

HRSC auf Mars Express – Photogrammetrische und kartographische Auswertungen

Christian Heipke, Jörg Albertz, Maria Attwenger, Manfred Buchroithner, Peter Dorninger, Egon Dorrer, Stephan Gehrke, Klaus Gwinner, Hartmut Lehmann, Helmut Mayer, Alexey Ostrovskiy, Gerold Pacher, Matthias Rentsch, Ralph Schmidt, Frank Scholten, Michael Spiegel, Uwe Stilla, Gerhard Neukum und das HRSC Co-Investigator Team

Zusammenfassung

Die High Resolution Stereo Camera (HRSC) an Bord der europäischen Raumsonde Mars Express ist die erste Kamera einer Planetenmission, die speziell für photogrammetrische und kartographische Zwecke entwickelt wurde. Seit Januar 2004 liefert die Kamera hochaufgelöste Bilddaten der Marsoberfläche in Stereo und in Farbe. Die Bilddaten bergen ein immenses Potenzial zur Ableitung präziser Digitaler Geländemodelle (DGMs) und farbiger Orthophotos sowie zur Herstellung topographischer und thematischer Karten und weiterer Produkte. Die Arbeitsgruppe für Photogrammetrie und Kartographie des internationalen HRSC-Forscherteams beschäftigt sich mit der systematischen Erstellung von Standardprodukten aus den Bilddaten und der Verfeinerung dieser Produkte mit dem Ziel, eine höchstmögliche Qualität zu erzielen. Dieser Beitrag beschreibt einige zur Verfeinerung geeignete Arbeitsschritte und illustriert den erreichten Stand anhand einer Reihe von Beispielen.

Summary

The High Resolution Stereo Camera (HRSC) on the European spacecraft Mars Express is the first camera on a planetary mission especially designed for photogrammetric and cartographic purposes. Since January 2004 the camera has been taking image data from the Martian surface, characterized by high resolution, stereo capability and colour. These data provide an enormous potential for the generation of 3D surface models, colour orthophotos, topographic and thematic maps, and additional products. Within the international HRSC Science Team the members of the Photogrammetric/Cartographic Working Group are concerned with systematic preparation of standard products as well as further refinements of the latter in order to achieve highest quality data products. This paper describes some appropriate steps for achieving such refined products and illustrates the current status with the help of various examples.

1 Einleitung

Die High Resolution Stereo Camera (HRSC) ist eines der Experimente der ESA (European Space Agency) Mission Mars Express. Zum ersten Mal in der Geschichte der Planetenerkundung wurde eine Kamera speziell dafür ausgelegt, einen Planeten vollständig mit photogrammetrischen und kartographischen Mitteln aufzunehmen. Die HRSC funktioniert nach dem Pushbroom-Prinzip und

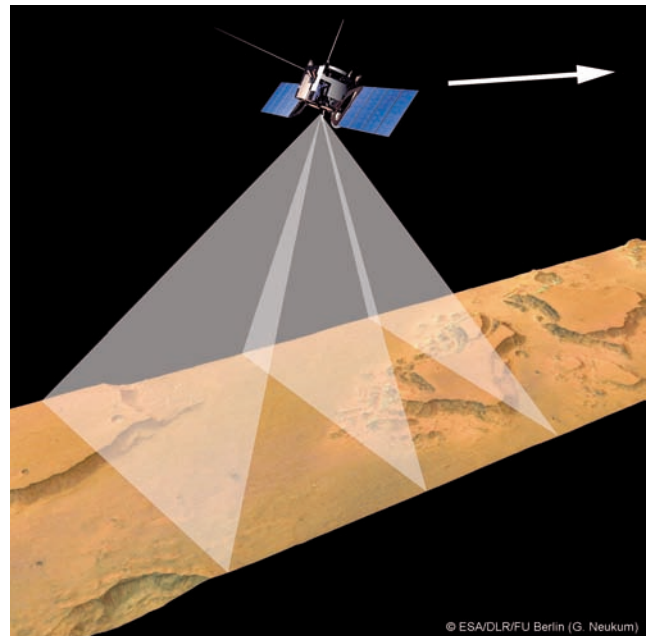


Abb. 1: Aufnahmeprinzip der HRSC: Quer zur Flugrichtung montierte CCD-Zeilen tasten die Oberfläche des Mars kontinuierlich und streifenweise ab. Abgebildet sind nur die drei Stereokanäle, die anderen sechs Zeilen sind zwischen den Stereozeilen angeordnet.

besitzt insgesamt neun CCD-Zeilen, die parallel zueinander in der Bildebene montiert sind; fünf Zeilen nehmen die Oberfläche unter verschiedenen Blickwinkeln panchromatisch auf, die anderen vier sind für farbiges Licht (rot, grün, blau, infrarot) empfindlich (s. Abb. 1 und Neukum et al. 2004a).

Seit der Ankunft der Sonde am Mars in den Weihnachtstagen 2003 nimmt die Kamera die Marsoberfläche mit einer Bodenauflösung von bis zu 10 m pro Pixel auf. Die Standardprozessierung zur schnellen Ableitung Digitaler Geländemodelle mit einer Gitterweite von 200 m und Orthophotos erfolgt am Institut für Planetenforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und liefert bereits gegenüber bisherigen Marsdaten zum Teil verbesserte Qualitäten (Scholten et al. 2005). Daneben haben die Mitglieder der photogrammetrisch/kartographischen Arbeitsgruppe (PCWG) des internationalen HRSC Forscherteams eine Reihe von Verfeinerungen entwickelt, um eine bestmögliche Datenqualität erzielen zu können. Im Gegensatz zu der Standardprozessierung werden die verfeinerten Produkte derzeit nur exemplarisch abgeleitet. Dies gilt bisher auch für experimentelle

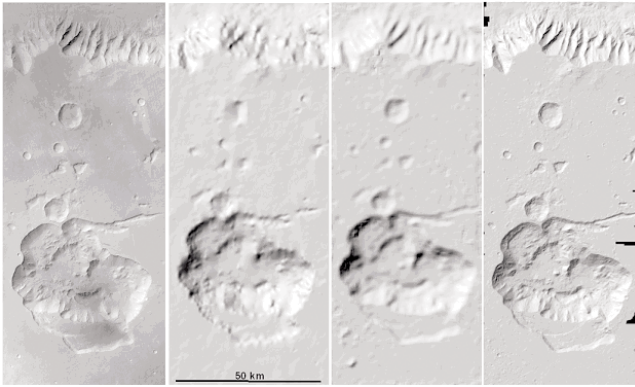


Abb. 2: Stereophotogrammetrische DGM-Produkte des DLR im Vergleich zum Orthophoto und einem bereits existierenden DGM der Marsoberfläche.

