

## Verbesserung räumlicher Daten durch »Shape-from-Shading«

EGON DORRER, HELMUT MAYER, YVONNE HAASE, ALEXEY OSTROVSKIY, JÖRG RENTER, MATTHIAS RENTSCH, SERGIY REZNIK, München; GERHARD NEUKUM und das HRSC Co-Investigator Team

**Keywords:** photogrammetry, cartography, shape-from-shading, spatial data, planetary mapping, HRSC, Mars

**Zusammenfassung:** Der Artikel ist ein Bericht über Untersuchungen zur Anwendung von *shape-from-shading* (SFS) zur Verbesserung räumlicher Daten, die von der photogrammetrischen Verarbeitung von HRSC-Bilddaten (*High Resolution Stereo Camera*) in ESA's Mars Express Mission stammen. Beschrieben wird der Kern eines Verfahrens zur späteren Modifizierung der beleuchtungsabhängigen Schattierung in HRSC-Bildszenen. Dieser Kern ist eine SFS-Methode, die unter gewissen Voraussetzungen eine distinkte Verfeinerung eines durch Bildzuordnung erzeugten *à-priori*-DGM ermöglicht. Nach einer allgemeinen Beschreibung von SFS im Kontext seiner Einbettung in ein größeres Verarbeitungssystem und der Variations- und Ausgleichsrechnung durch direkte Auflösung des Minimalfunktionalen werden neuere Ergebnisse, die das Potential der Methode zeigen, im Detail diskutiert.

**Summary:** *Improvement of spatial data by means of »Shape-from-Shading«.* The article is an account of investigations into the use of *shape-from-shading* (SFS) for the improvement of spatial data obtained from photogrammetric processing of HRSC ("High Resolution Stereo Scanner Camera") imagery on ESA's Mars Express Mission. Described will be the kernel of a process for modifying illumination induced shades in HRSC image scenes at a later stage. This kernel is an SFS-method which, under certain conditions, enables a distinct refinement of a prior DTM generated by image matching. After a general description of SFS in the context of its embedding in a larger process and the Calculi of Variations and Least Squares Adjustment by directly solving the minimization functional, most recent results, showing the potential of the method, are discussed in some detail.

---

### Einleitung

Der Beitrag behandelt eine im Angelsächsischen mit *Shape-from-Shading* (SFS) (siehe z. B. HORN & BROOKS 1989) bezeichnete Methode (deutsch etwa „Gestalt aus Schattierung“), die sich für texturschwache Oberflächen, wie sie etwa auf dem Mars vorkommen, besonders gut eignet. *Shape-from-Shading* geht auf HORN (1970) zurück und wird hauptsächlich in Mathematik und Theorie orientierten Publikationen behandelt. Einen ausgezeichneten Überblick hierüber vermittelt ZHANG et al. (1999). Echte Anwendun-

gen größeren Stils sind selten, meist noch in Entwicklung und haben in der Planetaren Kartographie relativ spät Eingang gefunden. Während in DORRER et al. (1998) und DORRER et al. (2004) das klassische, auf HORN zurückgehende Einbild-SFS Anwendung findet und im folgenden weiter verfeinert wird, untersuchen HEIPKE et al. (2001) ein Mehrfachbild-Konzept unmittelbar über die Originalbilder und FUA (1997) zusätzlich eine Integration von *Shape-from-Matching* (SFM) in SFS. Die größten Erfahrungen mit SFS für Bilder des Mars dürfte wohl KIRK et al. (2004) vom U.S. Geological

Survey in Flagstaff, Arizona, haben. Wegen des hohen Grades an Komplexität von SFS befinden sich praktisch alle diese Studien noch im Forschungsstadium. Die hier gezeigten Ergebnisse lassen aber das hohe in SFS steckende Potential erahnen.

