

## Von Rohdaten aus dem Mars Express Orbit zu Digitalen Geländemodellen und Orthobildern – Operationelle Verarbeitung von HRSC Daten

FRANK SCHOLTEN, THOMAS ROATSCH, KLAUS GWINNER, KLAUS-DIETER MATZ, VOLKER MERTENS, JOACHIM FLOHRER, MARITA WÄHLISCH, BERND GIESE, RENE PISCHEL, JÜRGEN OBERST, RALF JAUMANN, Berlin; GERHARD NEUKUM und das HRSC-Co-Investigator Team

**Keywords:** photogrammetry, Mars Express, HRSC, multi-line scanner, planetary data acquisition, DTM, orthoimage

**Zusammenfassung:** Mars Express HRSC-Daten werden im Rahmen eines standardisierten Verfahrens eines operationellen Bodendatensystems zeitnah zu Digitalen Oberflächenmodellen und Orthobildern verarbeitet. Die bildhaften und 3D-HRSC-Produkte erweitern die Kenntnis der Marsoberfläche. Eine Abdeckung von 40% mit Bildauflösungen von bis zu 10 m und Oberflächenmodellen mit Rasterweiten von 200 m konnte bereits in den ersten 16 Monaten der Mission durch die automatisierten Verfahren erreicht werden.

**Summary:** *From the Mars Express orbit to Digital Terrain Models and ortho images – operational processing of HRSC data.* Mars Express HRSC data are processed to standardized Digital Terrain Models and orthoimages in an operational ground data system within a short time frame of a few days. The resulting HRSC image and 3D data products extend the previous geoscientific knowledge about the Martian surface. A coverage of 40% with image resolutions of up to 10 m and 200 m raster Digital Terrain Models has already been achieved by the automated processes within the first 16 months of the Mars Express mission.

---

### 1 Einleitung

Datengewinnung und Datenverarbeitung in der Planetenforschung erfolgen unter speziellen Bedingungen. In diesem Beitrag über das operationelle Bodendatensystem des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin-Adlershof für das MARS EXPRESS (MEX) HRSC-Kameraexperiment (NEUKUM et al. 2004) beschreiben wir diese besonderen Rahmenbedingungen der Datenaufnahme und -übertragung und stellen den standardisierten Datenverarbeitungsprozess vor. Schließlich wird ein qualitativer und quantitativer Überblick über die im bisherigen Missionsverlauf erzielten

photogrammetrischen Datenprodukte gegeben.

Hauptmotivation der standardisierten Verarbeitung ist die schnelle Ableitung und Bereitstellung bildhafter und dreidimensionaler Datenprodukte mittels weitestgehend automatisierten Prozeduren. Diese bilden einen Ausgangspunkt für die Bearbeitung verschiedener geowissenschaftlicher Fragestellungen, wie für die gezielte und kontrollierte Ableitung höherwertiger Datenprodukte mit verfeinerten Methoden. Die Daten des US-amerikanischen *Mars Orbiter Laser Altimeters* (MOLA), die zwar eine hohe Punktgenauigkeit, aber mit Punktabständen von 330–11000 m deutliche Lücken

aufweisen, stellen dabei die Referenz für die erzielten HRSC-3D-Produkte dar.

Die Entwicklung und Anwendung von Verfahren zur weiteren Optimierung der Produktqualität, die in die nachfolgend beschriebene Verarbeitungskette integriert werden können, sind Gegenstand weiterer Arbeiten, über die in anderen Beiträgen dieses Heftes berichtet wird.

## 2 HRSC-Datenfluss vom MARS Express Orbiter zum Bodendatensystem des DLR

In der Regel werden HRSC-Daten, JPEG-komprimierte Bild- sowie diverse Meta-Daten (z. B. Kommandierungsparameter, Zeitinformation, Daten von Temperatursensoren) im marsnahen Teil (Perizenter) des hochelliptischen MEX-Orbits aufgezeichnet und auf dem Massenspeicher des Orbiters als Datenstrom in Multiplex-Form abgelegt. Im marsfernen Bereich des Orbits werden diese Daten (zusammen mit Daten der anderen MEX-Instrumente) vom Orbiter zur Erde gefunkt. (Anm.: Nicht in jedem MEX-Orbit ist der Orbiter zur Marsoberfläche ausgerichtet bzw. stehen Kapazitäten im Massenspeicher für HRSC-Daten zur Verfügung).