Von links nach rechts: Panchromatisches HRSC-Orthophoto, MOLA-DGM (Auflösung 463 m, NASA 2003), HRSC-DGM der Standardprozessierung (Auflösung 200 m, Scholten et al. 2005), hochaufgelöstes HRSC-DGM (Auflösung 50 m, Gwinner et al. 2005).

Produkte eines erweiterten Verarbeitungsschemas zur DGM-Erstellung des DLR, das zur Erzeugung hochaufgelöster DGM (bis 50 m Gitterweite) entwickelt und eingesetzt wird (Gwinner et al. 2005). Abb. 2 veranschaulicht anhand eines Beispiels die Qualität der vom DLR mit stereophotogrammetrischen Methoden hergestellten DGM-Produkte im Vergleich zu einem Geländemodell aus Daten des Mars Orbiter Laser Altimeters (MOLA, Smith et al. 2001), das mit einer globalen Abdeckung und einer Gitterweite von 463 m den genauesten bisher verfügbaren Datensatz darstellt.

In den folgenden Kapiteln stellen die Mitglieder der PCWG ihre Arbeiten vor. Dazu gehören die Bestimmung genauerer Elemente der äußeren Orientierung, die Verbesserung des DGMs durch Berücksichtigung vorhandener Daten sowie alternativer Techniken, die Ableitung topographischer Karten sowie die Erstellung von »echt 3D«-Visualisierungen. Während die Optimierung der Orientierungsdaten auf der Standardverarbeitung der Daten (Scholten et al. 2005), d. h. auf radiometrisch kalibrierten Level-2-Daten, beruht, setzen alle anderen Arbeiten auf vom DLR speziell für diese Verfahren aufbereiteten photogrammetrischen Produkte und Zusatzdaten auf.

2 Verbesserung der äußeren Orientierung der Kamera

Während der Mission berechnet das Flight Dynamics Team (FDT) vom ESOC (European Space Operations Centre) in Darmstadt mithilfe von Doppler- und Entfernungsmessungen fortwährend die dreidimensionale Position der Sonde. Der Sternensensor und die Kreisel an Bord der Sonde richten die Lage gemäß der Aufnahmeplanung aus. Diese Werte für Position und Lage können als genäherte äußere Orientierung der aufgezeichneten Bilddaten

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 deutlich höher.

Diese Daten der äußeren Orientierung können sowohl in ihrer relativen als auch in ihrer absoluten Genauigkeit mithilfe einer verallgemeinerten Bündelausgleichung verbessert werden. Die Auswertung 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 Photogrammetrie und Fernerkundung (FPF) der TU München zusammen mit den ESOC-Daten, den Elementen der inneren Orientierung sowie dem MOLA-DGM als Eingangsdaten der Bündelausgleichung.

2.1 Automatische Bestimmung von Verknüpfungspunkten

Die Bildzuordnung beruht auf einem Ansatz zur automatischen relativen Orientierung (Tang und Heipke 1996). Als Eingangsdaten werden die HRSC-Bilder, die Kalibrierungsdaten der inneren Orientierung und die vom ESOC bestimmten Daten der äußeren Orientierung benötigt. Ein DGM des Mars, das aus Daten des MOLA-Instruments abgeleitet wurde (Smith et al. 2001), kann optional als weitere Näherungsinformation genutzt werden.

Das Verfahren beruht auf Bildpyramiden und läuft hierarchisch von der größten zur feinsten Auflösung. Zu Beginn werden Punktmerkmale mithilfe des Förstner-Operators (Förstner 1986) extrahiert, und die Bilder werden einander paarweise in allen Kombinationen zugeordnet, wobei der Kreuzkorrelationskoeffizient als Ähnlichkeitsmaß dient. Zur Bestimmung von Punkttupeln aus den zugeordneten Punktpaaren wird ein ungerichteter Graph aufgebaut; die Knoten des Graphen werden aus den Punktmerkmalen und die Kanten aus den Zuordnungsverbindungen abgeleitet. Die Tupel selber werden dann mithilfe des RANSAC-Verfahrens (Random Sample Consensus; Fischler und Bolles 1981) abgeleitet. Um das Bildzuordnungsergebnis weiter zu verfeinern, wird anschließend eine Mehrbildzuordnung im Objektraum nach dem Ansatz von Schenk und Krupnik (1996) durchgeführt, in dem die Verknüpfungspunkte in allen Bildern gleichzeitig zugeordnet werden. Am Schluss werden aus den Bildkoordinaten der zugeordneten Verknüpfungspunkte mithilfe der als konstant angesehenen Parameter der äußeren Orientierung Objektkoordinaten berechnet. Diese dienen in der nächstunteren Ebene der Bildpyramide zur Suchraumeinschränkung bei der Merkmalsextraktion. Auf der größten Ebene kann für diese Aufgabe optional das MOLA-DGM verwendet werden. Das hier skizzierte Verfahren ist detailliert in Schmidt et al. (2005) beschrieben. Eine Verteilung der Verknüpfungspunkte ist in Abb. 3 links zu sehen.

2.2 Bündelausgleichung

Für die Bündelausgleichung wird das Konzept von Hofmann et al. (1984) verwendet. Dieser Ansatz verbessert die Parameter der äußeren Orientierung nur an wenigen Bildzeilen, den so genannten Orientierungsbildern. Das mathematische Modell für die photogrammetrische Punktbestimmung beruht auf den bekannten Kollinearitätsgleichungen mit für Zeilensensoren geeigneten Erweiterungen.

Um die Ergebnisse an ein Referenzsystem anzupassen, werden in der photogrammetrischen Punktbestimmung normalerweise Passpunkte benötigt. Auf dem Mars sind Passpunkte jedoch nicht mit genügender Anzahl und Genauigkeit verfügbar. Deshalb wird hier das MOLA-DGM als Passinformation genutzt (Strunz 1993). Da die DGM-Punkte nicht in den Bildern identifizierbar sind, wird die Bedingung eingeführt, dass die Verknüpfungspunkte im Objektraum in den DGM-Maschen liegen müssen. Eine ausführlichere Beschreibung zur Berücksichtigung des MOLA-DGMs bei der Bündelausgleichung ist in Spiegel et al. (2005) enthalten.

Bei der simultanen Ausgleichung mehrerer Streifen werden die einzelnen Streifen zunächst separat ausgeglichen, um grobe Fehler in den Bildkoordinaten bzw. den Objektpunkten besser eliminieren zu können. In der sich anschließenden Blockausgleichung werden zusätzlich Verknüpfungspunkte verwendet, die in jeweils zwei unterschiedlichen Streifen liegen und somit die Streifen zu einem Block verknüpfen.

