



Methoden zur Analyse und Visualisierung der Topographie am Beispiel des Planeten Mars

Peter Dorninger ¹

¹ *Technische Universität Wien, Christian Doppler Labor für "Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing" am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.), Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **93** (2), S. 59–71

2005

BibT_EX:

```
@ARTICLE{Dorninger_VGI_200506,  
Title = {Methoden zur Analyse und Visualisierung der Topographie am Beispiel  
des Planeten Mars},  
Author = {Dorninger, Peter},  
Journal = {VGI -- {"0}sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {59--71},  
Number = {2},  
Year = {2005},  
Volume = {93}  
}
```





Methoden zur Analyse und Visualisierung der Topographie am Beispiel des Planeten Mars

Peter Dorninger, Wien

Zusammenfassung

Die *High Resolution Stereo Camera (HRSC)* ist Bestandteil der europäischen Sonde *Mars Express*. Das *Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.)* der *TU Wien* ist durch Prof. Kraus als Co-Investigator an der Projektgruppe „*HRSC on Mars Express*“ beteiligt. Im Rahmen der Vorbereitung der Mission wurden bereits vorhandene Geländedaten der Marsoberfläche untersucht. Zur weiterführenden Analyse und Visualisierung wurden qualitativ hochwertige Geländemodelle abgeleitet. Um in den Datensätzen enthaltene fehlerhafte Messungen aufzufinden, wurde eine Klassifizierungsmethode entwickelt. Diese operiert ähnlich den beim Airborne Laserscanning angewandten hierarchischen, robusten Methoden zur Unterscheidung von Gelände- und Nicht-Geländepunkten. Nach einer kurzen Vorstellung der Ziele derzeitiger Marsmissionen wird diese Methode näher beschrieben. Basierend auf den abgeleiteten Geländemodellen wird die Anwendung rasterbasierter, hydrologischer Analysemethoden erklärt. Die erzielten Ergebnisse unterstützen Geologen und Hydrologen bei der Entschlüsselung der Entstehungsgeschichte von Gebieten, welche in früheren Zeiten möglicherweise durch Oberflächenwasser geformt wurden. Ergebnisse der Anwendung der hydrologischen Analysen in drei verschiedenen Gebieten der Marsoberfläche werden präsentiert. Abschließend wird ein Überblick über die aktuellen, marsrelevanten Forschungstätigkeiten am I.P.F. gegeben. Der Mittelpunkt des Interesses liegt in der Entwicklung einer Methode zur qualitativen Verbesserung von aus HRSC-Punktwolken abgeleiteten Geländemodellen.

Abstract

The *High Resolution Stereo Camera (HRSC)* is part of the European Mission *Mars Express*. The *Institute of Photogrammetry and Remote Sensing (I.P.F.)* at the *Vienna University of Technology* is participating in the project group „*HRSC on Mars Express*“ by Prof. Kraus as Co-Investigator. During the preparation phase of the mission, already available terrain datasets of the Mars surface have been investigated. To derive high quality digital terrain models for further analysis and visualization, a classification method has been developed to detect and eliminate gross erroneous measurements. This method operates similar to the hierarchical, robust methods for classification of Airborne Laserscanning data in terrain and off-terrain points.

After a short description of the aims of current Mars missions, this method is described in detail. Based on the derived terrain models, the application of raster-based, hydrological analysis methods is presented. These methods bear a high potential to support geologists and hydrologists in their investigations of topographic areas which are likely to have been formed by former fluvial processes. Results of the application of this hydrological analysis methods in three different areas are presented.

Finally, an overview on the current Mars related research activities of the I.P.F. concerning the qualitative improvement of Mars terrain models derived from HRSC point clouds is given.

Vorwort zum Karl-Neumaier-Stipendium

Am Anfang sind einige biografische Angaben zu Ing. Dr.techn. h.c. Karl Neumaier angebracht. Er wurde am 12. Januar 1898 in Wien geboren. Er absolvierte in den Jahren 1918 bis 1920 den Kurs für „Heranbildung von Vermessungsgeometern“ an der TH Wien. 1926 war er Assistent an der Lehrkanzel für Katasterwesen. Ab 1929 war Karl Neumaier mit der Einführung der Methoden der Luftbildvermessung für die kartographischen und topographischen Vermessungen in China betraut. Ab 1935 hat er Vorlesungen über Luftbildvermessung an der englischsprachigen Chiao-Tung-Universität in Shanghai gehalten. Nach dem Zweiten Weltkrieg war er Leiter der Gruppe Landesaufnahme am Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV). Am 1.1.1960 wurde Karl Neumaier zum Präsidenten des BEV ernannt.