Neben der Empfangsstation der ESA in New Norcia (Australien) werden auch Kapazitäten des US-amerikanischen *Deep Space Network* (DSN) für MEX genutzt. Die Daten der Empfangsstationen werden am *European Space Operations Centre* (ESOC) in Darmstadt gesammelt und in die Anteile der einzelnen Instrumente aufgeteilt. Der HRSC-Anteil der Daten wird vom DLR per Datenleitung abgefordert und liegt somit als Daten-Level-0 für die weitere Verarbeitung im Bodendatensystem vor. Tab. 1 gibt einen Überblick über Kenndaten des HRSC-Datenflusses.

Zusätzlich zu den an Bord aufgezeichneten HRSC-Bild- und Meta-Daten stehen für die weitere Verarbeitung Labor-Messdaten der Inneren Orientierung sowie radiometrische Kalibrationsdaten der Kamera bereit. Daneben werden vom ESOC als Äußere Orientierung die Daten des nominellen Or-

**Tab. 1:** HRSC-Datenaufnahme und -übertragung.

Aufzeichnungsdauer/Orbit	2–30 min
Daten/Orbit (komprimiert)	bis 4 Gbit
Downlinkzeiten/Tag	bis 22 Std.
Downlinkrate	20–200 kbit/s
Transfer ESOC → DLR	50 Mbit/s
$\Delta t$ Datenaufnahme bis Einspielung in das DLR-Bodendatensystem	einige Stunden bis wenige Tage

bits (Positionsdaten) sowie der nominellen Ausrichtung des Orbiters bereitgestellt, aus der sich zusammen mit den Daten des nominellen Alignments der Kamera zum Orbiter die jeweiligen Lagedaten ergeben.

Während die nominelle Ausrichtung des MEX-Orbiters durch Steuerungsmanöver auf Grundlage der Beobachtungen mehrerer MEX-Sternenkameras weitestgehend realisiert wird und von Seiten des ESOC unverändert bleibt, werden die Positionsdaten des Orbiters durch Doppler-Trackingmessungen rekonstruiert und diese verbesserten Positionsdaten vom ESOC nachträglich bereitgestellt (siehe hierzu auch Abschnitt 5).

## 3 Systematische Vorverarbeitung

Die systematische Daten-Aufbereitung umfasst 3 Hauptkomponenten (Abb. 1):

### 3.1 Prozessierung der Telemetriedaten

Im Rahmen dieses Schrittes wird der Multiplex-Datensatz in die Daten der einzelnen 10 HRSC-Sensoren (9 HRSC-Kanäle sowie der *Super Resolution Channel SRC*) aufge-



**Abb. 1:** Systematische Verarbeitungsschritte.

gliedert. Weiterhin erfolgt die De-Kompression der Bilddaten sowie die Zuordnung der Meta-Daten zu den einzelnen Datenteilen (Bild-Zeilen). Das Ergebnis wird als Level-1 bezeichnet.

### 3.2 Radiometrische Kalibration

Mit Hilfe der Labor-Kalibrationsdaten und der aufgezeichneten Meta-Daten der Kamera, die die Datenaufzeichnung mit variablen Belichtungszeiten und Verstärkungen in einem breiten Dynamikbereich ermöglicht, werden die 8-bit-Rohdaten der einzelnen Kanäle korrigiert, in einem 16-bit umfassenden Grauwertbereich dargestellt und als kalibrierter Level-2 Datensatz inklusive der Daten der Äußeren Orientierung je Bildzeile abgelegt. Die Parameter für die Umrechnung der Grauwerte in physikalische Größen (Radianzen) werden im Bildlabel protokolliert.

