

## Bündelausgleichung von HRSC-Bilddaten mit Mars Observer Laser Altimeter-Daten als Passinformation

MICHAEL SPIEGEL, UWE STILLA, München, BERND GIESE, Berlin, GERHARD NEUKUM und das HRSC Co-Investigator Team

**Keywords:** photogrammetry, extra-terrestrial, three-line sensor orientation, bundle adjustment, DTM

**Zusammenfassung:** Dieser Beitrag beschreibt einen Ansatz zur Verbesserung der Parameter der äußeren Orientierung für die *High Resolution Stereo Camera* (HRSC), die sich an Bord der europäischen Mission Mars Express befindet. Eine Herausforderung bei der photogrammetrischen Auswertung der Marsbilder ist die geringe Anzahl an vorhandenen Passpunkten, welche in den Bildern auf einfachem Weg identifiziert und gemessen werden können. Deshalb werden *Mars Observer Laser Altimeter* (MOLA)-Daten als Passinformation in Form von Passflächen in der Bündelausgleichung mit HRSC Bildern verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass der Ansatz operationell auf alle HRSC-Szenen anwendbar ist.

**Summary:** *Bundle adjustment of HRSC image data using Mars Observer Laser Altimeter data as control information.* This paper presents an approach to improve the exterior orientation parameters of the High Resolution Stereo Camera (HRSC) mounted on European Mars Express Mission. A challenge of photogrammetric processing of Mars imagery is the low number of Ground Control Points which can be identified and measured in the images in the usual way. Therefore, *Mars Observer Laser Altimeter* (MOLA) data is employed as control information in the bundle adjustment of HRSC images. The concept for the photogrammetric point determination with the principle of three-line camera is described and results will be given. The results show the operational use to all HRSC scenes.

---

### 1 Einleitung

Die ESA Mission Mars Express mit der *High Resolution Stereo Camera* (HRSC) an Bord befindet sich seit Anfang Januar 2004 im Orbit des Planeten Mars und nimmt seither Bilder der Planetenoberfläche auf. Die HRSC ist eine Zeilenkamera bestehend aus neun CCD Zeilensensoren zur gleichzeitigen Aufnahme von hoch aufgelösten Stereo- und Farbbilddaten. Im Allgemeinen erstreckt sich eine Szene über eine Länge von 300 bis 4000 km und überdeckt im Perizentrum eine Breite von 60 km quer zur Flugrichtung mit einer Bodenauflösung von 12,5 m. Zusätzlich wird die 3D-Position des Orbiter durch Dopplermessungen bestimmt

und die sich an Bord befindliche Sternekkamera liefert die Neigungskomponenten (Lagedaten) des Orbiters. Diese beobachteten Positions- und Lagedaten (äußere Orientierung) sind aber für eine optimale photogrammetrische Punktbestimmung nicht genau genug, so dass es notwendig ist, zuerst mit einem automatischen Bildzuordnungsverfahren homologe Punkte aus den Bildern zu extrahieren. Als Verfahren kommen hier das so genannte *Feature Based Matching* und das *Multi Image Least Squares Matching* zum Einsatz (SCHMIDT et al. 2005).

Die Aufgabe an der Technischen Universität München ist es, mithilfe der homologen Bildpunkte die äußere Orientierung der HRSC unter Verwendung von zusätzlicher

Passinformation zu verbessern. Dieses Verfahren wird in den nächsten Kapiteln näher beschrieben. Mithilfe der verbesserten äußeren Orientierungen werden nun Digitale Geländemodelle (DGMs) und Orthophotos erstellt (GWINNER et al. 2005). Auch kann das DGM nochmals verbessert werden, indem es mit dem bereits vorhanden MOLA-DGM kombiniert wird (ATTWENGER et al. 2005), und schließlich werden aufbauend auf den DGMs und den Orthophotos verschiedene Karten und Visualisierungen hergestellt (LEHMANN et al. 2005).

Von den bisher prozessierten 312 HRSC-Szenen können 228 Szenen photogrammetrisch ausgewertet werden. Die anderen 84 HRSC-Szenen sind für eine photogrammetrische Punktbestimmung mit dem vorgestellten Verfahren nicht geeignet. Gründe sind Schrägsichten (Limb-Aufnahmen), Aufnahmefehler, große oder zu viele Lücken in den Daten, zu kurze HRSC-Szenen sowie aufgenommene Gebiete mit schwacher Textur.