2.3 Ergebnisse

In Tab. 1 sind die Ergebnisse eines Blocks bestehend aus sieben Einzelstreifen dargestellt. Die erste Zeile gibt die theoretische Standardabweichung der Strahlenschnitte der Objektpunkte, gemittelt über alle sieben Streifen unter Verwendung der ESOC-Daten, an. Die Standardabweichung der Einzelstreifen nach Anwendung der Bündelausgleichung ist in Zeile 2 der Tabelle zu sehen. Hierbei

Tab. 1: Theoretische Standardabweichungen der Verknüpfungspunkte im Objektraum vor (vorher) und nach (nachher) der Bündelausgleichung für Einzelstreifen und Blöcke

	SX [m]	SY [m]	SZ [m]
Einzelstreifen, vorher	34,4	27,6	108,5
Einzelstreifen, nachher	12,1	8,9	37,2
Block, vorher nur Streifenverknüpfungspunkte	66,9	48,0	204,1
Block, nachher nur Streifenverknüpfungspunkte	8,2	5,9	25,1

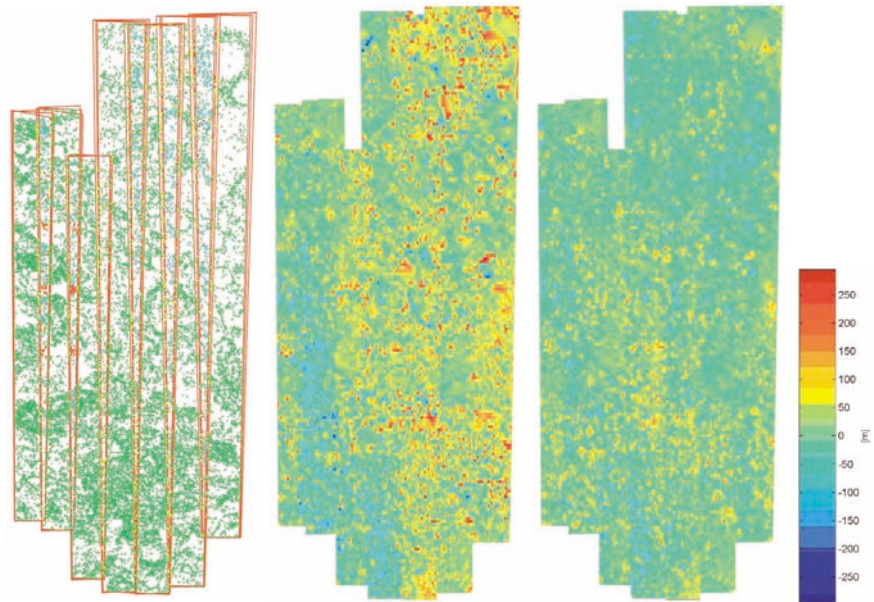


Abb. 3: Ergebnisse der Bündelausgleichung: Links: Verteilung der automatisch generierten Verknüpfungspunkte (ohne 2-Strahlpunkte). 23 506 3-Strahlpunkte (grün), 1847 4-Strahlpunkte (gelb), 767 5-Strahlpunkte (rot), 2661 6-Strahlpunkte (blau); Mitte: RMS Höhendifferenzen eines Blocks zwischen HRSC-Objektpunkten und dem MOLA-DGM vor Anpassung ans MOLA-DGM; Rechts: Nach Anpassung ans MOLA-DGM

ist eine deutliche Verbesserung um den Faktor 2–3 zu erkennen. Der im Vergleich zur Lagegenauigkeit etwas schlechtere Wert in Z (Höhe) von ca. 37 m kann auf die Konvergenzwinkel der Sensorzeilen der HRSC zurückgeführt werden. Um die Genauigkeit des Blocks vor und nach der Bündelausgleichung zu untersuchen, wurde auf der Grundlage der ESOC-Werte auch die Standardabweichung derjenigen Objektpunkte bestimmt, die Streifen miteinander verknüpfen (Zeile 3 der Tabelle). Dabei ergibt sich insbesondere in Z ein hoher Wert. Die Zeile vier zeigt die theoretischen Standardabweichungen für alle Streifenverknüpfungspunkte an. Diese Werte sind deutlich geringer, die Höhenkomponente ist fast um den Faktor 10 genauer. Nach der Bündelausgleichung wird im Block eine ähnliche Genauigkeit erreicht wie im Einzelstreifen.

Abb. 3 zeigt die Qualität, mit der die Ergebnisse zum MOLA-Referenzdatensatz passen. Auch hier sind vor der Ausgleichung systematische Fehler zu erkennen; nach der Bündelausgleichung sind die HRSC-Daten an das MOLA-Referenzsystem angepasst, beide Datensätze passen im Mittel auf ca. 53,8 m zusammen.

3 Klassifikation von HRSC-Punkten zur Optimierung von Geländemodellen

Die aus den HRSC-Bildern mithilfe automatischer Bildzuordnungsverfahren zur DGM-Erstellung abgeleiteten Objektpunkte können vor allem in texturarmen Bereichen grobe Fehler enthalten. Dadurch wird die Berechnung von DGMs negativ beeinflusst. Aus diesem Grund wurde am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der TU Wien eine iterativ anwendbare Klas-

sifikationsmethode entwickelt, die anhand eines stark geglätteten Start-DGMs Details aus den HRSC-Punkten hinzufügt und grobe Fehler größtenteils verwirft. Das resultierende DGM stellt eine wesentliche Verbesserung zu den schon existierenden MOLA-DGMs dar und entspricht dem hohen Auflösungsvermögen der HRSC-Bilder.

3.1 Ablauf der Klassifikationsmethode

Um ein Start-DGM (Profilansicht in Abb. 4A) wird ein Höhentoleranzband gelegt (B). HRSC-Punkte, die innerhalb dieses Toleranzbandes liegen, werden akzeptiert (schwarze Punkte), außerhalb liegende Punkte werden verworfen (rote Punkte). Aus den akzeptierten Punkten wird ein DGM berechnet, das wiederum mit den ursprünglichen HRSC-Punkten verglichen wird (C). Dieser Vorgang wird bis zu einem bestimmten Abbruchkriterium (z.B. Veränderung der Anzahl der akzeptierten Punkte um weniger als ein Prozent) wiederholt (D). Im Laufe dieser Iterationsschritte erfolgt eine sukzessive Anpassung an die Details aus den HRSC-Punkten. Aus den schlussendlich akzeptierten HRSC-Punkten wird das Ergebnis-DGM berechnet (E).