Die im folgenden erläuterte SFS-Version, die im Rahmen des HRSC-Forscherteams entwickelt wird, ist durch die Tatsache charakterisiert, dass ein mittels Bildzuordnung der Digitalen Photogrammetrie (SFM) generiertes Geländemodell (DGM) als Ausgangsbasis dient, welches durch SFS verfeinert wird. SFS ist dabei als ergänzende Methode zu verstehen, weil sie gerade dort gut funktioniert, wo SFM mangels Kontrast und Textur versagt. Unter gewissen Voraussetzungen, die unten erläutert werden, ist die Verfeinerung bzw. Verbesserung eines DGM durch SFS substantiell. Die Methode beruht im Prinzip auf der Modellierung der in einem Bild dargestellten Helligkeitsverteilung (Schattierung) als Funktion der Geländeneigung, woraus durch Invertierung das DGM abgeleitet werden kann. Da die Reflexionseigenschaften der Oberfläche praktisch nicht bekannt sind, muss man sich mit einem möglichst einfachen Reflexionsgesetz begnügen. Meist nimmt man die Oberfläche als rein diffusen Strahler an, so dass das Lambertsche Kosinusgesetz verwendet werden kann. Für ein Einzelbild repräsentiert das Verfahren mathematisch zwar ein „schlecht gestelltes Problem“, durch Hinzunahme geeigneter Nebenbedingungen lässt sich aber eine der Realität erstaunlich nahe kommende Lösung finden.

## Shape-from-Shading

### Vorverarbeitung

Die aus der Literatur bekannten SFS-Verfahren gehen durchweg von den vereinfachten geometrischen Verhältnissen eines orthographischen Bildes aus. In unserem Ansatz stützen wir uns deshalb von Anfang auf die Existenz von Orthobildern, also von Bilddaten, die auf derselben Geometrie wie die zugehörigen DGMs beruhen. Im Zuge der DGM-Verfeinerung durch SFS muss

dann das Orthobild nachkorrigiert werden, weil es ja ursprünglich vom genäherten à-priori-DGM abstammte.

À-priori-DGM und Orthobild werden von der Datenprozessierungsgruppe am DLR-Institut für Planetenerkundung in Berlin-Adlershof zur Verfügung gestellt. Diese räumlichen Daten sind eng mit der kartographischen Endverarbeitung der Mars-Daten verknüpft. Sie beziehen sich deshalb bereits auf die im Co-I-Team vereinbarte Kartenprojektion, nämlich lokale Sinusoidalprojektionen bis 85° Breite und Azimutalprojektion an den Polen. Da die DGM-Höhen definitionsgemäß aus den sphäroidischen Orthogonalhöhen unverändert übernommen werden, ist die Metrik des Projektionsraums nichteuklidisch. Diese Tatsache ist von Bedeutung, weil die für SFS benötigte Beleuchtungsrichtung – als Vektorfeld („SunX“, „SunY“, „SunZ“) im planetozentrischen Bezugssystem verfügbar gemacht durch die DLR-Gruppe – sich auf das Projektionssystem beziehen muss. Die entsprechenden Umrechnungen werden im Vorfeld von SFS vorgenommen.

Ergänzend zu den (à-priori) DGM-Höhen bekommen wir auch Fehlermaße („acc“), die im Rahmen der photogrammetrischen Vorwärtsschnitte abgeleitet worden sind. Diese Fehlermaße sind maßgebend für das stochastische Modell des Verfahrens. Übersteigen gewisse Fehlerwerte einen bestimmten Schwellwert, oder immer wenn SFM misslungen war, so entsteht ein DGM mit Lücken („gaps“). Da das SFS-Verfahren eine hinreichend glatte à-priori-DGM-Oberfläche verlangt, müssen diese Lücken sinnvoll und unter Beibehaltung der vorgegebenen Höhen interpoliert werden. Bedenkt man, dass typische Mars-Szenen gelegentlich aus mehr als zwei Drittel Lücken bestehen, darüber hinaus auch Ausreißer vorkommen können, ist dies keine triviale Aufgabe.