Anlässlich seines 80. Geburtstages hat das Institut für Photogrammetrie an der TU Wien eine Feier veranstaltet und anschließend daran eine ihm gewidmete Geowissenschaftliche Mitteilung (Heft 13) herausgebracht. Altpräsident F. Eidherr hat bei dieser Gelegenheit folgendes gesagt bzw. geschrieben: „Neumaier bleibt der ewig Junge, weder sein Feuergeist, noch seine jugendliche Seele wurden durch die Jahre gedämpft. Er ist heute noch immer jener zürnende Gottvater, als der er mich und alle seine Mitarbeiter geschreckt hatte, nur dass der Schreck bald verblasste und eine treue Gefolgschaft seine Stelle einnahm. Er stürmte und tobte im Kampf mit der Tücke einer kleinlichen Welt, um neuen Erkenntnissen und dem Fortschritt die Wege zu ebnen.“

1963 trat Karl Neumaier als BEV-Präsident in den Ruhestand, bis 1974 war er noch Leiter des Institutes für Photogrammetrie an der TU Wien. Nach meiner Berufung als Leiter des Institutes im Jahre 1974 kam er mindestens einmal wöchentlich ans Institut, gemeinsam mit einigen Freunden und Kollegen. Diese sogenannte Seniorenrunde

blieb aufrecht bis wenige Monate vor seinem Tod am 21. Mai 1999. Er verstarb also nach 101 Lebensjahren. Zur Abrundung der biografischen Daten soll noch auf das Heft 4 der VGI aus dem Jahre 1997 verwiesen werden.

In den letzten Jahren seines Lebens hat Prof. Neumaier in der Seniorenrunde manchmal angedeutet, dass er auch über sein Leben hinaus das Institut unterstützen möchte. Auf seinen Wunsch hin habe ich auch Richtlinien für die Verwendung etwaiger finanzieller Mittel ausgearbeitet, die er vor seinem Tod noch unterschrieben hat. Das Institut wurde Haupterbe, zusätzlich wurden einige Organisationen und Personen, die ihn in der letzten Zeit seines Lebens betreut haben, beteiligt. Prof. Neumaier's Wunsch folgend werden diese Mittel ausschließlich für Stipendien ausgegeben.

Herr Dr. Peter Dorninger ist der erste Stipendiat. Herr Dorninger hat das Dissertationsthema „A Topographic Mars Information System – Concepts for Management, Analysis and Visualization of Planet-Wide Data“ gewählt. Herr a.o.Univ.Prof. Dr. Josef Jansa war Betreuer der Dissertation. Prof. Neumaier hätte seine Freude an diesem Thema gehabt; er hat nämlich immer über seinen engeren Wirkungsbereich hinaus gedacht und gehandelt.

Das Neumaier-Stipendium ist auf zwei Jahre angelegt. Herr Dorninger hat länger an diesem Thema gearbeitet, da das Institut auch Verpflichtungen gegenüber der Europäischen Weltraumorganisation ESA bezüglich der Verwaltung und Auswertung der Mars-Daten eingegangen ist. Diese zusätzliche Finanzierung ist im Abschnitt 1. des folgenden Beitrages angebeben.

Karl Kraus

1. Einleitung

Mars Express (MEX) ist die erste von der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) geleitete interplanetare Mission mit internationaler Beteiligung beispielsweise aus den USA, Russland und Japan [1]. Das *Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.)* der *Technischen Universität Wien (TU Wien)* ist durch Prof. Kraus als Co-Investigator an *Mars Express* beteiligt. Ein Teil der Finanzierung erfolgte in der Vorbereitungszeit der Mission (2001 bis Dez. 2003) durch das *Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT)* unter der GZ 190.174/2-V/B/10/2000. Seither wird das I.P.F. durch die *Österreichische ForschungsförderungsgesmbH, FFG* (vormals: Austrian Space Agency, ASA) finanziert (DOK.-Nr.: ASAP-CO-005/04).

Im Rahmen dieser Projektbeteiligung wurde die Dissertation „A Topographic Mars Information System – Concepts for Management, Analysis and Visualization of Planet-Wide Data“ verfasst [2]. Die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse dieser Arbeit wurden im Rahmen eines von der *Österreichischen Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation (OVG)* geladenen Vortrages am 14. Dezember 2004 an der TU Wien präsentiert.

Im ersten Teil der Dissertation werden die theoretischen Grundlagen sowie die Umsetzung des *Topographischen Mars Informationssystems (TMIS)* beschrieben und diskutiert. Dieser Teil wird im folgenden Artikel nur kurz erwähnt. Es sei auf [2] und [3] verwiesen. Im zweiten Teil der Dissertation werden Methoden zur Bearbeitung und Analyse topographischer Marsdaten untersucht. Die erzielten Ergebnisse werden ausführlich beschrieben.

Seit Beginn der Mission steht die qualitative Verbesserung von aus HRSC-Bildern abgeleiteten Geländemodellen im Mittelpunkt des Forschungsinteresses am I.P.F. Erste Ergebnisse sind in [4] publiziert und werden am Ende dieses Artikels präsentiert.

2. Die Mission Mars Express

2.1. Der Planet Mars

Seit je her übt der Mars durch seine auffällig rote Erscheinung eine Faszination auf die Menschheit aus. Aufgrund seiner Farbe wurde er meist mit Kriegsgöttern in Verbindung gebracht, was ihm in der griechischen Mythologie den Namen *Ares* einbrachte. Die Römer nannten ihn schließlich *Mars*.