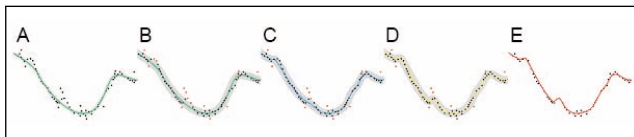


Abb. 4: Ablauf der Klassifikationsmethode in Profilansicht. Schwarze Punkte: (im jeweiligen Iterationsschritt akzeptierte) HRSC-Punkte, rote Punkte: im jeweiligen Iterationsschritt verworfene HRSC-Punkte, graues Band: im jeweiligen Iterationsschritt verwendetes Toleranzband; A, B: stark geglättetes Start-DGM (grün); C, D: Zwischenergebnisse (blau, gelb); E: Ergebnis (rot).

Die Berechnung des Start-DGMs kann anhand verschiedener Ansätze erfolgen (s. auch Attwenger et al. 2005). Beispielsweise kann ein stark geglättetes, niedrig auflösendes HRSC-DGM verwendet werden, oder es können von MOLA-Spuren ausgehend wachsende DGMs eingesetzt werden (Albertz et al. 2005). Die MOLA-Spuren weisen in Flugrichtung einen Punktabstand von zirka 330 m auf. Der Abstand der einzelnen MOLA-Spuren beträgt abhängig von der areographischen Breite oft mehrere Kilometer. Sie entsprechen also nicht der hohen Auflösung der HRSC-Punkte. Ihr Vorteil ist aber die hohe innere Höhengenaugigkeit (Neumann et al. 2003). Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung eines über das gesamte Interessensgebiet berechneten Gitter-DGMs (Gitterweite 500 m), abgeleitet aus den MOLA-Spuren, als Startwert. Aufgrund der Anordnung der MOLA-Spuren können viele Details nicht erfasst werden. Das daraus abgeleitete MOLA-DGM ist in den Zwischenräumen daher oft unzureichend bestimmt. In gebirgigem Gelände wirkt sich dies nicht negativ aus, weil genügend hochwertige HRSC-Punkte vorhanden sind und sich das DGM deshalb

im Laufe der Iterationen an die HRSC-Punkte anpasst. In ebenen Bereichen ist eine Interpolation über weite Bereiche sogar vorteilhaft, weil die Genauigkeit des MOLA-DGMs zur Elimination der hier in den HRSC-Punkten häufig auftretenden groben Fehler ausreicht.

3.2 Ergebnisse

Abb. 5 zeigt anhand von ausgewählten Schummerungen den Ablauf der Klassifikationsmethode im Bereich des Hydraotes Chaos (Orbit 18). Dabei wird das in (A) dargestellte MOLA-DGM als Start-DGM verwendet. Das große

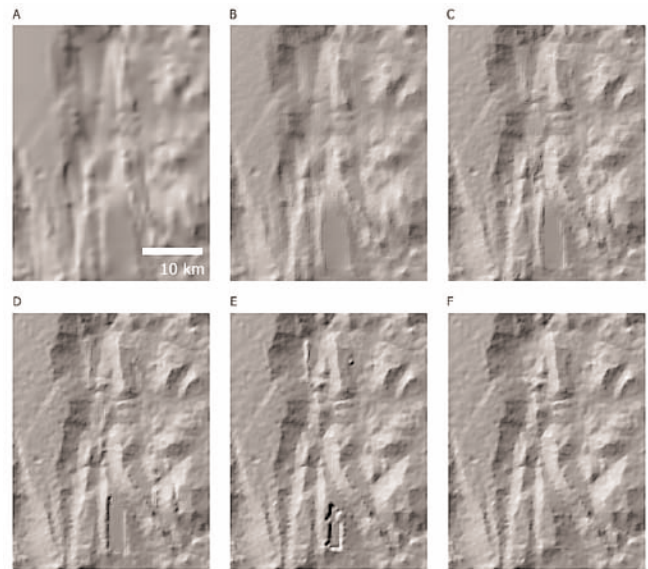


Abb. 5: Darstellung des Ablaufs der Punktklassifikation mit einem MOLA-DGM als Startwert anhand von ausgewählten Schummerungen. A: MOLA-DGM; B-E: Zwischenergebnisse; F: Ergebnis.

Hochplateau im Westen ist bereits gut erkennbar, das östlich davon befindliche Gebirge nur andeutungsweise. Die schlecht definierten Bereiche werden durch fehlende MOLA-Spuren verursacht. Aus der in (B) bis (E) dargestellten Auswahl an Zwischenergebnissen ist ersichtlich, dass dort, wo zur DGM-Berechnung ausreichend MOLA-Spuren zur Verfügung stehen, bereits nach wenigen Iterationen ein detailliertes HRSC-DGM entsteht. Ist in schlecht definierten Gebieten (z.B. im Süden) ausreichend HRSC-Textur vorhanden, so wird nach zusätzlichen Iterationen ebenfalls ein gutes Ergebnis erreicht. (F) zeigt das resultierende DGM nach zehn Iterationen und kann als gelungenes Ergebnis bezeichnet werden.

4 Verfeinerung Digitaler Geländemodelle und Homogenisierung der Pseudorelieftplastik mittels De-Re-Shading

Unter bestimmten Bedingungen ist es möglich, das abgeleitete DGM mit einer als De-Re-Shading (DRS) bezeichneten

neten Methode weiter zu verfeinern und daneben auch die Pseudoreliefdarstellung zu vereinheitlichen. Diese Arbeiten werden am Institut für Photogrammetrie und Kartographie der Universität der Bundeswehr München durchgeführt. Hauptziel von DRS ist die Optimierung und Vereinheitlichung der durch natürliche Beleuchtung induzierten Schattierung (engl. Shading) in HRSC-Bildern. Durch künstliche Modifizierung der Beleuchtung (Re-Shading) wird nicht nur eine einheitliche Reliefschattierung mosaikierter Orthophotos erzielt, sondern es kann auch die gefürchtete Reliefumkehr eliminiert werden.

4.1 Methodische Grundlagen

Kernstück der Methode ist die Annahme, dass die Grauwerte im Bild als Funktion der Neigung der Geländeoberfläche relativ zur Beleuchtungsrichtung beschrieben werden können; dies bedeutet auch, dass die Albedo der Oberfläche als konstant angenommen wird. Durch schrittweise Integration der Neigungen kann so ein vorhandenes DGM verfeinert werden. Dieser Ansatz wird auch als Photoklinometrie oder Shape-From-Shading (SFS) bezeichnet. SFS wurde von Horn (1970) entwickelt und ist heute in den Bereichen Computer Vision und Bildanalyse Gegenstand vieler wissenschaftlicher Untersuchungen. Einen interessanten Überblick geben Zhang et al. (1999). Weitere Studien werden z.B. von Heipke et al. (2001) und Rajabi et al. (2003) diskutiert. Angewandt auf reale Bilder ist SFS ein nicht-triviales, allgemein »schlecht gestelltes« Problem.