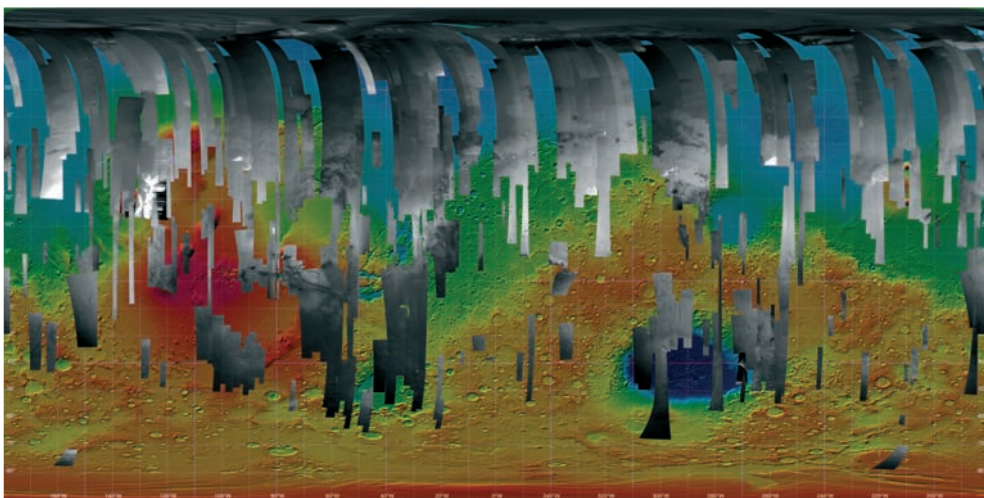
### 3.3 Entzerrung mit Hilfe von MOLA- DGM

Letzter Schritt der systematischen Verarbeitung ist die Entzerrung der Level-2 Daten auf der Basis der a-priori vorhandenen Information zur Marstopographie. Hierzu wird ein aus MOLA-Messdaten interpolier-

**Tab. 2:** Daten zur systematischen Verarbeitung.

Δt Level-0 – Vorliegen von Level-3 Daten	1–2 Tage
Stand: 15. 5. 2005:	
Anzahl HRSC Orbits	427
Level-2 Datenvolumen	685 GByte
Mars-Abdeckung	58 Mio.km <sup>2</sup> (40%)
besser als 50 m/pxl	48 Mio.km <sup>2</sup> (33%)
besser als 20 m/pxl	20 Mio.km <sup>2</sup> (14%)

tes Digitales Geländemodell verwendet (SMITH et al. 2003). Die geometrische Auflösung der resultierenden Level-3 Daten wird entsprechend der Original-Bodenaufklärung gewählt (Standardauflösungen sind 12,5/25/50 und 100 m/pxl, Standardprojektionen: Lambert Azimutal für polnahe Regionen, ansonsten Sinusoidal). Somit liegt bereits nach Abschluss der systematischen Datenverarbeitung je Orbit ein geo(areo)referenziertes Produkt vor, das zusammen mit den Level-2-Daten dem HRSC-Wissenschaftsteam zur Verfügung steht. Die Level-2 Daten sowie Software zur Ableitung von Level-3 Daten werden darüber hinaus nach einer Sperrfrist von 6 Monaten über das *Planetary Science Archive* (ESA 2005), im Format des *Planetary Data System* (NASA



**Abb. 2:** HRSC-Abdeckung der Marsoberfläche auf farbkodiertem MOLA-DGM (Stand: 15. 5. 2005).

2004), veröffentlicht. Die bisher erreichte Marsabdeckung ist in Abb. 2 auf dem Hintergrund des MOLA-DGM dargestellt. Eine Statistik hierzu zeigt Tab. 2.

#### 4 Photogrammetrische Standardverarbeitung

Der Hauptmotivation einer zeitnahen Bereitstellung von bildhaften und 3D-HRSC-Produkten entsprechend, erfolgt die standardisierte photogrammetrische Verarbeitung mit einer automatisierten sequentiellen Prozedur, die die kameraspezifischen Redundanzen des Mehrfach-Stereos nutzt, um die Produktqualität der resultierenden Level-4 Daten weitestgehend zu optimieren. Sie ist in Abb. 3 skizziert und erfolgt auf der Basis der nach der systematischen Vorverarbeitung vorliegenden HRSC Level-2 Bilddaten sowie der nominellen bzw. rekonstruierten Orientierungsdaten (für Daten des SRC-Kanals erfolgt keine Level-4 Prozessierung).