### Konzept

Das hier verfolgte Konzept von SFS wird in DORRER et al. (2004) beschrieben. Erweiterungen haben sich hinsichtlich der Einbe-

ziehung eines inhomogenen stochastischen Höhenmodells („*acc*“), der Herausfilterung von Schattenflächen sowie der Berechnungen in der Projektionsmetrik ergeben. Methodisch ist SFS ein Problem der Variationsrechnung mit Nebenbedingungen, in welchem die Höhen  $Z$  und ihre partiellen Ableitungen  $(p, q)$  als Unbekannte auftreten. In unserem Ansatz drücken wir die Ableitungen durch Faltungen von  $Z$  mit geeigneten Differenzfiltern aus, so dass sich ein Problem der Kleinsten Quadrate mit  $Z$  als einziger Unbekannter einstellt. Im kontinuierlichen Bereich ist die grundlegende SFS-Gleichung durch das Minimierungsintegral

$$J(Z) = \iint_{\Omega} [M(E - \rho R(p, q))^2 + \lambda Q(Z - Z^{(0)})^2] dX dY \rightarrow \min \quad (1)$$

über eine Szene  $\Omega$  in der  $(X, Y)$ -Ebene definiert.  $Z$  ist dabei die Oberfläche des gesuchten DGM,  $Z^{(0)}$  ist das à-priori-DGM;  $E$  ist die Irradianz (Helligkeit) des gegebenen Orthobildes,  $R$  die modellierte reflektierte Szenenradianz ohne Albedoeinfluss („Reflektanzkarte“ nach HORN 1970),  $Q$  ist ein Höhengewichtsmodell indirekt proportional zum Quadrat von („*acc*“) und  $M$  stellt eine mehr oder weniger automatisch bestimmte Schattenmaske dar, die Schattenflächen herausfiltern soll. Mit dem Faktor  $\lambda$  lässt sich die Signifikanz des Höhenglieds gegenüber dem Irradianzglied empirisch gewichten;  $\rho$  ist ein konstanter Faktor, der die Oberflächenalbedo, d. h. den Reflexionsgrad, beinhaltet und aus

$$\rho = \frac{\iint ER dX dY}{\iint R^2 dX dY} \quad (2)$$

geschätzt werden kann. Nach dem Lambertschen Reflexionsgesetz ergibt sich die zur Bildirradiance  $E$  proportionale ideale Radianz  $R$  in einem Oberflächenpunkt im Projektionssystem aus

$$R = s^\circ \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{n}^\circ \quad (3)$$

mit  $s^\circ$  als Sonneneinheitsvektor,  $\mathbf{n}^\circ$  als Einheitsvektor des Gradienten  $\mathbf{n} = (-p, -q, 1)$  der DGM-Oberfläche und  $\mathbf{G}$  als metrischen Tensor.

Als eine Art einfaches stochastisches Modell trägt das Höhengewichtsmodell  $Q$  den inhomogenen Genauigkeitsverhältnissen der à-priori-Höhen  $Z^{(0)}$  Rechnung und ist dadurch für das SFS-Problem eine „weiche“ Randbedingung. So führt z. B. ein kleiner „*acc*“-Wert, d. h. ein kleiner Höhenfehler, zu einem großen  $Q$ -Wert, so dass der Höhenterm in Gl. (1) dominiert und zu einer nur geringen Variation von  $Z$  führt. Dies entspricht einem „weichen“ Passpunkt. Bei kleinem  $Q$  überwiegt dagegen der Irradianzterm und  $Z$  kann stärker variieren.

Die Minimumsgleichung in diskretisierter Form wird nach der Methode der Konjugierten Gradienten durch Variation von  $Z$  solange iterativ gelöst, bis das Funktional  $J$  minimal geworden ist (DORRER et al. 2004). An einem Standard-PC liefert die derzeitige Version des C-Programms selbst für Szenen der Größe  $2000 \times 2000$  Pixel brauchbare Ergebnisse (d. h. nach etwa 30 Iterationen) innerhalb von 15 Minuten.