Ausgehend von *Giovanni Schiaparellis* Beobachtung Ende des 19. Jahrhunderts beherrschte nahezu 100 Jahre lang das Bild einer von Flüssen und Vegetation geprägten, „lebendigen“ Marsoberfläche unsere Vorstellung. Erst als 1964 die ersten „Nahaufnahmen“ der Marsoberfläche durch die NASA Sonde *Mariner 5* erfasst und zur Erde übermittelt wurden, offenbarte sich ein neues, eher karg und mondähnlich anmutendes Marsbild. Aktuelle Marsmissionen liefern immer genauere Daten und ermöglichen so, Schritt für Schritt die Entstehungsgeschichte des Mars zu erkunden und darüber hinaus Rückschlüsse auf die Entwicklung der Erde abzuleiten. So hatte der Mars aller Wahrscheinlichkeit nach in früheren Zeiten eine weitaus dichtere Atmosphäre als heute und es soll reißende Flüsse, ja sogar Meere, auf seiner Oberfläche gegeben haben.

2.2. Auf der Suche nach Wasser

An Bord der Sonde *Mars Express* befinden sich sieben wissenschaftliche Instrumente, deren Aufgabe die Erfassung von Geologie, Topographie und Atmosphäre unseres Nachbarplaneten ist. Eine der Hauptaufgaben der Mission besteht darin, den Nachweis zu erbringen, dass es in früheren Zeiten Wasser an oder zu mindest nahe der Marsoberfläche gab oder sogar heute noch gibt. Die Suche nach Wasser am Mars wird aus zwei Gründen mit Nachdruck betrieben:

- Wasser ist eine Grundvoraussetzung für die Entwicklung von Leben wie wir es von der Erde kennen. Gibt es kein Wasser, kann es auch keine „erdähnlichen“ Lebensformen am Mars geben.
- Wasser ist für zukünftige, bemannte Marsmissionen notwendig, um aus dem Wasserstoff Treibstoff für den Rückflug zu gewinnen, weil es aus Effizienzgründen nicht möglich ist, ausreichend Treibstoff für Hin- und Rückflug von der Erde mitzunehmen.

2.3. Hochauflösende Bilder der Marsoberfläche

Die *High Resolution Stereo Camera (HRSC)* wurde am *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)* unter Prof. Gerhard Neukum, *Freie Universität Berlin*, entwickelt. Sie besteht aus einer 9-Zeilenkamera sowie einer Framekamera mit jeweils einem eigenständigen Objektiv. Auf Grund ihrer Anordnung in der Brennebene ermöglichen die unterschiedlichen Zeilen à 5.184 Pixel die Betrachtung eines Oberflächenpunktes aus verschiedenen Blickrichtungen (Schnittwinkel: bis zu 36°) im Zuge eines einzigen Überfluges (im Folgenden als *Orbit* bezeichnet). Dies ermöglicht eine stereoskopische Auswertung der Bilder zur Ableitung digitaler Geländemodelle (DGMe) der Marsoberfläche. Die radiometrische Spezifikation der einzelnen Zeilen ist identisch. Die Vorschaltung von Farbfiltern (rot, grün, blau, NIR) ermöglicht die Erstellung von Echt- und Pseudofarborthophotos der Marsoberfläche. Die maximale Bodenauflösung beträgt rund 12,5 m pro Pixel. Diese ist jedoch abhängig von der momentanen Flughöhe, welche auf Grund des stark elliptischen Orbits zwischen 250 km (Perizentrum) und 11.000 km (Apozentrum) variiert. Die panchromatische Framekamera, auch *Super Resolution Channel (SRC)* genannt, erfasst pro Aufnahme einen Bereich mit 1.024 mal 1.032 Pixel. Die maximale Auflösung beträgt im Perizentrum rund 2 m pro Pixel. Eine detaillierte Spezifikation ist in [5] zu finden.

2.4. Das Topographische Mars Informationssystem

Im Rahmen der Vorbereitung von MEX bestand die Aufgabe des I.P.F. in der Entwicklung des *Topographischen Mars Informationssystems (TMIS)*. Mittlerweile werden etwa 1.500 GB an Bilddaten mit TMIS verwaltet und den beteiligten Forschungsgruppen zur Verfügung gestellt. TMIS stellt somit die zentrale Datendrehscheibe innerhalb der Projektgruppe „*HRSC on Mars Express*“ dar. Topographische Daten wie Originalpunktewolken oder daraus abgeleitete DGMe können ebenfalls verwaltet werden.

In der Dissertation Dorninger [2] werden zunächst Konzepte zur Modellierung und Verwaltung räumlicher Daten unter Berücksichtigung vorhandener Standards und Normen diskutiert. Die Möglichkeiten *Extensible Markup Language (XML)* basierter Formate für Datenhaltung und Datenaustausch raumbezogener Daten sowie deren kartographische Aufbereitung zur Darstellung im Internet werden im Detail untersucht. Derzeitig verfügbare Implementierungen von *Web Map Services (WMS)* liefern meist statische Kartendarstellungen, obwohl seitens der Spezifikation von WMS auch objekt-basierte Ausgabeformate wie z.B. *Scalable Vector Graphics (SVG)* unterstützt werden. Im Rahmen der Entwicklung einer kartenbasierten Benutzerschnittstelle für TMIS wurden die Möglichkeiten von SVG eingehend untersucht. Basierend auf den resultierenden Erkenntnissen werden mögliche Erweiterungen zur Verbesserung der Anwendbarkeit vorhandener XML basierter Formate im Bereich der Geodatenmodellierung und -verwaltung präsentiert. Abschließend wird in [2] der Implementierungsstand von TMIS im Frühjahr 2004 als Anwendungsbeispiel der beschriebenen Konzepte gezeigt.