Das DRS-Verfahren (s. auch Dorrer et al. 1998, Dorrer et al. 2004) beruht auf der Minimierung der Summe der quadratischen Differenzen zwischen der Bestrahlungsstärke eines Orthophotos und dem Bild der modellierten reflektierten Radianz der Objektszene sowie den Differenzen zwischen der Höhe des a-priori-DGMs und der gesuchten Höhe des verfeinerten DGMs. Methodisch wird das Problem durch einen Ansatz der Variationsrechnung mit Nebenbedingungen gelöst. Das Orthophoto wurde aus den originären HRSC-Bilddaten mithilfe einer genauen Kameraorientierung und -kalibrierung sowie einem mittels Bildzuordnung erhaltenen DGM der Standardverarbeitung abgeleitet. Je besser dieses DGM ist, eine desto höhere Genauigkeit kann von der endgültigen DRS-Lösung erwartet werden. Das stochastische Modell des Ausgangs-DGMs wird durch die Höhenvarianz festgelegt. Andere Eingangsparameter sind die Beleuchtungsrichtung und eine für die Marsoberfläche geeignete Reflexionsfunktion. Die derzeitige Version ist beschränkt auf diffuse (Lambert) Reflexion sowie konstante Szenen-albedo und Höhenqualität.

4.2 Ergebnisse

Die Abb. 6 bis 9 zeigen einige Verarbeitungsstände eines 300 × 300 Pixel großen Ausschnitts einer auf Orbit 143 in

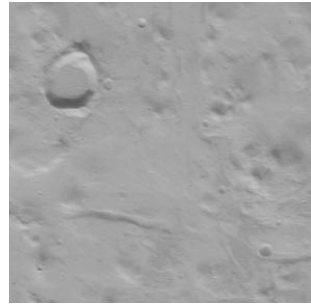


Abb. 6: Orthophoto einer HRSC-Szene

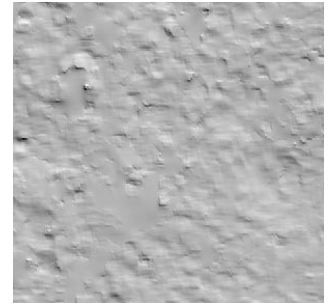


Abb. 7: Radianzbild des a-priori-DGMs der Standardverarbeitung bei Originalbeleuchtung

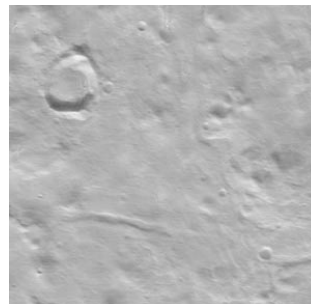


Abb. 8: Radianzbild des mittels SFS verfeinerten DGMs bei Originalbeleuchtung

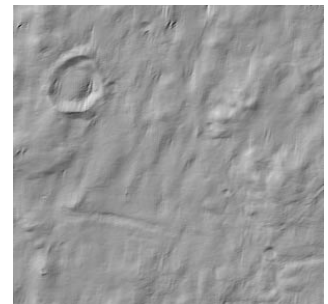


Abb. 9: Radianzbild des mittels SFS verfeinerten DGMs bei Beleuchtung aus NWN

266 km Höhe aufgenommenen HRSC-Szene. Ungefähre Lage ist 137° Länge W und 40° Breite N in den Acheron Fossae auf der nördlichen Flanke des Olympus Mons. Die Beleuchtungsrichtung ist durch 19° SWS Azimut und 48° Sonnenhöhe gegeben. Die Szene, die eine Fläche von 30km auf 30km bedeckt, wurde wegen der niedrigen Qualität des zugehörigen im Rahmen der Standardverarbeitung durch Bildzuordnung erzeugten a-priori-DGMs bewusst gewählt. Normalerweise ist die DGM-Qualität erheblich höher. Abb. 6 stellt das Orthophoto der Szene dar (beachte die Reliefumkehr). Abb. 7 zeigt das mit der realen Beleuchtungsrichtung beleuchtete a-priori-DGM der Standardverarbeitung. Abb. 8 zeigt die Szenenradianz nach Verfeinerung des DGM mittels SFS. Trotz einiger Restartefakte ist Abb. 8 mit Abb. 6 weitgehend identisch, die Verbesserung gegenüber Abb. 7 ist deutlich zu erkennen. Abb. 9 entspricht Abb. 8, allerdings mit einer die Reliefumkehr aufhebenden Beleuchtungsrichtung aus NWN. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse das beträchtliche Verfeinerungspotenzial von SFS für genäherte DGMs.

5 Herstellung von Topographischen Karten

Als kartographisches Hauptprodukt wurde die Topographic Image Map Mars 1:200.000 definiert (Lehmann et al. 1997). Dieses ist das erste großmaßstäbige Kartenwerk, das den Planeten Mars systematisch erfasst. Die Kartenblätter werden aus Digitalen Geländemodellen und farbigen Orthophotomosaiken abgeleitet. Dazu dient das

am Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik der Technischen Universität Berlin entwickelte kartographische Software-System »Planetary Image Mapper« (PIMap), mit dem die Karten weitgehend automatisch erstellt werden können (Gehrke et al. 2005).

5.1 Kartographische Grundlagen

Als Lagebezug für die Kartenherstellung dient ein Rotationsellipsoid, das im Massenzentrum des Planeten gelagert ist. Nach Definition durch die Internationale Astronomische Union (IAU) beträgt die Länge der äquatorialen Halbachse 3396,19 km, die der polaren Halbachse 3376,20 km (Seidelmann et al. 2002). Den internationalen Festlegungen gemäß werden planetozentrische Breiten in Verbindung mit östlich positiv gezählten Längen benutzt. Der Bezugsmeridian ist durch den Krater Airy-0 festgelegt. Als Höhenreferenz auf dem Mars wurde eine Äquipotenzialfläche des Schwerefeldes, das so genannte Areoid (Seidelmann et al. 2002) definiert.

Für die Topographic Image Map Mars 1 : 200.000 wurden flächentreue Abbildungen gewählt. Der größte Teil der Planetenoberfläche, der Bereich zwischen 85° nördlicher und 85° südlicher Breite, wird in der Sinusoidalprojektion kartiert, die polaren Gebiete in der Lambert-schen Flächentreuen Azimutalprojektion. Dabei wird jedes Kartenblatt auf einen eigenen, in der Blattmitte liegenden Meridian bezogen. Aufgrund dieser Projektionsparameter treten in den Kartenblättern nur geringe Verzerrungen auf. Jedes Kartenblatt deckt in der Breite 2° ab. Die Längenausdehnung ist in Äquaturnähe ebenfalls 2°, wird aber der Meridiankonvergenz angepasst und nimmt zu den Polen hin schrittweise bis auf 360° zu. Durch die getroffenen Festlegungen werden alle Kartenblätter etwa gleich groß. Insgesamt wird die Oberfläche des Planeten in 10 372 einzelne Kartenblätter eingeteilt.