## 2 Konzept der Bündelausgleichung

In der Standardphotogrammetrie werden im Allgemeinen homologe Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte, innere Orientierung und Passpunkte für die Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung benötigt, wenn, wie am Mars, keine direkte Beobachtung der äußeren Orientierung mit GPS/INS möglich ist. Auch sind am Mars nur wenige Passpunkte vorhanden, die zudem in nur unzureichender Genauigkeit gegeben sind. Demnach ist zusätzliche Passinformation notwendig, um die durch die photogrammetrische Punktbestimmung abgeleiteten Objektpunkte in ein vorhandenes Referenzsystem einzupassen. Hierfür gibt es aus der Mars Global Surveyor Mission eine Vielzahl von MOLA Messungen, die als Passinformation heran gezogen werden können. Das Problem liegt allerdings darin, dass die Laserpunkte nicht auf herkömmliche Art in den Bildern identifiziert werden können, d. h. Bildkoordinaten der meisten Punkte können nicht gemessen und somit nicht als normale Passpunkte in die Bündel-

ausgleichung eingeführt werden. Der Ansatz verwendet daher als Kontrollinformation Passflächen, die aus den MOLA-Punkten abgeleitet werden.

### 2.1 Mathematisches Modell der Bündelausgleichung

In der Bündelausgleichung wird ein Konzept verwendet (HOFMANN 1982), welches sich auf so genannte Orientierungsbilder stützt. Dieser Ansatz schätzt die Parameter der äußeren Orientierung an nur wenigen ausgewählten Bildzeilen, den so genannten Orientierungsbildern. Die Werte der äußeren Orientierung der dazwischen liegenden Zeilen werden anhand der Orientierungsbilder interpoliert.

Das mathematische Modell für die photogrammetrische Punktbestimmung mittels einer Dreizeilenkamera basiert auf den bekannten Kollinearitätsgleichungen. Diese Gleichungen beschreiben die grundlegenden geometrischen Bedingungen, dass sich die Strahlen durch die drei korrespondierenden Bildpunkte und das korrespondierende Projektionszentrum im Objektpunkt schneiden. Für jede Bildkoordinate werden je zwei Kollinearitätsgleichungen (Gleichung 1) eingeführt. Für jeden Objektpunkt gibt es mehrere Bestimmungsgleichungen, da korrespondierende Bildpunkte in Bildern verschiedener Sensorzeilen gefunden werden.

$$\hat{x}_i = \frac{\hat{r}_{11}(\hat{X}_i - \hat{X}_0) + \hat{r}_{21}(\hat{Y}_i - \hat{Y}_0) + \hat{r}_{31}(\hat{Z}_i - \hat{Z}_0)}{\hat{r}_{13}(\hat{X}_i - \hat{X}_0) + \hat{r}_{23}(\hat{Y}_i - \hat{Y}_0) + \hat{r}_{33}(\hat{Z}_i - \hat{Z}_0)}$$

$$\hat{y}_i = \frac{\hat{r}_{12}(\hat{X}_i - \hat{X}_0) + \hat{r}_{22}(\hat{Y}_i - \hat{Y}_0) + \hat{r}_{32}(\hat{Z}_i - \hat{Z}_0)}{\hat{r}_{13}(\hat{X}_i - \hat{X}_0) + \hat{r}_{23}(\hat{Y}_i - \hat{Y}_0) + \hat{r}_{33}(\hat{Z}_i - \hat{Z}_0)} \quad (1)$$

mit

- $\hat{x}_i, \hat{y}_i$ : Bildkoordinaten des Punkts
- $c$ : Kammerkonstante
- $\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i$ : Koordinaten des Objektpunkts
- $\hat{X}_0, \hat{Y}_0, \hat{Z}_0$ : Projektionszentrum
- $\hat{r}_{11}, \dots, \hat{r}_{33}$ : Rotationsmatrix

Die Kollinearitätsgleichungen liegen nicht linear vor und müssen deshalb durch eine

Taylorentwicklung linearisiert werden. Alle Beobachtungen (Bildkoordinaten aus dem Matching) werden in der Kleinste-Quadrate-Ausgleichung zur Schätzung der Unbekannten (Parameter der äußeren Orientierung an wenigen Orientierungspunkten, Koordinaten der Objektpunkte) verwendet.