3. Modellierung der Marsoberfläche

Die folgenden Untersuchungen wurden durchgeführt, bevor *Mars Express* Daten lieferte. Daher wurden Bild- und Topographiedaten, welche im Rahmen der *NASA Mission Mars Global Surveyor (MGS)* erfasst wurden, verwendet [6].

Der Laser Profiler *Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA)* [7] an Bord von *MGS* erfasste in der Zeit von 1997 bis 2001 rund 600 Millionen Einzelpunkte an der Marsoberfläche entlang der Nadirspur der Sonde. Im Folgenden wird eine Methode zur Detektion und anschließenden Elimination grober Datenfehler, welche in den

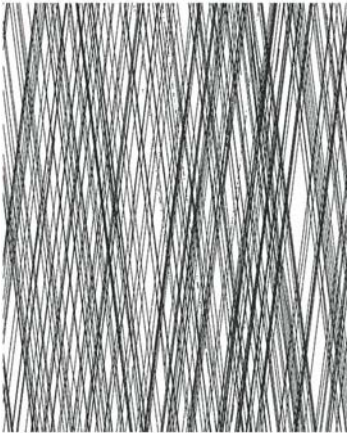


Abb. 1a: Punktdistribution der MOLA-Punkte an der Marsoberfläche.

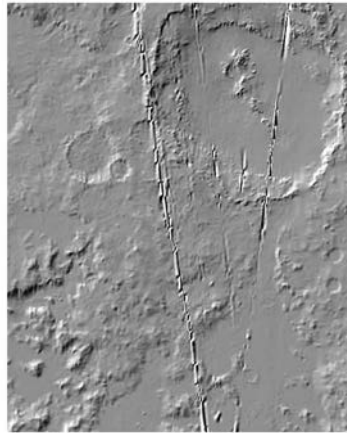


Abb. 1b: DGM Schummerung, abgeleitet aus Originaldaten (enthält grobe Fehler).

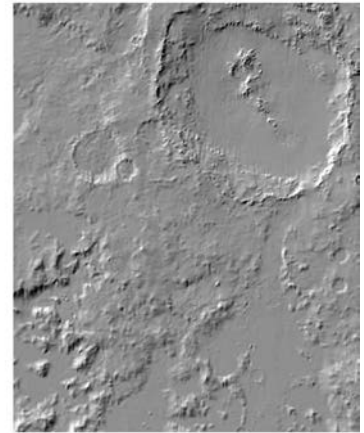


Abb. 1c: DGM Schummerung, abgeleitet aus klassifizierten Daten.

Originalpunkten enthalten sind, vorgestellt. Eine Methode zur Ableitung homogener und von zufälligen Fehlern bereinigter DGMe als Grundlage für weiterführende Analysen wird ebenfalls näher beschrieben.

3.1. Daten

Als Grundlage für die Ableitung hochwertiger Geländemodelle zur weiterführenden Analyse bedarf es möglichst homogen verteilter und von groben Messfehlern bereinigter Stützpunkte. Diesbezüglich warfen die zu diesem Zeitpunkt verfügbaren MOLA-Spurpunkte zwei Probleme auf:

- Es sind fehlerhafte Spuren enthalten, welche in den meisten Fällen durch Referenzierungsfehler der Satellitenbahn verursacht wurden.
- Auf Grund der Aufnahmeanordnung ist die Punktverteilung sehr inhomogen. In Flugrichtung beträgt der mittlere Punktabstand etwa 330 m. Zwischen den einzelnen Spuren gibt es Lücken bis zu mehreren Kilometern.

Die folgenden Abbildungen 1a bis 1c zeigen die Verteilung der Spurpunkte, sowie eine Schräglichtbeleuchtung des DGMs vor und nach der Fehlerelimination.

3.2. Fehlerbereinigung

Zur Detektion und anschließenden Elimination fehlerhafter Punkte wurde zunächst eine hierarchische, robuste Klassifizierungsmethode erprobt. Dieses Verfahren wird bei der DGM-Berechnung aus Airborne Laserscanning-Daten (ALS) zur Klassifizierung der erfassten Punkte in Gelände- und Nicht-Geländepunkte (Gebäude,

Vegetation, ...) angewandt [8]. Es stellte sich heraus, dass so die fehlerhaften Punkte erfolgreich eliminiert werden konnten. Allerdings wurden Strukturelemente der rauen Marsoberfläche ebenfalls eliminiert. Dies liegt darin, dass die auftretende Rauigkeit nicht in das funktionale Modell der Methode passt, welche versucht eine möglichst glatte Oberfläche zu ermitteln. Ein ähnliches Verhalten ist bei ALS in alpinem bzw. rauem Gelände feststellbar.