Diese Definitionen sind so gewählt, dass bei Bedarf – ähnlich wie im System der amtlichen topographischen Kartenwerke in Deutschland – auch Karten der Maßstäbe 1 : 100.000 und 1 : 50.000 systematisch abgeleitet werden können.

5.2 Kartenherstellung mit PIMap und Beispiel

Das entwickelte Softwaresystem PIMap ist für die Erstellung planetarer Bildkarten konzipiert. Auf der Grundlage von Bilddaten (Orthophotomosaike), Digitalen Geländemodellen sowie zusätzlichen Informationen, z. B. über

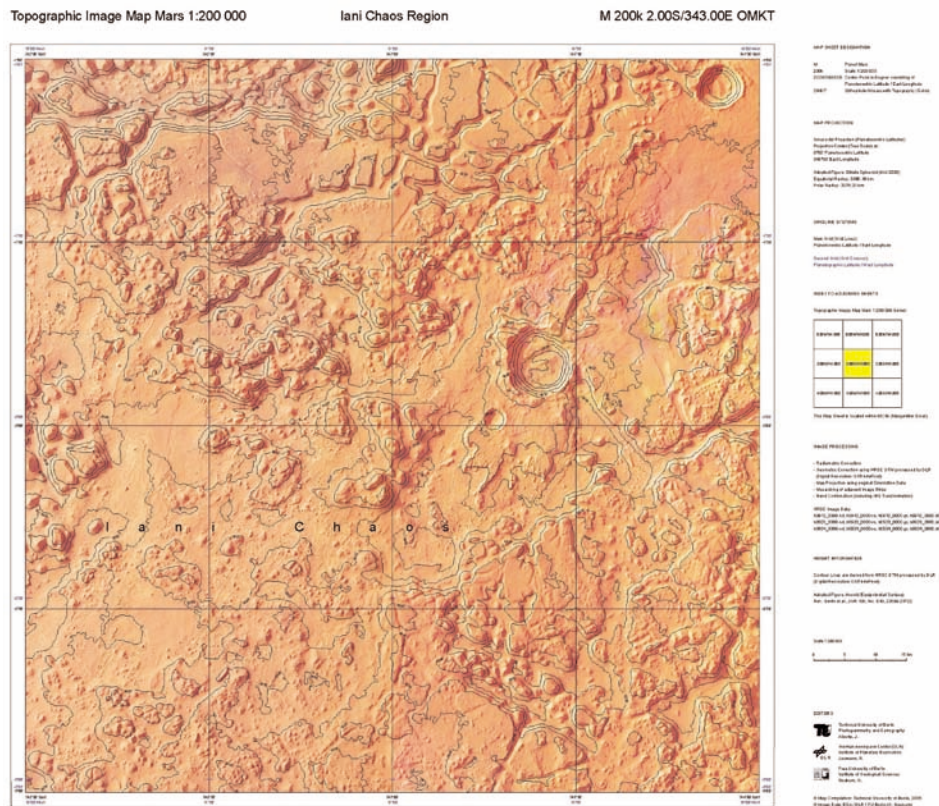


Abb. 10: Ein Beispiel für die Topographic Image Map Mars 1 : 200.000, das Blatt »M 200k 2.00S/343.00E OMKT, Iani Chaos Region«

topographische Namen, lassen sich mit PIMap digitale Kartenprodukte weitgehend automatisch generieren. Dies schließt die Interpolation und automatische Beschriftung von Höhenlinien ein. Ergebnis ist eine PDF-Datei, die sämtliche Vektor- und Rasterdaten dieses Blattes enthält. Besonders wichtig ist die nachträgliche Editierbarkeit der einzelnen Objekte, sodass die automatisch generierte Karte mit kommerzieller Software kontrolliert und falls nötig – z. B. zur optimalen Platzierung topographischer Namen – noch weiter bearbeitet werden kann.

Endprodukte sind Karten in digitaler Form, die in Geoinformationssysteme übernommen oder nach Bedarf gedruckt werden können. Das entstehende Kartenwerk Topographic Image Map Mars 1 : 200.000 bildet auch eine ausgezeichnete Grundlage für thematische Kartierungen, z. B. zur Erarbeitung von geologischen Karten (vgl. Lehmann et al. 2005).

Das Softwaresystem PIMap hat sich bei der Herstellung von einer Reihe von Karten bereits bewährt. Die Abb. 10 zeigt als Beispiel eines der Standardblätter der Topographic Image Map Mars 1 : 200.000.

6 »Echt-3D« für stereoskopische Satellitenbildanalysen

Am Institut für Kartographie der Technischen Universität Dresden wurde eine Visualisierungstechnik anhand von Lentikularfolien entwickelt, die es erlaubt, Reliefinformation mit kontinuierlichen Parallaxen »echt-3D« darzustellen. Diese auf transparenten Folien mit semizylindrischen

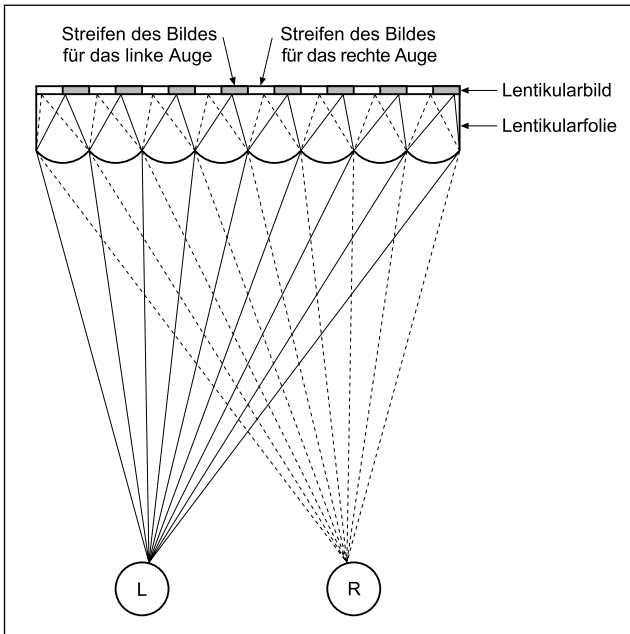


Abb. 11: Prinzip der Wahrnehmung des 3D-Effekts

(tunnelförmigen) Mikrolinsen (lat. *lenticula*) beruhende Technik erlaubt das spontane stereoskopische Betrachten von reliefierten Szenen. Hierbei ist der besondere Vorteil, dass dies mit dem unbewaffneten Auge, d. h. »brillenlos«, und ohne künstliche Beleuchtung funktioniert, und die Betrachtung für mehrere Personen gleichzeitig möglich ist.