Die verwendeten photogrammetrischen Verfahren (SCHOLTEN et al. 2005 u. 2004, SCHOLTEN 1996, UEBBING 1996, WEWEL 1996) basieren auf Entwicklungen, die ursprünglich an der Technischen Universität Berlin begonnen wurden und bereits seit vielen Jahren am DLR auch im Rahmen von Befliegungen mit HRSC-Kameras weiterge-

führt und erfolgreich eingesetzt werden (SCHOLTEN et al. 2002, WEWEL et al. 2000). Sie können hier nur ansatzweise dargestellt werden.

##### – Vorkorrektur der 5 Stereokanäle

Die Stereokanäle werden unter Verwendung der a-priori Topographiedaten (MOLA-DGM) entzerrt, um die Suchbereiche für die nachfolgende Bildzuordnung zu minimieren. Erfolgt diese Vorkorrektur durch ebene Entzerrung, fallen Quasi-Epipolarbilder an, die bereits für erste Untersuchungen genutzt werden.

##### – Flächenbasiertes Matching

Multi-Stereo-Kreuzkorrelation und Least-Squares-Matching werden in einem pyramidalen Ansatz verwendet, um flächenhaft (im Rahmen der standardisierten Verarbeitung in einem Raster von 100 m) homologe Punkte zu bestimmen.

##### – Objektpunktbestimmung

Aus den Ergebnissen der Bildzuordnung werden mit Hilfe der Orientierungsdaten durch gemeinsamen räumlichen Vorwärtschnitt der durch die 5 Stereokanäle definierten Raumstrahlen 3D-Objektpunkte im marszentrischen Koordinatensystem generiert.

##### – DGM-Interpolation

Aus der generierten Objektpunktwolke wird ein HRSC-200 m Raster-DGM durch Filterung und Interpolation abgeleitet (im Rahmen der standardisierten Verarbeitung werden hierfür nur Punkte mit einem 3D-Punktfehler besser als die 2fache mittlere Standardabweichung aller Punkte verwendet).

##### – Orthobild-Generierung

Mit Hilfe des HRSC-DGM werden abschließend die relevanten Bildkanäle (rot, grün, blau, infrarot sowie der panchromatische Nadirkanal) zu Orthobildern rektifiziert.

Die standardisierte Erstellung der Level-4 Produkte (DGM und Orthobilder, Abb. 4) erfolgt für alle Orbits i. d. R. innerhalb von 1–2 Tagen und wird somit dem Anspruch an eine schnelle Bereitstellung gerecht.