Die gegenwärtige Programmversion setzt voraus, dass die Geländeoberfläche einer zu verarbeitende Szene aus Material mit homogenen Reflexionseigenschaften besteht. Im Idealfall bedeutet dies perfekte diffuse Reflexion (Lambert) und konstante Albedo. In der Realität ist aber immer ein gewisser Teil an gerichteter Reflexion vorhanden, so dass im Zuge unserer Entwicklungen andere, kompliziertere Reflexionsgesetze Anwendung finden müssen. Szenen mit distinkt unterschiedlichen Oberflächenmaterialien können derzeit ebenfalls (noch) nicht verarbeitet werden. Darüber hinaus bereiten Schattenflächen noch Probleme, da der Übergang zum Nichtschatten nicht überall eindeutig definiert werden kann.

## Ergebnisse

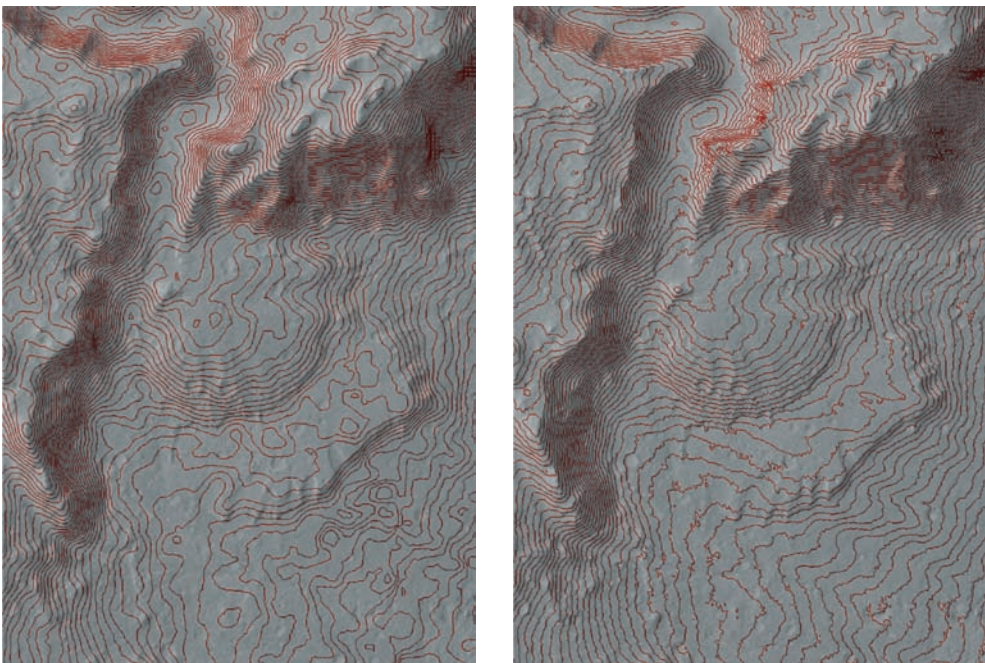
Im Zuge der Entwicklung einer stabilen SFS-Software führen wir laufend experimentelle Tests mit von der DLR-Gruppe vorbereiteten HRSC-Daten durch (siehe voriges Kapitel). Die folgenden Beispiele resultieren aus der gegenwärtigen Programmversion, die weiteren Verfeinerungen und Erweiterungen unterliegt. Die Ergebnisse

bestätigen das Verbesserungspotential von SFS. Die verschiedenen Szenen sind Ausschnitte von den zwei benachbarten Mars-Express-Umlaufbahnen 905 und 927, aufgenommen über der Region Nanedi in Xanthe Terra bei etwa  $50^\circ$  westlicher Länge und zwischen Äquator und  $14^\circ$  nördlicher Breite. Die Topographie ist gekennzeichnet durch eine mit Kratern übersäte, sonst flache, generell nach Norden abfallende Oberfläche, mit mehreren Ausflusskanälen und Tälern. Mit Höhen zwischen 0 und  $-5000$  m liegt sie unterhalb des für Mars vereinbarten Referenzsphäroids. Die vorbereiteten Orthobilder besitzen eine Geländeauflösung von 50 m. Die mittlere Höhengenaugigkeit des  $\hat{a}$ -priori-DGM, das enorme Inhomogenitäten aufweist, liegt bei etwa 70 m.