## 2.2 Bündelausgleichung mit Passinformation

Das von der NASA veröffentlichte gitterbasierte MOLA-DGM (NEUMANN et al. 2003), das aus Originallasermessungen abgeleitet wurde, wird derzeit als gültiges Referenzsystem am Mars angesehen. Es beschreibt die Oberfläche des Mars global und hat eine Lagegenauigkeit von 200 m und eine Höhen Genauigkeit von 10 m (abhängig von der Rauigkeit des Geländes). Lokal kann die durch vier MOLA-Gitterpunkte beschriebene Marsoberfläche als Passfläche aufgefasst werden, auf der die HRSC-Objektpunkte zu liegen kommen sollen (SPIEGEL et al. 2003).

Nachteilig bei diesem Ansatz ist, dass nicht die Originallasermessungen, sondern nur die interpolierten DGM-Punkte verwendet werden. Der Vorteil bei der Nutzung der Gitterpunkte liegt wegen der regelmäßigen Struktur in einem reduzierten Aufwand bei der Suche nach passenden benachbarten MOLA DGM Punkten.

Der Ansatz nutzt die Kleinste-Quadrate-Ausgleichung mit zusätzlichen Bedingun-

gen, um eine Beziehung zwischen dem MOLA-DGM und den HRSC-Punkten herzustellen. Die HRSC-Punkte sollen auf einer bilinearen Oberfläche ( $O_M$ ) liegen, die durch vier benachbarte MOLA-DGM-Punkte (M), welche den HRSC-Punkt umschließen, definiert ist. Diese Bedingung kann durch einen Zwang formuliert werden, dass die vertikale Distanz (d) zwischen HRSC-Punkt (H) und der Oberfläche ( $O_M$ ) Null sein soll. Des Weiteren kann dieser Zwang durch eine fiktive Beobachtung ersetzt werden, die als zusätzliche Beobachtung in die Ausgleichung eingeht.

Das mathematische Modell für die zusätzlichen Beobachtungsgleichungen ist in Gleichung 2 gegeben. Für jede Gleichung ergeben sich drei Unbekannte ( $\hat{X}_H, \hat{Y}_H, \hat{Z}_H$ ). Sie beinhaltet eine Beobachtung  $d = 0$  und zwölf Konstante ( $X_{M_i}, Y_{M_i}, Z_{M_i}, i = 1 \dots 4$ ). Die Standardabweichung  $\sigma_d$  wird durch die Genauigkeit der vier umliegenden MOLA-DGM-Punkte festgelegt. Damit ist die Implementierung in die Kleinste-Quadrate-Ausgleichung möglich.

$$\hat{v}_d + d = f(\hat{X}_H, \hat{Y}_H, \hat{Z}_H, X_{M_1}, Y_{M_1}, Z_{M_1}) \quad (2)$$

Mit diesem Ansatz kann eine Verbesserung der Höhe (Z) erreicht werden. Eine Verbesserung in der Lage (X, Y) kann ebenfalls ermittelt werden, wenn das Gelände in verschiedenen Richtungen genügend starke Neigungen in der jeweils genutzten bilinearen Oberfläche ( $O_M$ ) des MOLA-DGM aufweist. Abb. 1a zeigt die Situation vor der Ausgleichung. Während der Ausgleichung wird der Abstand (d) zwischen den HRSC-Punkten (H) und dem MOLA-DGM ( $O_M$ ) minimiert (Abb. 1b), was durch Verschiebungen sowohl in Z als auch in X und Y vonstatten geht. Abb. 1c zeigt das endgültige Ergebnis nach der Ausgleichung.