Daher wurde die Methode modifiziert, sodass an Stelle der Einzelpunkte jeweils die mittleren Fehler mehrerer aufeinanderfolgender Punkte (im Folgenden kurz als Liniensegmente bezeichnet) gegenüber der Referenzfläche verglichen werden. Somit ergibt sich folgender Ablauf:

1. Berechnung eines DGMs mit allen Punkten (Referenzfläche).
2. Bestimmung des RMS aller Liniensegmente (z.B. 500 aufeinanderfolgende Spurpunkte) gegenüber der Referenzfläche.
⇒ Elimination von Liniensegmenten mit zu großem RMS.
3. Berechnung eines DGMs mit den verbleibenden Punkten.
4. Vergleich der zuvor eliminierten Punkte mit dem neuen DGM.
⇒ Akzeptieren von zuvor verworfenen Punkten, wenn sie innerhalb einer vorgegebenen Toleranz liegen
5. Berechnung eines neuen DGMs (neue Referenzfläche für darauffolgende Iteration).

Die Schritte 2 bis 5 werden iterativ, mit kleiner werdender Toleranzgrenze, wiederholt. Dies ist notwendig, um die Robustheit der Methode zu erhöhen, da sehr grobe Ausreißer (bis zu 2000 m!) unmittelbar benachbarte Modellbereiche so stark beeinflussen, dass bei zu kleinen Toleranzen auch korrekte Punkte eliminiert würden (Abb. 2). In den meisten Testgebieten wurden mit drei Iterationen gute Ergebnisse erzielt. Die ersten beiden Grenzen (200 m und 75 m) sind immer anzuwenden. Die kleinste Schranke muss entsprechend der vorherrschenden Rauigkeit angepasst werden und ist im Bereich von 10 bis 25 m (Abb. 3). Für eine vollständige Automatisierung des Verfahrens wäre es notwendig Rauigkeitskarten (z.B. [9]) heranzuziehen. Dies wurde bisher nicht durchgeführt.

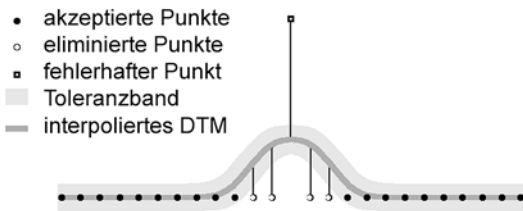


Abb. 2: Beeinflussung des interpolierten DGMs durch einen groben Fehler.

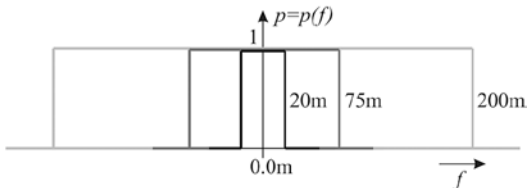


Abb. 3: Symmetrische Rechtecks-Gewichtsfunktionen mit kleiner werdenden Toleranzen (200, 75, 20 m) zur iterativen Klassifizierung der gegebenen Punkte.

3.3. Ableitung von Geländemodellen

Zur Ableitung digitaler Geländemodelle wurde die Interpolationsmethode der Linearen Prädiktion [10], die im Programmpaket SCOP++ verwirklicht ist (<http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/>), herangezogen. Für qualitativ hochwertige Ergebnisse müssen die gegebenen Stützpunkte möglichst homogen verteilt sein. Um diese Voraussetzung zu schaffen, wurden mehrere Ansätze untersucht:

1. *Skalierung* der Daten in Ost-Westrichtung um die Datenlücken zu minimieren;
2. Anwendung *morphologischer Operatoren* in Ost-Westrichtung zur Interpolation von Stützpunkten in den punktlösen Gebieten;

3. Anwendung von *Delaunay Triangulierung* um die punktlösen Gebiete zu überbrücken;
4. Berechnung eines *groben Rasters* um die Datenlücken zu füllen.

Die Ergebnisse der ersten beiden Methoden zeigten starke Artefakte in Ost-Westrichtung, da auf diese Weise ein richtungsabhängiger, systematischer Modellierungsfehler eingebracht wurde. Die Qualität einer *Delaunay Triangulierung* [10] ist ebenfalls stark von der Verteilung der gegebenen Punkte abhängig. Dies führte somit zu sehr vielen kleinen Dreiecken entlang benachbarter Spuren und zu sehr langgezogenen Dreiecken im Bereich von Datenlücken. Das Ergebnis war somit auch sehr inhomogen.

Die plausibelsten Ergebnisse liefert die vierte Methode, die z.B. auch zur Neuberechnung des Österreich-DGMs verwendet wurde [11]. Zunächst wird ein grobes Raster berechnet. Diese Punkte werden anschließend in punktlösen Bereichen als zusätzliche Stützpunkte eingeführt. Zur Bestimmung punktlöser Bereiche wird eine Distanztransformation [12] durchgeführt. Abb. 4 zeigt ein derartiges Ergebnis. Diese Information kann außerdem zur Beurteilung der Qualität des resultierenden Modells herangezogen werden, da so zu jedem ermittelten DGM-Gitterpunkt der Abstand zum nächstgelegenen Stützpunkt angegeben werden kann. Das endgültige DGM wird aus den zuvor als fehlerfrei akzeptierten Stützpunkten sowie aus Punkten des groben Rasters zur Überbrückung stützpunktloser Bereiche berechnet. Abb. 5 zeigt den Arbeitsablauf als Blockdiagramm. Detaillierte Ergebnisse sowie Qualitätsuntersuchungen sind in [2] und [13] beschrieben.