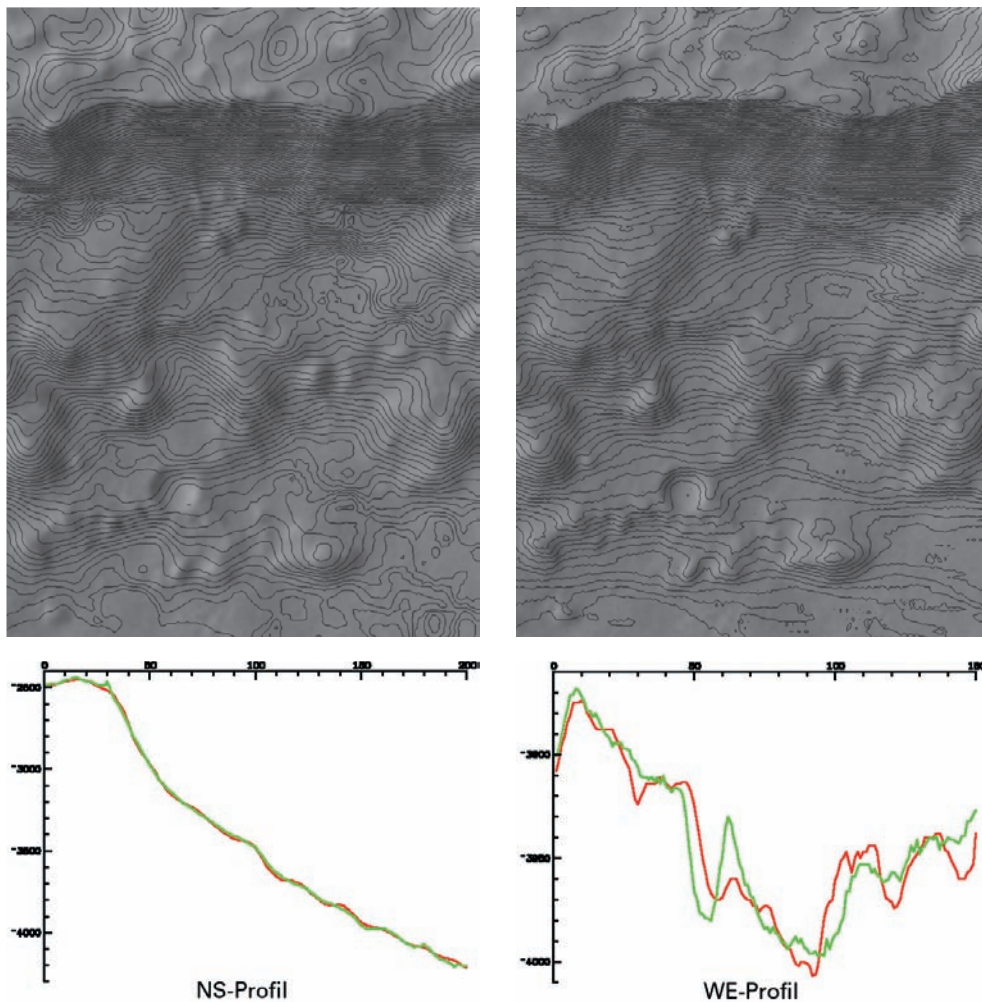
Die Abbildungen sind Kompositionen aus Orthobildern und Höhenlinien, letztere abgeleitet aus den zugehörigen DGMs, und zwar jeweils links dem photogrammetrisch über SFM erhaltenen  $\hat{a}$ -priori-DGM und rechts dem SFS-verfeinerten DGM. Auf diese Weise können die unterschiedlichen

