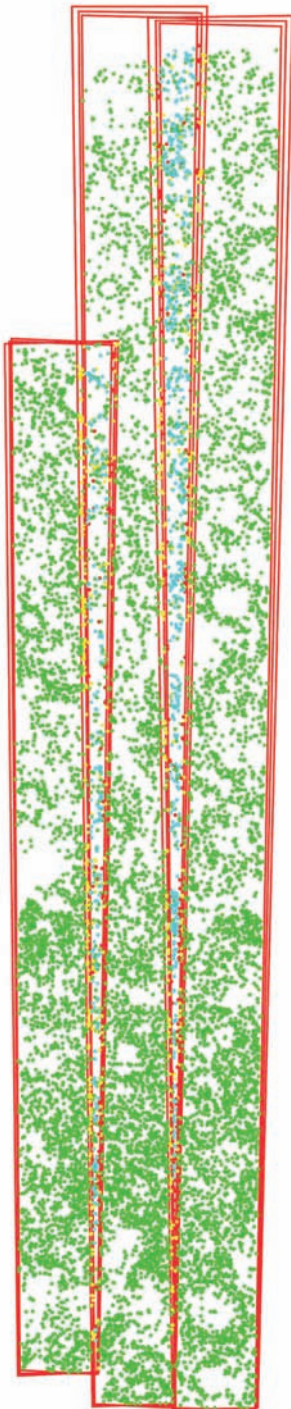


Abb. 2: Verteilung der Verknüpfungspunkte in den Orbits 912, 923, 934 (ohne 2-Strahlpunkte).
● 13027 3-Strahlpunkte, ● 632 4-Strahlpunkte
● 246 5-Strahlpunkte, ● 724 6-Strahlpunkte



Abb. 3: Mosaik der Orbits 912, 923, 934.

Tab. 1: Theoretische Standardabweichung der Objektkoordinaten

Orbit	σX [m]	σY [m]	σZ [m]
912	35,3/11,3	31,9/10,1	108,2/33,8
923	29,3/10,9	27,0/9,9	90,0/33,0
934	22,8/9,6	22,5/9,1	72,4/29,5
Block	30,8/11,0	28,5/9,9	96,5/33,5

geschätzt wird. Ein Bias für ϕ und κ wird eingeführt, da nur diese zwei Parameter durch die alleinige Nutzung der Verknüpfungspunkte verbessert werden können. Der Bias für die anderen vier Orientierungsparameter X_0 , Y_0 , Z_0 und ω kann nur durch Passinformation bestimmt werden.

Tab. 1 zeigt die Genauigkeiten der Objektkoordinaten der Strahlenschnitte für die ausgewählten Orbits. Der linke Wert ist die Standardabweichung der Strahlenschnitte mit der vom ESOC gegebenen äußeren Orientierung. Der rechte Wert zeigt die für die Strahlenschnitte erreichte theoretische Standardabweichung nach der Verbesserung von ϕ and κ . Die Standardabweichung aller untersuchten Orbits liegt im Bereich von etwa 10 m in X und Y. Die Z Genauigkeiten von allen Orbits liegen im Bereich von etwa 33 m. Die Standardabweichung der Strahlenschnitte wird um den Faktor 2 bis 3 verbessert. Bei einer angenommenen Bodenauflösung von 25 m wird eine abschließende Genauigkeit von etwa 0,4 Pixel in X und Y und 1.2 Pixel in Z erreicht.

Insgesamt wurden bis zum jetzigen Zeitpunkt (Mai 2005) von 312 prozessierten Orbits 236 erfolgreich bearbeitet. Bei den verbleibenden 76 Orbits ließ sich aufgrund von fehlerhaften Bildern (14 Orbits), geringer Textur (15x), zu kurzen Streifen (17x), Datenlücken (5x) oder Limb-Aufnahmen (25x) (für Untersuchung der Atmosphäre oder der zwei Monde Phobos und Deimos) kein Ergebnis erzielen. Statistisch gesehen hat sich gezeigt, dass die relative Genauigkeit aller Orbits unter Anbringung eines Bias in ϕ und κ immer um einen Faktor 2 bis 3 verbessert werden kann.

4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen die Effizienz der Ansätze der Bildzuordnung zur automatischen Erzeugung der Verknüpfungspunkte. Im erläuterten Beispiel waren die Verknüpfungspunkte mit einer hohen Anzahl von 3-Strahlpunkten gleichmäßig über den ganzen Bildstreifen verteilt. Die Streifenverknüpfung innerhalb eines Blockverbands aus drei Streifen hat eine hohe Zahl von 6-Strahlpunkten ergeben, so dass eine stabile Verknüpfung erzielt worden ist. Es wurde eine Genauigkeit von 0,4 Pixel in der Lage und 1,2 Pixel in der Höhe erreicht, was einer Verbesserung der relativen Genauigkeit um den Faktor 2 bis 3 gegenüber den beobachteten Orientierungswerten entspricht. Diese Ergebnisse sind nicht nur exemplarisch anhand eines Bildstreifens erzielt worden, sondern wurden während der Mission für bisher 312 prozessierte Orbits erreicht, was den erfolgreichen operationellen Einsatz der entwickelten Software demonstriert.