Die Herstellung derartiger Displays geschieht durch Drapieren von geokodierter Bildtextur auf vorhandene DGMs und anschließendes Generieren (Simulieren) von Mehrfachstereoaufnahmen mittels einer 3D-Modellierungssoftware. Die so von der virtuellen Landschaft aufgenommenen Stereopartner werden dann in sehr feinen Streifen verschachtelt unter die einzelnen Mikrolinsen gelegt (s. Abb. 11): bei nur zwei Stereopartnern je zwei Streifen, bei sieben ebenso viele, und bei 25 eben 25 Streifen pro Linse. Eine derart große Anzahl von Stereophasen erlaubt auch ein sprunghaftes Betrachten der Szenen aus unterschiedlichen Betrachtungswinkeln in Richtung der x-Parallaxe.

Der Echt-3D-Effekt kann auch mit einem Flip-Effekt (»Wackelbildeffekt«) und sogar mit Animationseffekten kombiniert werden. Eine etwas umfassendere, illustrierte Erläuterung der Technik kann in Buchroithner et al. (2005) nachgelesen werden. Das Titelbild jener Nummer der Zeitschrift *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, in der dieser Beitrag erschienen ist, zielt auch eine echtdreidimensionale, multiskalige Flipdarstellung verschiedener Mars-Bildsensoren, die das Potenzial der entwickelten Methode veranschaulicht.

7 Ausblick

Nachdem die HRSC nunmehr seit ca. 20 Monaten Bild-daten der Marsoberfläche liefert, die zu einer Reihe neuer Erkenntnisse beispielsweise über die Entwicklung des Pla-

neten geführt haben (Neukum et al. 2004b, Hauber et al. 2005, Head et al. 2005, Jaumann et al. 2005, Murray et al. 2005) kann das Experiment in jeder Hinsicht als voller Erfolg eingestuft werden. Die photogrammetrischen und kartographischen Arbeiten haben an diesem Erfolg einen beträchtlichen Anteil, denn niemals zuvor war es den Planetenwissenschaftlern möglich, einen so detaillierten, dreidimensionalen, gleichzeitig aber auch zunehmend vollständigen Blick auf die Marsoberfläche zu werfen.

Neben den in der Standardverarbeitung hergestellten DGMs mit einer Gitterweite von 200 m sind in einzelnen Bereichen automatisch hochgenaue DGMs mit bis zu 50 m (Gwinner et al. 2005) erfolgreich abgeleitet worden. Voraussetzung dafür ist eine photogrammetrische Verarbeitung auf dem neuesten Stand der Technik inklusive der Modellierung aller bekannten Fehlerquellen. Dieses Ergebnis stellt z. B. für geologische Untersuchungen eine wesentliche Verbesserung dar. Das neue, auf mosaikierten, farbigen Orthophotos beruhende Kartenwerk *Topographic Image Map Mars 1:200.000* wird die Grundlage für die künftige Mars-Kartographie bilden. Lebensnahe 3D-Darstellungen bieten zur Erschließung der in den Bilddaten gespeicherten Information gerade für Nicht-geodäten eine wesentliche Erleichterung.

Die Mitglieder der PCWG werden im weiteren Verlauf der Mission bestrebt sein, auch für die noch fehlenden Gegenden der Marsoberfläche hochgenaue und hochauflösende Digitale Geländemodelle, farbige Orthophotomosaiken und topographische Karten zu erstellen.

Dank

Diese Arbeiten sind Teil der ESA Mission HRSC auf Mars Express und werden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) unter den Förderkennzeichen 50QM0101, 50QM0102, 50QM0103, 50QM0104, 50QM0105, 50QM0301 sowie durch die österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (ehemals ASA) unter DOK.-Nr. ASAP-CO-006/04 gefördert.

Die Autoren bedanken sich bei den Kollegen des internationalen Forscher-Teams für die interessanten Kooperationen und Gespräche im Rahmen des HRSC-Experiments.

Literatur

- Albertz, J. et al.: HRSC on Mars Express – Photogrammetric and Cartographic Research, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PE&RS)*, (71) 10, S. 1153–1166, 2005.
- Attwenger, M., Neukum, G. und das HRSC Co-Investigator Team: Klassifikation von HRSC-Objektpunkten zur Generierung hochwertiger Geländemodelle der Marsoberfläche, *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG)*, 5/2005, S. 395–402, 2005.
- Buchroithner, M., Gründemann, T., Kirk, R. L., Habermann, K.: Three in one: Multiscale hardcopy depiction of the Mars surface in true-3D, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PE&RS)*, (71) 10, S. 1105–1108, 2005.
- Dorrer, E. and Zhou, X.: Towards optimal relief representation from mars imagery by combination of DEM and shape from shading, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32 (4), S. 156–161, 1998.
- Dorrer, E., Mayer, H., Ostrovskiy, A., Reznik, S., Neukum, G. and the HRSC Co-Investigator Team: De- and Re-Shading of Mars Express