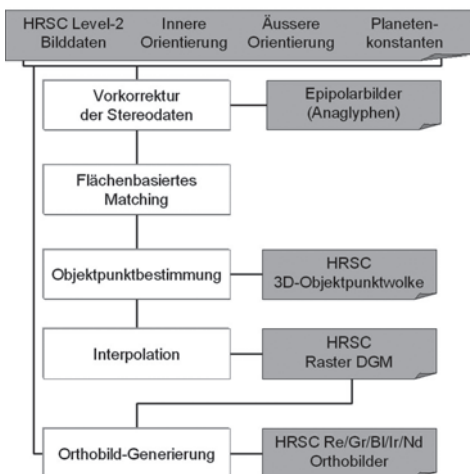
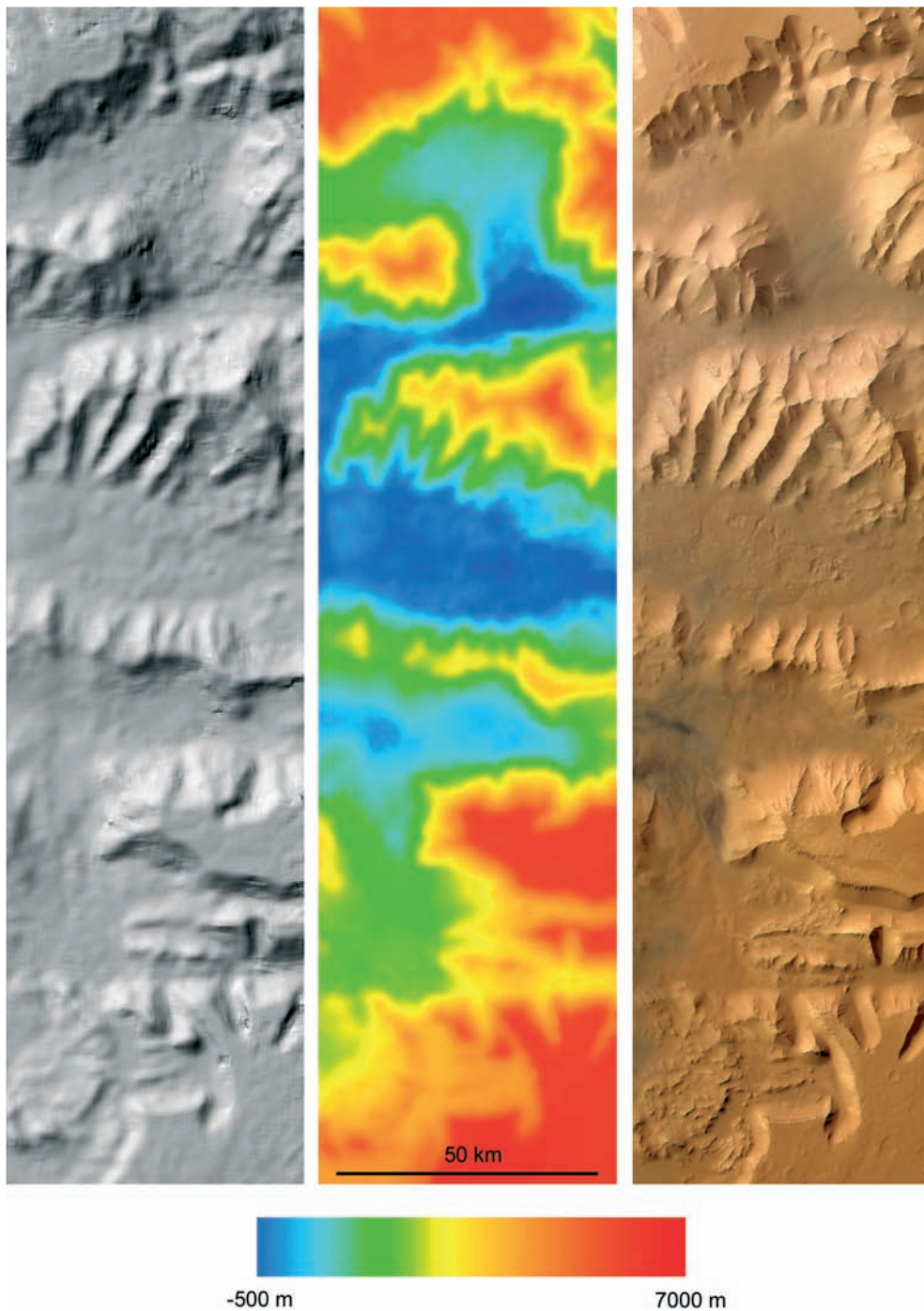


Abb. 3: Photogrammetrische Verarbeitungskette.



**Abb. 4:** Beispiel für standardmäßig erstellte Produkte (aus Orbit 1041). Links: DGM (schattierte Ansicht). Mitte: DGM (farbkodiert mit Höhenskala). Rechts: Farb-Orthobild.