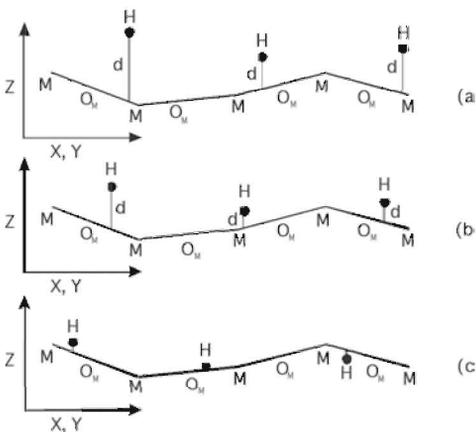
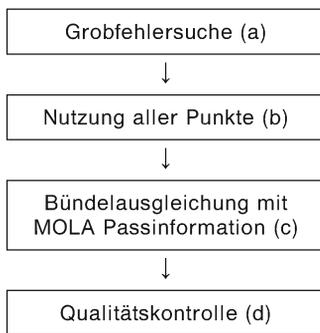


Abb. 1: MOLA als Passinformation.

## 3 Auswertestrategie

Die Auswertung einer HRSC-Szene gliedert sich in mehrere Schritte mit unabhängigen Ausgleichungen (Abb. 2). Diese Schritte behalten eine einfache Grobfehlersuche unter Nutzung weniger Punkte (a), unter Nutz-



**Abb. 2:** Auswertestrategie.

ung aller vorhandenen Punkte (b) und eine Bündelausgleichung unter Verwendung des MOLA-DGM als Passinformation, um die äußeren Orientierung zu verbessern (c). Die nach der Ausgleichung durchgeführte Qualitätskontrolle (d) beschließt den Auswertevorgang.

### 3.1 Grobfehlersuche

Bei der einfachen Grobfehlersuche werden unter Nutzung der Strahlengeometrie die beiden Drehwinkel  $\varphi$  und  $\kappa$  der HRSC verbessert, um grobe Fehler in den Bildkoordinaten zu identifizieren und zu eliminieren. Das DGM wird für diesen Schritt nicht eingeführt.

Im Fall von Mars Express bewegt sich die Kamera auf einer Satellitenbahn. Daher kann der Bahnverlauf als stabil betrachtet werden. Es wird außerdem unterstellt, dass der Teil des Bahn Bogens, in dem HRSC-Szenen aufgenommen werden, in erster Näherung einer relativ geraden Flugbahn entspricht. Liegen diese beiden Bedingungen vor, so kann allein durch Strahlenschnitte mit der Bündelausgleichung ein Bias der Drehwinkel  $\varphi$  und  $\kappa$  der HRSC aus der Strahlengeometrie bestimmt werden. Die Grobfehlersuche ist erforderlich, da die automatisch gematchten Bildkoordinaten in der Regel nicht fehlerfrei sind.

Um grobe Fehler zu eliminieren, werden im ersten Schritt nur Objektpunkte verwendet, die aus Strahlenbündel mit mindestens drei Bildkoordinatenpaaren gebildet werden. Der Vorteil liegt darin, dass wegen der

höheren Redundanz grobe Fehler einzelner Strahlen leichter detektiert werden können. Diese Maßnahme ist außerdem notwendig, da in Strahlenbündeln, die sich nur aus zwei Strahlen zusammensetzen, Höhenfehler auftreten können, die mithilfe der Strahlenschnitte selbst überhaupt nicht detektiert werden können. Im Normalfall sollte die Nutzung von Drei- und Mehrstrahlpunkten kein Problem darstellen, da in allen HRSC-Szenen mindestens drei Bilder vorhanden sind. Das Ergebnis ist ein Bias (Offset) der Drehwinkel  $\varphi$  und  $\kappa$  der äußeren Orientierung der HRSC und Bildkoordinaten, die keine groben Fehler enthalten.

### 3.2 Nutzung von allen fehlerfreien Punkten

Für die im obigen Schritt beschriebene Verbesserung der Drehwinkel  $\varphi$  und  $\kappa$  ist es nicht erforderlich, alle verfügbaren Punkte zu verwenden. Wird aber im folgenden Schritt eine gemeinsame Ausgleichung unter Verwendung des MOLA DGM als Passinformation genutzt, ist es sinnvoll, möglichst viele Objektpunkte in die Ausgleichung einzubringen. Als zusätzliche Objektpunkte dienen die bisher nicht verwendeten Zweistrahlpunkte. Um diese auf Schnittgenauigkeit verifizieren zu können, werden die in obigem Abschnitt gewonnenen Parameter der äußeren Orientierung (aus Drei- und Mehrstrahlpunkten) herangezogen, um Vorwärtsschnitte zu bilden. Nun werden aus den Zweistrahlpunkten diejenigen eliminiert, deren Bildkoordinatenverbesserungen einen vorgegebenen Schwellwert überschreiten. In diesem Schritt können jedoch grobe Fehler in Zweistrahlpunkten nicht detektiert werden, in denen sich die Fehler nicht auf den Strahlenschnitt auswirken, sondern nur die Höhekomponente (Z) verfälschen.