„Höhenlinien-Orthobildkarten“ direkt miteinander verglichen und bewertet werden. Dem Betrachter fällt die gute Anpassung der SFS-verfeinerten Höhenlinien an die über die Reliefschattierung wahrgenommenen Geländetopographie auf. Reliefschattierung und Höhenlinien bilden eine Einheit. Das ist nicht oder nur beschränkt der Fall für die aus dem  $\hat{a}$ -priori-DGM abgeleiteten Höhenlinien. Es dürfte einleuchten, dass das SFS-verfeinerte DGM eine weitaus höhere Detailgenauigkeit aufweist, also topographische und geomorphologische Einzelheiten besser widerspiegelt und somit eine sicherere Interpretierbarkeit bietet.

Abb. 1 zeigt eine Art Schwemmkegel als Zeugnis eines aus dem unmittelbar nördlich gelegenen kanalähnlichen Tal stammenden Ausflusses. Die 20-m-Höhenlinien im linken Bild lassen an vielen Stellen ihre Übereinstimmung mit der Reliefschattierung vermissen, wie z. B. an der unteren Schwemmkegelterrasse oder an den Steilstufen und Kammlinien des Gebirges. Das Höhenlinienbild wirkt darüber hinaus etwas zerfah-



**Abb. 1:** Vergleich von Höhenlinien (20-m-Intervall) zwischen dem  $\hat{a}$ -priori-DGM (links) und dem SFS-verfeinerten DGM. Größe der Szene  $16 \text{ km} \times 11,5 \text{ km}$ , maximale Höhendifferenz 1375 m.



**Abb. 2:** Vergleich von Höhenlinien (20-m-Intervall) zwischen dem  $\hat{a}$ -priori-DGM (links) und dem SFS-verfeinerten DGM. Größe der Szene  $10 \text{ km} \times 7,5 \text{ km}$ , max. Höhendifferenz 1974 m, Pixelgröße 50 m, Beleuchtung aus W. Rot: Profile des  $\hat{a}$ -priori-DGM; grün: Profile des verfeinerten DGM.

ren und, vor allem an flacheren Stellen, erratisch. Im Gegensatz dazu erscheinen die Höhenlinien im rechten Bild erheblich regelmäßiger. Eine solche hohe inhärente Korrelation, die hier durch SFS garantiert wird, ist ein sicheres Zeichen höherer Qualität. Das gesamte Höhenlinienbild passt sich eng der Geländeschattierung an und ist dadurch wesentlich detailgerechter.

Das Orthobild in Abb. 2 stellt einen Ausschnitt aus dem nördlichsten Teil eines knapp 42 km breiten Einschlagkraters dar, dessen Rand bei Höhe  $-1900$  und dessen

Mitte bei Höhe  $-4650$  liegen. Die abgebildete Landschaft lässt den Krater als scharfe Kante erkennen, die sich auch gegenüber dem Ejektmaterial außerhalb des Kraters im Norden klar abhebt. Der Innenrand des Kraters fällt zunächst steil ab, wird aber gen Süden zu, durchsetzt mit chaotischen Abbruchmaterial, flacher. Im unteren Teil erkennt man auch einen kleinen Einschlagkrater mit einem Durchmesser von 780 m. Durch die Mitte dieses Kraters verlaufen auch die beiden, in Abb. 2 gezeigten Profile.