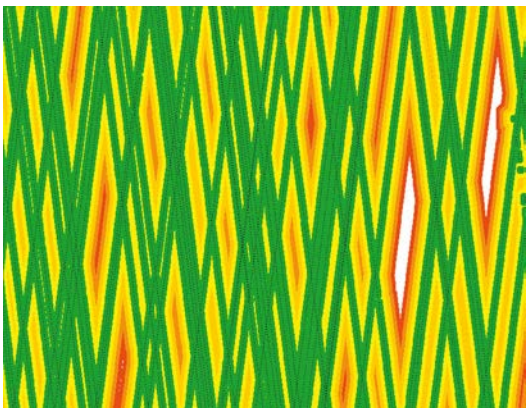


Abb. 4: Ergebnis der Distanztransformation. Schwarze Punkte: Lageverteilung der Stützpunkte. Grün: < 500 m; rot: 2.000 – 2.500 m; weiß: > 2.500 m

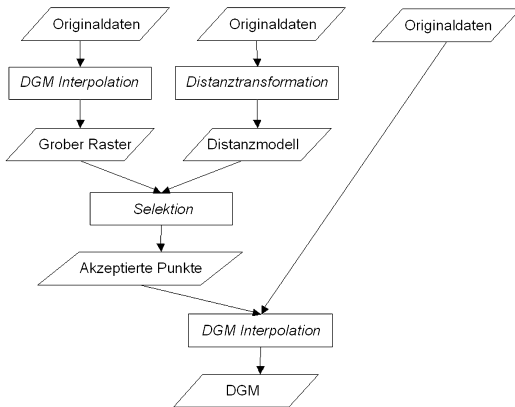


Abb. 5: Arbeitsablauf zur Überbrückung stützpunktloser Bereiche mittels eines groben Rasters.

4. Analyse der Marsoberfläche

Wie bereits in Abschnitt 2.2. erwähnt, sind die meisten gegenwärtigen Marsmissionen darauf ausgerichtet, Wasser bzw. Spuren ehemaliger Wasservorkommen aufzuspüren. Die im Folgenden beschriebenen, geometriebasierten Analysemethoden versuchen an Hand der heute vorherrschenden Topographie mögliche, durch frühere fluviale Prozesse entstandene, Oberflächenstrukturen aufzufinden. Es geht dabei nicht darum, die Arbeit von Geologen und Hydrologen zu übernehmen und endgültige Aussagen zu treffen. Ziel ist es vielmehr, eine rein geometriebasierte Grundlage für weiterführende Interpretationen durch eben diese Forschergruppen zur Verfügung zu stellen.

4.1. Methodik der hydrologischen Analyse

Die verwendete Methode der rasterbasierten, hydrologischen Analyse wurde von Rieger [14] und Gajski [15] entwickelt. Die Anwendung auf Mars-DGMs wurde ebenfalls schon mehrfach publiziert (z.B. [2] oder [13]). Es sei hier dennoch ein kurzer Überblick gegeben:

- Die Methode operiert rasterbasiert. D.h., das zu analysierende Gelände muss als Raster-DGM zur Verfügung gestellt werden.
- Sie ist als systolischer Prozess implementiert. D.h., die Zustände aller Zellen werden synchron ermittelt.
- Nur volle Nachbarn werden berücksichtigt (4er-Nachbarschaft).

- Die Methode besteht aus zwei von einander unabhängigen Schritten:

- Depressionsanalyse: Detektion von lokalen, abflusslosen Gebieten (lokale Minima)
- Abflussanalyse: Repräsentiert die vorherrschende Wassermenge als 2D Wertefeld \Rightarrow ermöglicht die Ableitung von Flusslinien

Somit kann das Ergebnis als „Regensimulation auf eine undurchlässige Oberfläche“ interpretiert werden. Abbruchbedingung ist das Erreichen eines Gleichgewichtszustandes auf der gesamten betrachteten Fläche. An den Modellrändern fließt das Wasser per definitionem ab.

Die Abbildungen 6a bis 6f zeigen farbkodierte Visualisierungen von auf der Marsoberfläche erzielten Ergebnisse dieser Methode. Das untersuchte Gebiet liegt im Bereich der zentralen *Valles Marineris*. Die Ausdehnung beträgt 10° mal 10° (etwa 600 km mal 600 km). Das Gelände wurde mit einer Gitterweite von $1/128^\circ$ (etwa 463 m) aus MOLA Daten abgeleitet. Abb. 6d zeigt eine Farbkodierung des DGMs überlagert mit einem Orthophotomosaik, abgeleitet aus Weitwinkelaufnahmen der *Mars Orbiter Camera (MOC)* [16], ebenfalls ein Instrument von MGS. Das Ergebnis der Abflussanalyse, angewandt auf diesen Bereich zeigt Abb. 6a. Geringe Wassermengen sind hellblau dargestellt und zeigen somit den Verlauf von Wasserscheiden (z.B. Kraterränder, Berggücken, ...). Dunkelblaue Bereiche repräsentieren große Wassermengen und somit potentielle Flussläufe. Abb. 6b zeigt daraus abgeleitete Flussläufe. Entsprechend der auftretenden lokalen Wassermenge wurde diesen vektoriiell definierten Flussläufen eine Breite zugewiesen (Abb. 6e). Eine Weiterentwicklung dieser Methode zur Berücksichtigung zusätzlicher, topographischer Parameter wie lokalem Flussprofil, lokaler Flussneigung und ähnlichem ist derzeit in Arbeit.