In Zukunft wird durch die steigende Überdeckung verstärkt die Auswertung von größeren Blöcken möglich sein. Insbesondere für geologische und geophysikalische Analysen und Auswertungen, aber auch für Präsentationszwecke werden größere DGMs und Orthophotomosaike benötigt. Um eine hohe Qualität und homogene Daten zu erhalten, sind eine gute Verknüpfung und eine anschließende Bündelausgleichung absolut notwendig.

Danksagung

Diese Arbeit wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung durch das Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) unter dem Förderkennzeichen 50 QM 0104 gefördert.

Literatur

- BRAND, R., OHLHOF, T. & STEPHANI, M., 1997: Processing of 3-line imagery on a digital photogrammetric workstation. – In: MCKEOWN, Jr., D., M., MCGLONE, J.C. & JAMET O. (Hrsg.): Integrating Photogrammetric Techni-

- ques with Scene Analysis and Machine Vision III, (3072). – Proceedings of SPIE, Orlando, Florida: 2–10.
- BRAND, R. & HEIPKE, C., 1998: A system for automatic aerial triangulation. – *IntArchPhRS* **32** (2): 27–34.
- EBNER, H., KORNUS, W. & OHLHOF, T., 1994: A simulation study on point determination for the MOMS-02/D2 space project using an extended functional model. – *Geo-Informationssysteme* **7** (1): 11–16.
- EBNER, H., SPIEGEL, M., BAUMGARTNER, A., GIESE, B., NEUKUM, G., and the HRSC Co-Investigator Team, 2004: Improving the exterior orientation of Mars Express HRSC imagery. – *IntArchPhRS* **35**, B4: 852–857.
- FISCHLER, M.A. & BOLLES, R.C., 1981: Random Sample Consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. – *Communications of the ACM* **24** (6): 381–395.
- FÖRSTNER, W., 1986: A feature based correspondence algorithm for image matching. – *IntArchPhRS* **26** (3/3): 150–166.
- HEIPKE, C., SCHMIDT, R., BRAND, R., OBERST, J., NEUKUM, G. and the HRSC Co-Investigator Team, 2004: Performance of automatic tie point extraction using HRSC imagery of the Mars Express mission. – *IntArchPhRS* **35**, B4: 846–851.
- KRUPNIK, A., 1994: Multiple-patch matching in the object space for aerotriangulation. – Technical Report 428, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus.
- NEUKUM, G., JAUMANN, R. and the HRSC Co-Investigator Team, 2004: Mars Express: The Scientific Payload, HRSC: the High Resolution Stereo Camera of Mars Express. – ESA Special Publication SP-1240: 17–35.
- NEUMANN, G.A., LEMOINE, F.G., SMITH, D.E. & ZUBER, M.T., 2003: The Mars Orbiter Laser Altimeter archive: Final precision experiment data record release and status of radiometry. – *Lunar Planet. Sci. XXXIV*, Abstract 1975, Lunar and Planetary Institute, Houston (CD-ROM).
- ROATSCH, T., 2000: HRSC Level-2 product description. – Interner Report, DLR, Berlin.
- SCHOLTEN, F. et al., 2005: Von Rohdaten aus dem Mars Express-Orbit zu Digitalen Geländemodellen und Orthobildern – Operationelle Verarbeitung von HRSC-Daten. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2005** (5): 365–372.
- SPIEGEL, M. et al., 2005: Bündelausgleichung von HRSC-Bilddaten mit Mars Observer Laser Altimeter-Daten als Passinformation. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2005** (5): 381–386.
- TANG, L. & HEIPKE, C., 2003: Automatic relative orientation of aerial images. – *PE&RS* (62) 1: 47–55.

Anschriften der Autoren:

Dipl.-Ing. RALPH SCHMIDT

Prof. Dr.-Ing. CHRISTIAN HEIPKE

Institut für Photogrammetrie und GeoInformation

Universität Hannover, Nienburger Str. 1

D-30167 Hannover

e-mail: (schmidt, heipke)@ipi.uni-hannover.de

Dipl.-Math.-techn. RÜDIGER BRAND

ESG Elektroniksystem-und Logistik-GmbH

Einsteinstraße 174, D-81675 München

e-mail: rbrand@esg-gmbh.de

Prof. Dr. GERHARD NEUKUM

Freie Universität Berlin, Institut für Geologische

Wissenschaften/Planetologie

Malteserstr. 74–100, D-12249 Berlin

e-mail: gneukum@zedat.fu-berlin.de

Manuskript eingereicht: Juni 2005

Angenommen: Juli 2005