Die über das Orthobild gelegten 20-m-Höhenlinien im linken Teil der Abb. 2 stammen vom à-priori-DGM; sie weisen wiederum eine Reihe von Defiziten auf, hervorgerufen hauptsächlich durch den hohen Grad an Glättung bei SFM. So kommt der scharfe Kraterrand nicht zur Geltung, der kleine Einschlagkrater lässt sich aus den Höhenlinien nicht einmal erahnen und generell scheinen die Linien die über die Reliefschattierung wahrgenommene Oberfläche an vielen Detailstellen zu durchdringen, etc. Demgegenüber bildet das Höhenlinienbild im rechten Teil von Abb. 2 infolge der SFS-Verfeinerung eine nahezu perfekt erscheinende Symbiose mit der Reliefschattierung. Der Kraterrand hebt sich scharf ab (siehe auch das NS-Profil links in Abb. 2), der kleine Krater ist auf Anhieb erkennbar, und an vielen anderen Stellen hat der Betrachter die Gewissheit, Höhenlinien und Schattierung repräsentieren ein- und dasselbe Gelände. Dies bestätigen auch die beiden Höhenprofile. Während im NS-Profil bis auf den abrupten Kraterrand die beiden DGMs im großen Ganzen zusammenzupassen scheinen – bedingt durch den kleinen Höhenmaßstab (Skalenintervall 100 m) –, erkennt man rechts im WE-Profil (Skalenintervall 10 m) gravierendere Detaildifferenzen.

### Danksagung

Die Arbeiten werden vom BMBF unter Kontraktnummer 50QM0102 über das DLR-Projektmanagement unterstützt. Besonderer Dank gebührt den Co-Investigator Team Mitgliedern FRANK SCHOLTEN und KLAUS GWINNER vom DLR-Institut für Planetenerkundung für ihre Ratschläge und selbstlose Hilfe bei der Produktion und Vorbereitung geeigneter Daten für unsere Untersuchungen.

### Literatur

- DORRER, E. & ZHOU, X., 1998: Towards optimal relief representation from Mars imagery by combination of DEM and shape from shading. – *Int. Arch. Phot. & Rem. Sensing* **32** (4): 156–161.
- DORRER, E., MAYER, H., OSTROVSKIY, A., REZNIK, S., NEUKUM, G. and the HRSC Co-Investigator Team, 2004: De- and Re-Shading of Mars Express HRSC image data for homogenisation of map relief shading. – *ISPRS, Vol. XXXV, Part B4*: 1299–1303.
- FUA, P., 1997: From multiple stereo views to multiple 3-D surfaces. – *Int. Journal of Computer Vision* (**24**) 1: 19–35.
- HEIPKE, C., PIECHULLEK, C. & EBNER, H., 2001: Simulation studies and practical tests using multi-image shape from shading. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **56** (2): 139–148.
- HORN, B.K.P., 1970: Shape from Shading: A method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view. – *Diss., Dept. of Electrical Engineering, The MIT Press.*
- HORN, B.K.P. & BROOKS, M.J. (Hrsg.), 1989: Shape from Shading. – 577 S., The MIT Press, Cambridge, Mass., USA.
- KIRK, R.L., SQUYRES, S.W., NEUKUM, G. and the MER Athena and MEX HRSC Science Teams, 2004: Topography mapping of Mars: From hectometre to micrometre scales. – *ISPRS, Vol. XXXV, Part B4*: 834–839.
- ZHANG, R.L., TSAI, P.-S. & CRYER, J.E., 1999: Shape from Shading: A Survey. – *IEEE Trans., PA&MI, Vol. 21*: 670–706.

### Anschriften der Autoren:

- Prof. Dr.-Ing. EGON DORRER  
 Prof. Dr.-Ing. HELMUT MAYER  
 Dipl.-Ing. YVONNE HAASE  
 Dr. math. ALEXEY OSTROVSKIY  
 Dipl.-Ing. JÖRG RENTER  
 Dipl.-Ing. MATTHIAS RENTSCH  
 Dipl.-Ing. SERGIY REZNIK  
 Universität der Bundeswehr München, Institut für Photogrammetrie und Kartographie  
 Werner-Heisenbergweg 39, D-85577 Neubiberg  
 e-mail: egon.dorrer@unibw-muenchen.de
- Prof. Dr. GERHARD NEUKUM  
 Freie Universität Berlin, Institut für Geologische Wissenschaften/Planetologie  
 Maltesserstraße 74–100, D-12249 Berlin  
 e-mail: gneukum@zedat.fu-berlin.de

Manuskript eingereicht: Juni 2005  
 Angenommen: Juli 2005