## 5 Vergleich von HRSC-DGM und MOLA-DGM

Daten des MOLA-Instrumentes dienen als Referenz für die Beurteilung der HRSC-3D-Datenprodukte. Abb. 5 zeigt die Auswirkungen der unterschiedlichen Datenaufzeichnungs- und -verarbeitungsmethoden. Das MOLA-Laseraltimeter bietet innerhalb der MOLA-Tracks eine hohe laterale und vertikale Auflösung (ca. 330 m Punktabstand und Höhengenaugigkeiten von bis zu 1 m). Große Abstände zwischen den Tracks (bis zu einigen km in niedrigen geographischen Breiten) führen jedoch zu Datenlücken, die insbesondere an signifikanten Oberflächenstrukturen auffallen.

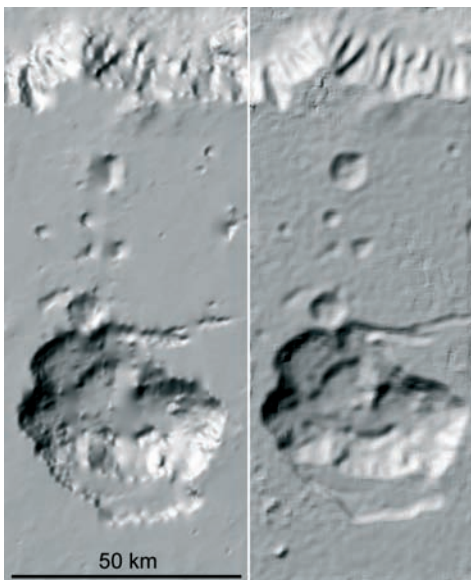
Das mit flächenhaften Bildzuordnungsverfahren erzeugte standardisierte HRSC-DTM zeigt in schwach texturierten Regionen ein stärkeres Rauschen, stellt aber Oberflächenstrukturen bei ähnlicher lateraler Auflösung vollständiger und detailreicher dar.

Die Absolutgenauigkeit des HRSC-DGM eines Orbits hängt von den jeweils im Rahmen der Verarbeitung verwendeten Orientie-

rungsdaten ab. Wie beschrieben, werden je nach Verfügbarkeit teils nominelle, teils rekonstruierte Orbitinformationen genutzt.

Abb. 6 (oben) zeigt die entsprechend unterschiedlichen Differenzen MOLA-DGM zu HRSC-DGM aller bisherigen Orbits. Darunter ist links das Histogramm der Differenzen, das bis zu  $+/- 2000$  m und mehr um Null streut, angegeben. Zuletzt ist repräsentativ Orbit 0334, Nadir-Orthobild unten links, sowie daneben Differenzmuster von 4 Orbitvarianten dargestellt:

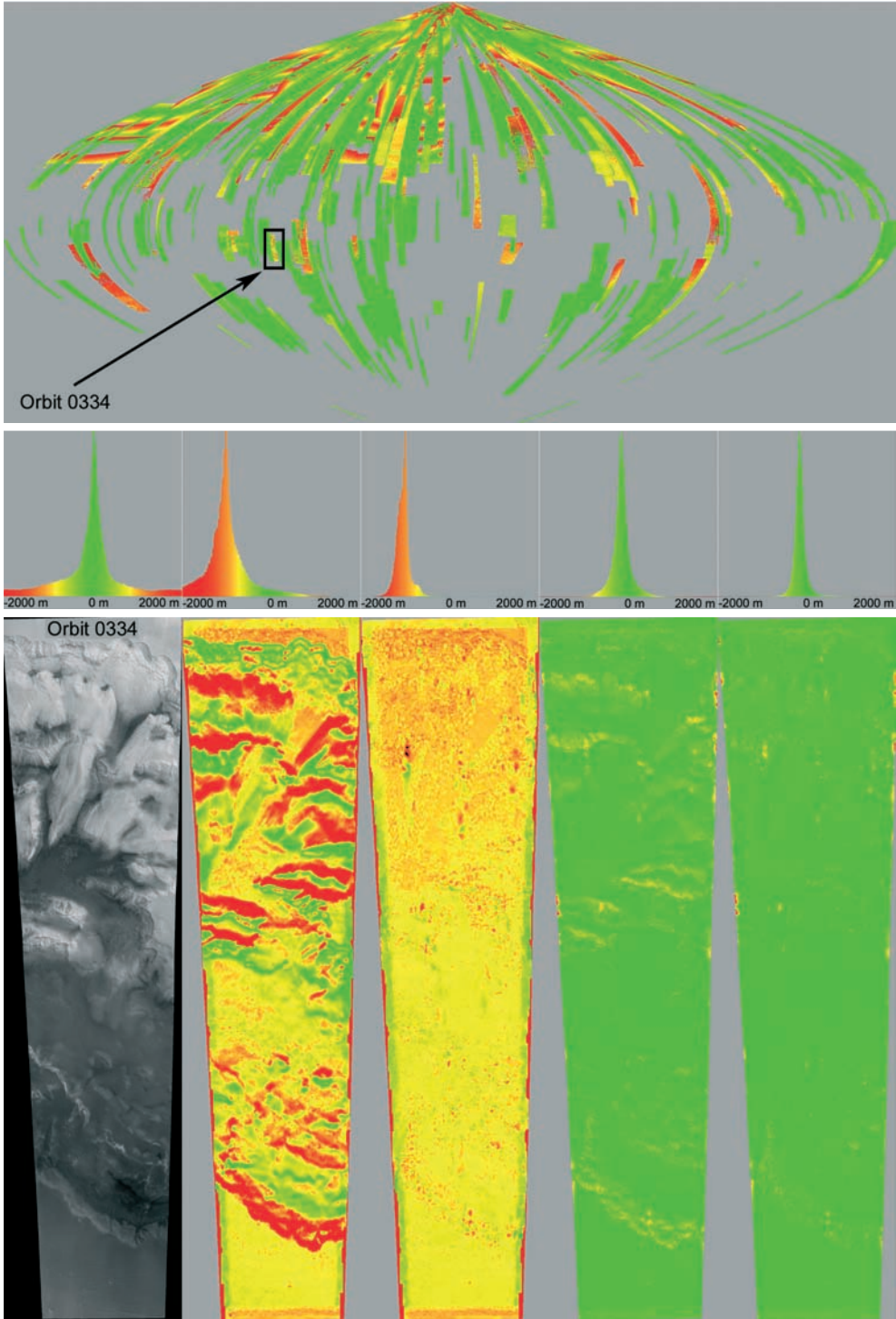
- links ein um ca.  $-1000$  m streuendes breites Histogramm, basierend auf dem nominellen Orbit,
- daneben wiederum mit nominellen Orbitdaten, aber nach einer lateralen Anpassung (ca.  $4000$  m in Orbitrichtung). Die Streuung der Höhendifferenzen reduziert sich, liegt im Mittel weiterhin bei  $-1000$  m,
- daneben auf rekonstruierten Daten basierende Höhendifferenzen (ohne laterale Korrektur), wenig um ca.  $-100$  m streuend,
- rechts, auf rekonstruierten Daten basierend sowie nach einer lateralen Korrektur von wenigen Hundert Metern, ein noch schmaleres Differenzhistogramm, um  $-100$  m streuend.



**Abb. 5:** Vergleich MOLA/HRSC-DGM (Ausschnitt aus MEX Orbit 1070).

## 6 Resümee

Mit Hilfe der standardisierten HRSC-Datenverarbeitung können Digitale Geländemodelle im  $200$  m Raster sowie Orthobilder in Auflösungen von bis zu  $12,5$  m/pxl bereits wenige Tage nach der HRSC-Datenaufnahme bereitgestellt werden. Während die auf flächenhafter Bildzuordnung basierenden HRSC-Geländemodelle in texturschwachen Regionen zum Teil Rauschen aufweisen, erweitern sie in äquaturnahen Gebieten die bisher lückenhafte Kenntnis über die Mars-Topographie. Die Absolutgenauigkeit der Produkte hängt von der Art der Orbitdaten ab und beträgt bis zu  $200$  m lateral und  $100$  m vertikal bei Verwendung rekonstruierter Orbitinformation.