### 3.3 Verbesserung der äußeren Orientierung mit DGM als Passinformation

In diesem Schritt wird die HRSC-Objektpunkt wolke an das MOLA-DGM angepasst und Objektpunkte entfernt, die nicht

auf das DGM passen. Für die Anpassung ist es möglich und notwendig, noch mehr Parameter zu bestimmen. Dies sind zusätzlich zu den beiden Drehwinkeln  $\varphi$  und  $\kappa$  nun noch der Drehwinkel  $\omega$  und die Position  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , für die wieder ein Bias bestimmt wird.

Dass HRSC-Punkte nicht auf das DGM passen, kann verschiedene Ursachen haben. Zum einen kann es sich um fehlerhafte Punkte handeln, die bei den vorhergehenden Schritten nicht eliminiert wurden, weil sich ein grober Fehler nicht in der Verbesserung der Bildkoordinaten zeigt und somit der Fehler nur in die Höhenkomponente eingeflossen ist. Zum anderen können die HRSC-Punkte feine Strukturen der Marsoberfläche beschreiben, die im MOLA-DGM wegen dessen gröberer Auflösung nicht vorhanden sind, so dass einige Punkte nicht auf der Oberfläche des DGMs zu liegen kommen. Zeigt das Ergebnis nach der Ausgleichung bei einigen Punkten große Differenzen zwischen MOLA-DGM und HRSC-Punkten, so werden diese Punkte entfernt, und es wird eine neue Ausgleichung gerechnet. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis alle Punkte nur noch kleine Differenzen zum MOLA-DGM aufweisen. Das Ergebnis ist nun eine auf das MOLA-DGM angepasste äußere Orientierung.

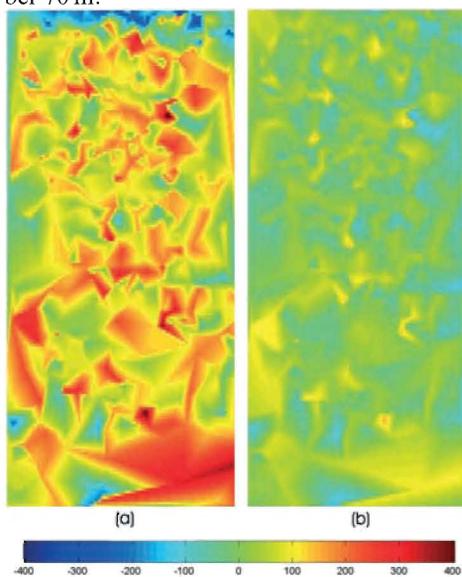
### 3.4 Qualitätskontrolle

Nach den Ausgleichungsschritten wird für jede HRSC-Szene eine Qualitätskontrolle durchgeführt. Die Kriterien für eine Anpassung der äußeren Orientierung werden durch den Bias festgelegt. So dürfen die folgenden Schwellwerte  $X < 100$  m,  $Y < 100$  m,  $Z < 20$  m,  $\varphi < 2$  mgon,  $\omega < 10$  mgon,  $\kappa < 2$  mgon der theoretischen Standardabweichungen des Bias nicht überschritten werden. Die Schwellwerte selbst ergeben sich aus dem DGM-Ansatz und der Aufnahmegeometrie. Werden diese Qualitätskriterien nur für  $\varphi$  und  $\omega$  erreicht, so wird die HRSC-Szene als teilweise erfolgreich orientiert klassifiziert. Werden auch diese Qualitätskriterien nicht erreicht, so ist eine Ausgleichung mit den vom Matching gelieferten Punkten nicht möglich.