Abb. 6c zeigt das Ergebnis der Bestimmung lokaler, abflussloser Gebiete (blaue Bereiche). Eine Vereinigung dieser als Seen interpretierbaren Wasserflächen mit den zuvor ermittelten Flussläufen repräsentiert die heute vorherrschende Marstopographie, bei konstantem „Regen“. Diese Darstellung wurde in Abb. 6f mit der Geländedarstellung überlagert. Der „Tiefeneffekt“ der Wasserflächen wurde durch zusätzliche Überlagerung der Wasserflächen mit der Topographiedarstellung erzielt.

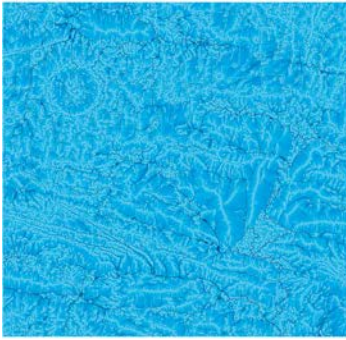


Abb. 6a: Farbkodierte Darstellung der Oberflächenabflussanalyse.



Abb. 6b: Extrahierte Flusslinien.

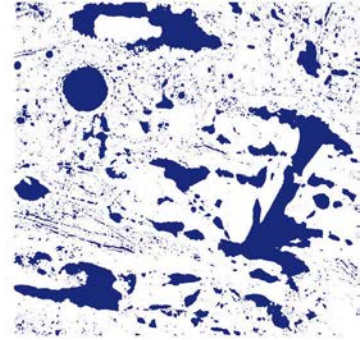


Abb. 6c: Ergebnis der Bestimmung lokaler, abflussloser Gebiete.

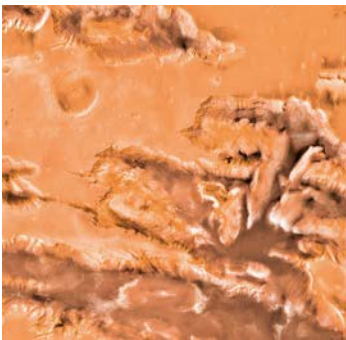


Abb. 6d: 10° x 10° Ausschnitt im Bereich der zentralen Valles Marineris

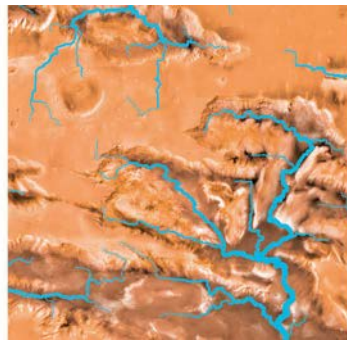


Abb. 6e: Darstellung der Flussläufe; die auftretende Wassermenge wurde als Flussbreite abgebildet.

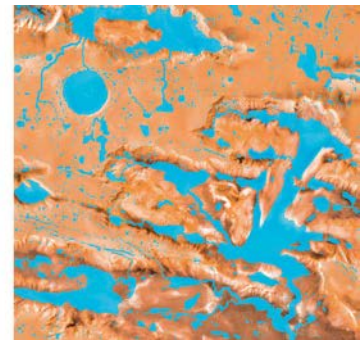


Abb. 6f: Darstellung des Testgebietes bei homogenem „Regen“.

4.2. Anwendungsbeispiele

Mit Hilfe der zuvor beschriebenen Methode wurden drei geologisch unterschiedliche Regionen untersucht. Daraus wurden folgende Ergebnisse abgeleitet:

- Hydrologische Kartierung im Bereich der Tharsis Region und der Valles Marineris
- Abflusskanaldetektion in der Elysium Region
- Wasserspiegelsimulation im Bereich des Ma'adim Vallis und des Gusev Kraters

4.2.1. Hydrologische Kartierung

Das bearbeitete Gebiet hat eine Ausdehnung von rund 34 Millionen Quadratkilometern (8.700 km mal 3.900 km). Es erstreckt sich in Ost-Westrichtung von der Tharsis Hochebene mit ihren markanten Schildvulkanen – darunter der Olympus Mons, der höchste Berg unseres Sonnensystems mit einer relativen Höhe von rd. 21 km gegenüber seiner Umgebung – von 203° östlicher Länge über die gesamte Fläche der

Valles Marineris bis zu einer östlichen Länge von 348°. Die Nord-Südausdehnung beträgt 66° (44° nördl. bis – 22° südl. Breite). Die orthometrischen Höhen betragen zwischen – 6.100 und + 21.200 Meter.