- HRSC image data for homogenisation of map relief shading, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* (35) B4, S. 1299–1303, 2004.
- Fischler, M.A., Bolles, R.C.: Random Sample Consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Communications of the ACM*, (24) 6, S. 381–395, 1981.
- Förstner, W.: A feature based correspondence algorithm for image matching, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* (26) 3/3, S. 150–166, 1986.
- Gehrke, S., Neukum, G. und das HRSC Co-Investigator Team: Das kartographische Softwarepaket »Planetary Image Mapper« (PIMap), *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* (PFG), 5/2005, S. 417–422, 2005.
- Gwinner, K., Scholten, F., Giese, B., Oberst, J., Jaumann, R., Spiegel, M., Schmidt, R., Neukum, G. und das HRSC Co-Investigator Team: Hochauflösende Digitale Geländemodelle auf der Grundlage von Mars Express HRSC-Daten, *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* (PFG), 5/2005, S. 387–394, 2005.
- Hauber, E. et al.: Discovery of a flank caldera and very young glacial activity at Hecates Tholus, Mars, *Nature*, (434), S. 356–361, 2005.
- Head, J.W. et al.: Tropical to mid-latitude snow and ice accumulation, flow and glaciation on Mars, *Nature*, (434), S. 346–351, 2005.
- Heipke, C., Piechullek, C., Ebner, H.: Simulation studies and practical tests using multi-image shape from shading, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 56, No. 2, S. 139–148, 2001.
- Hofmann, O., Navé, P., Ebner, H.: DPS – A digital photogrammetric system for producing digital elevation models and orthophotos by means of linear array scanner imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* (PE & RS), (50) 8, S. 1135–1142, 1984.
- Horn, B.K.P.: Shape from Shading: A method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view. Dissertation, Dept. of Electrical Engineering, The MIT Press, 1970.
- Jaumann, R. et al.: Interior channels in Martian valleys: Constraints on fluvial erosion by measurements of the Mars Express High Resolution Stereo Camera, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16203, 2005.
- Lehmann, H., Scholten, F., Albertz, J., Wählich, M., Neukum, G.: Mapping a Whole Planet – The New Topographic Image Map Series 1:200,000 for Planet Mars, *Proceedings 18th International Cartographic Conference, Stockholm 1997*, Vol. 3, S. 1471–1478, 1996.
- Lehmann, H., Gehrke, S., Albertz, J., Wählich, M., Neukum, G. und das HRSC Co-Investigator Team: Großmaßstäbige topographische und thematische Mars-Karten, *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* (PFG), 5/2005, S. 423–428, 2005.
- Murray, J. et al.: Evidence from the Mars Express High Resolution Stereo Camera for a frozen sea close to Mars' equator, *Nature*, (434), S. 352–356, 2005.
- NASA, 2003: Mars Global Surveyor Laser Altimeter Mission Experiment Gridded Data Record MGS-M-MOLA-5-MEGDR-L3-V1.0, URL: <http://pds.jpl.nasa.gov/NationalAeronauticsandSpaceAdministrationPlanetaryDataSystem> (Letzter Zugriff: 15. September 2005).
- Neukum, G., Jaumann, R. and the HRSC Co-Investigator Team: HRSC: The High Resolution Stereo Camera of Mars Express, *ESA Special Publications SP-1240*, 2004a.
- Neukum, G. et al.: Recent and episodic volcanic and glacial activity on Mars, *Nature*, (432), S. 971–979, 2004b.
- Neumann, G.A., Lemoine, F.G., Smith, D.E., Zuber, M.T.: The Mars Orbiter Laser Altimeter archive: Final precision experiment data record release and status of radiometry, *Lunar Planetary Science XXXIV, Lunar and Planetary Institute, Houston*, 2003.
- Rajabi, M.A., Blais, J.R.S.: Optimization of DTM Interpolation Using Shape from Shading with Single Satellite Imagery, *The Journal of Supercomputing*, Vol. 28, S. 193–213, 2003.
- Scholten F., Roatsch, T., Gwinner, K., Matz, K.-D., Mertens, V., Flohrer, J., Wählich, M., Giese, B., Pischel, R., Oberst, J., Jaumann, R., Neukum, G. und das HRSC Co-Investigator Team: Von Rohdaten aus dem Mars Express Orbit zu Digitalen Geländemodellen und Orthophotos – Operationelle Verarbeitung von HRSC-Daten, *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* (PFG), 5/2005, S. 365–372, 2005.
- Schenk, T., Krupnik, A.: Ein Verfahren zur hierarchischen Mehrfachzuordnung im Objektraum, *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* (ZPF), 1/1996, S. 2–11, 1996.
- Schmidt, R., Heipke, C., Brandt, R., Neukum, G. und das HRSC Co-Investigator Team: Automatische Bestimmung von Verknüpfungspunkten in HRSC-Bildern der Mars Express Mission, *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* (PFG), 5/2005, S. 373–380, 2005.
- Seidelmann, P.K. et al.: Report of the IAU/IAG Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements of the Planets and Satellites: 2000, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, (82) 1, S. 83–111, 2002.
- Smith, D.E. et al.: Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars, *Journal of Geophysical Research*, (106) E10, S. 23689–23722, 2001.
- Spiegel, M., Stilla, U., Giese, B., Neukum, G. und das HRSC Co-Investigator Team: Bündelausgleichung von HRSC-Bilddaten mit Mars Orbiter Laser Altimeter-Daten als Passinformation, *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* (PFG), 5/2005, S. 381–386, 2005.
- Strunz, G.: Bildorientierung und Objektrekonstruktion mit Punkten, Linien und Flächen, *Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C* (408), München, 1993.
- Tang, L., Heipke, C.: Automatic relative orientation of aerial images, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* (PE & RS), (62) 1, S. 47–55, 1996.
- Zhang, R., Tsai, P.-S., Cryer, J.E., Shah, M.: Shape from Shading: A Survey, *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, Vol. 21, S. 670–706, 1999.

Anschrift der Autoren

Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke | Dipl.-Ing. Ralph Schmidt
 Institut für Photogrammetrie u. GeoInformation, Universität Hannover
 Nienburger Straße 1, 30167 Hannover
 heipke@ipi.uni-hannover.de | schmidt@ipi.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Jörg Albertz | Dipl.-Ing. Stephan Gehrke |
 Dipl.-Ing. Hartmut Lehmann
 Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, Sekr. H 12
 Technische Universität Berlin
 Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin
 albertz@fpk.tu-berlin.de | stephan@fpk.tu-berlin.de |
 hartmut@fpk.tu-berlin.de

Dipl.-Ing. Maria Attwenger | Dipl.-Ing. Dr. Peter Dorninger |
 Gerold Pacher
 Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
 Technische Universität Wien
 Gußhausstraße 27–29, 1040 Wien, Österreich
 ma@ipf.tuwien.ac.at | pdo@ipf.tuwien.ac.at

Prof. Dr. phil. habil. Manfred Buchroithner
 Institut für Kartographie, Technische Universität Dresden
 Helmholzstraße 10, 01069 Dresden
 manfred.buchroithner@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer | Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer |
 Dr.-Math. Alexey Ostrovskiy | Dipl.-Ing. Matthias Rentsch
 Institut für Photogrammetrie und Kartographie
 Universität der Bundeswehr München
 Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg
 egon.dorrer@unibw-muenchen.de

M.A. Dipl.-Geol. Klaus Gwinner | Dipl.-Ing. Frank Scholten
 Institut für Planetenforschung
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
 Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin
 klaus.gwinner@dlr.de | frank.scholten@dlr.de

Dipl.-Ing. Michael Spiegel | Prof. Dr.-Ing. Uwe Stilla
 FG Photogrammetrie und Fernerkundung, Institut für Photo-
 grammetrie und Kartographie, Technische Universität München
 Arcisstraße 21, 80333 München
 spiegel@bv.tu-muenchen.de | stilla@bv.tu-muenchen.de

Prof. Dr. Gerhard Neukum
 Institut für Geologische Wissenschaften, Freie Universität Berlin
 Malteserstraße 74–100, 12249 Berlin
 gneukum@zedat.fu-berlin.de