## 4 Ergebnisse

Nach erfolgter Qualitätskontrolle konnten von den 228 ausgewerteten HRSC-Szenen 192 als erfolgreich an das MOLA-DGM angepasst klassifiziert werden, was 84% entspricht. Bei 12% konnte zwar eine Verbesserung der Genauigkeit der Drehwinkel  $\varphi$  und  $\kappa$  vorgenommen werden, allerdings ist eine Anpassung an das DGM nicht möglich. Bei weiteren 7% wurden entweder vom Matching Bildkoordinaten mit zu vielen groben Fehlern oder zu wenige Bildkoordinaten geliefert, was eine erfolgreiche Bündelausgleichung unmöglich macht. Für die erfolgreich prozessierten 192 HRSC Szenen sinkt die Standardabweichung der Position der äußeren Orientierung von 1000 m im Durchschnitt auf 30 m. Die Genauigkeit der Drehwinkel liegt nach der Ausgleichung bei 1–2 mgon.

Schließlich zeigt Abb. 3 die Differenzen in  $Z$  zwischen den Objektkoordinaten der HRSC-Punkte und dem MOLA-DGM vor der Ausgleichung (Abb. 3a) und die Restdifferenzen nach der Anpassung ans DGM (Abb. 3b). Der RMS der Differenzen liegt in diesem Beispiel vor der Ausgleichung bei 200 m und nach der Ausgleichung nur noch bei 70 m.



**Abb. 3:** Höhendifferenzen vor (a) und nach (b) der Ausgleichung.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem vorgestellten Verfahren die Verbesserung der äußeren Orientierung von fast allen HRSC-Szenen operationell möglich ist. Die äußere Orientierung wurde so verbessert, dass die Daten an das globale, durch MOLA repräsentierte Mars-Referenzsystem, angepasst sind.

Die in der Luftbildphotogrammetrie üblichen Bedingungen um Blockverbände zu bilden, sind auf dem Mars im Allgemeinen wegen der Satellitenkonfiguration nicht gegeben. Allerdings können Blöcke mit parallel aufgenommenen HRSC-Szenen gebildet werden. Erste Tests für die Ausgleichung von Blöcken (3–7 HRSC Szenen) zeigen, dass diese Ausgleichung erwartungsgemäß noch eine weitere Verbesserung der Ergebnisse bringt. Das Hauptaugenmerk bei den weiteren Untersuchungen liegt daher auf der Auswertung von Blöcken. Des Weiteren sollen die in dieser Ausgleichung verwendeten Parameter der inneren Orientierung (z. B. Kamerakonstante, Bildhauptpunktverschiebungen, Konvergenzwinkel) auf ihre Stabilität hin überprüft und die Verbesserung einzelner Parameter untersucht werden.

## Danksagung

Diese Arbeit wird durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) unter dem Förderkennzeichen 50 QM 0103 mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert.

## Literaturverzeichnis

- ATTWENGER, M. et al., 2005: Klassifikation von HRSC-Objektpunkten zur Generierung hochwertiger Geländemodelle der Marsoberfläche. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2005** (5): 395–402.
- GWINNER, K. et al., 2005: Hoch auflösende Digitale Geländemodelle auf der Grundlage von Mars Express HRSC-Daten. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2005** (5): 387–394.

LEHMANN, H. et al., 2005: Großmaßstäbige topographische und thematische Mars-Karten. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2005** (5) 423–428.

HOFMANN, O., NAVÉ, P. & EBNER, H., 1982: DPS – A digital photogrammetric system for producing digital elevation models and orthophotos by means of linear array scanner imagery. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 24-III: 216–227

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 and Planetary Science XXXIV*, Abstract 1778, Lunar and Planetary Institute, Houston.

SCHMIDT, R. et al., 2005: Automatische Bestimmung von Verknüpfungspunkten in HRSC-Bildern der Mars Express Mission. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2005** (5): 373–380.

SPIEGEL, M., BAUMGARTNER A. & EBNER H., 2003: Orientation of Mars Express/HRSC Imagery Using Laser Altimeter Data as Control Information. – *ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space 2003*, Hannover.

## Anschriften der Autoren:

Dipl.-Ing. MICHAEL SPIEGEL  
 Prof. Dr.-Ing. UWE STILLA  
 Photogrammetrie und Fernerkundung  
 Technische Universität München  
 Arcisstr. 21, D-80333 München  
 e-mail: (spiegel, stilla)@bv.tu-muenchen.de

Dr. BERND GIESE  
 Institut für Planetenforschung  
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
 e.V., Rutherfordstr. 2, D-12489 Berlin  
 e-mail: bernd.giese@dlr.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