**Abb. 6:** Vergleich Standard HRSC-DGM/MOLA-DGM in Abhängigkeit von den verwendeten Orbitdaten (Abschnitt 5).

## Dank

Die Arbeiten des HRSC Principal Investigators, Prof. Dr. GERHARD NEUKUM, an der Freien Universität Berlin werden mit Mitteln des DLR unterstützt. Die Autoren danken dem gesamten DLR-HRSC-MEX Team. Besonderer Dank gilt dem ehemaligen Team-Mitglied Dipl.-Ing. FRANZ WEWEL, für dessen grundlegende Entwicklungen zum photogrammetrischen Verarbeitungssystem.

## Literaturverzeichnis

- ESA, 2005. <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=PSA>
- NASA, 2004. <http://pds.jpl.nasa.gov/>
- NEUKUM, G., JAUMANN, R. and the HRSC Co-Investigator Team, 2004: HRSC: The High Resolution Stereo Camera of Mars Express. – ESA Special Publications SP-1240.
- SCHOLTEN, F., 1996: Automated Generation of Coloured Orthoimages and Image Mosaics Using HRSC and WAOSS Image Data of the Mars96 Mission. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXI, B2: 351–356.
- SCHOLTEN, F., GWINNER, K. & WEWEL, F., 2002: Angewandte Digitale Photogrammetrie mit der HRSC. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation **2000** (5): 317–332.
- SCHOLTEN, F., GWINNER, K., GIESE, B., OBERST, J., ROATSCH, T., JAUMANN, R., NEUKUM, G. und das HRSC-TEAM, 2004: HRSC auf Mars Express – Photogrammetrische Datenverarbeitung im planetaren Umfeld. – Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung **13**: 467–474.
- SCHOLTEN, F., GWINNER, K., ROATSCH, T., MATZ, K.-D., WÄHLISCH, M., GIESE, B., OBERST, J., JAUMANN, R., Neukum, G. and the HRSC CoI-Team, 2005: Mars Express HRSC Data Processing – Methods and Operational Aspects. – Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Special Issue “Mapping of Mars”, (submitted).
- SMITH, D., NEUMANN, G., ARVIDSON, R. E., GUINNESS, E. A. & SLAVNEY, S., 2003: Mars Global Surveyor Laser Altimeter Mission Experiment Gridded Data Record. – NASA Planetary Data System, MGS-M-MOLA-5-MEGDR-L3-V1.0.
- UEBBING, R., 1996: An Automated Digital Approach for the Generation of Digital Terrain Models Using HRSC and WAOSS Image Data of the Mars96 Mission. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing **31**, B3: 894–897.
- WEWEL, F., 1996: Determination of Conjugate Points of Stereoscopic Three Line Scanner Data of Mars96 Mission. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing **31**, B3: 936–939.
- WEWEL, F., SCHOLTEN, F. & GWINNER, K., 2000: High Resolution Stereo Camera (HRSC): multispectral 3D-data acquisition and photogrammetric data processing. – Canadian Journal of Remote Sensing **26**: 466–474.

## Anschriften der Autoren:

Dipl.-Ing. FRANK SCHOLTEN, Dr. THOMAS ROATSCH, M.A. Dipl.-Geol. KLAUS GWINNER, Dipl.-Math. KLAUS-DIETER MATZ, Dipl.-Math. VOLKER MERTENS, Dr. JOACHIM FLOHRER, Dipl.-Phys. MARITA WÄHLISCH, Dr. BERND GIESE, Dr. RENE PISCHEL, Dr. JÜRGEN OBERST, Dr. habil. RALF JAUMANN

Institut für Planetenforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), 12489 Berlin

Tel.: + +49-30-67055-326 (F. SCHOLTEN)

Fax: + +49-30-67055-402

e-mail: Vorname.Nachname@dlr.de

Prof. Dr. GERHARD NEUKUM

Freie Universität Berlin, Institut für Geologische Wissenschaften/Planetologie, Maltesserstr. 74–100, D-12249 Berlin, Tel.: + +49-30-83870-579

Fax: + +49-30-83870-118

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

Manuskript eingereicht: Juni 2005

Angenommen: Juli 2005