Als Grundlage diente ein DGM, welches gemäß der in Abschnitt 3. beschriebenen Methode aus den Original-MOLA-Spurpunkten abgeleitet wurde (1/128° Auflösung, rd. 160 Mio. Punkte). Als Farbinformation dient eine Höhenkodierung des DGMs. Zur Erhöhung der visuellen Aussagekraft wurde zusätzlich ein Orthophotomosaik, das aus MOC-Weitwinkelaufnahmen erstellt wurde, in die Höhenkodierung eingerechnet. Die Mosaikierung der Originalbilder erfolgte am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin [17]. Die Geländedarstellung wurde gemeinsam mit abgeleiteten Flussläufen sowie lokaler abflussloser Gebiete kartographisch aufbereitet. Die Karte ist in Abb. 7 dargestellt. Der kartierte Ausschnitt hat im Original eine Ausdehnung von 18.560 mal 8.448 Pixel.

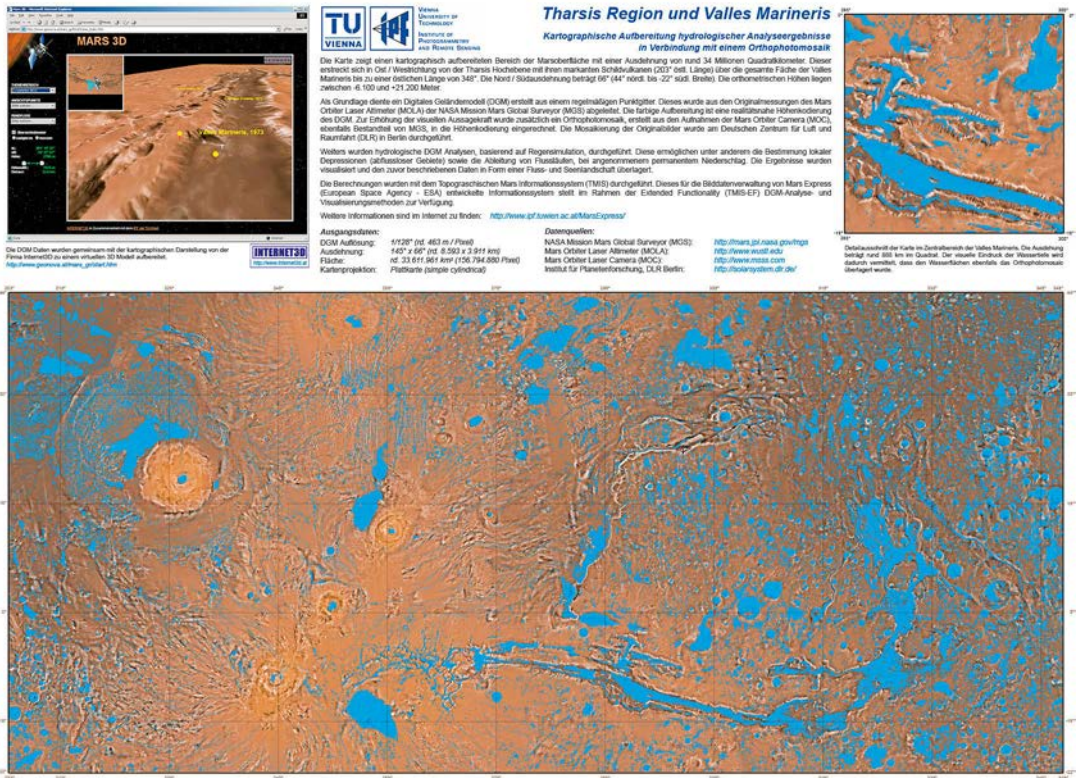


Abb. 7: Hydrologische Kartierung im Bereich der Tharsis Region und der Valles Marineris (stark verkleinert).

Die Ergebnisse der Depressionsanalyse im Bereich der zentralen *Valles Marineris* unterscheiden sich von den in den Abbildungen 6 gezeigten, da die Methode als Randbedingung so definiert ist, dass lokale Wasservorkommen am Rand des DGMs abfließen. Verschieden definierte Grenzen in den beiden Testgebieten führen daher zu unterschiedlichen Resultaten. D.h. um in einem lokal begrenzten Gebiet ein plausibles Ergebnis erzielen zu können, muss das untersuchte Gelände entsprechend größer gewählt werden.

4.2.2. Auffinden von Abflusskanälen

Elysium Planitia ist das zweitgrößte vulkanische Gebiet an der Marsoberfläche. Es gibt verschiedene Theorien, wie die Abflusskanäle im Bereich des *Marte Vallis*, welches aus der südlich der *Elysium* Vulkane gelegenen Ebene *Cerberus Plain* zur *Amazonis Planitia* führt, entstanden sein könnten. Allen Theorien ist gemein, dass sie aus einer Abfolge von vulkanischer Aktivität gefolgt von Wasserabfluss entstanden sein dürften (z.B.: [18]).

Das Ergebnis der Depressionsanalyse in diesem Gebiet ist eine Vielzahl kleiner, richtungsabhängiger, lokaler Depressionen (Abb. 8a). Diese beschreiben offensichtlich ein zusammenhängendes, flussartiges Gebiet. Durch die Anwendung des morphologischen Schließoperators, können benachbarte Gebiete verbunden werden. Ein anschließendes Öffnen sowie die Selektion des zusammenhängenden Flusslaufes liefert das in Abb. 8b dargestellte Ergebnis. Abb. 8c zeigt die extrahierte Grenze des möglichen Flusslaufes. Abb. 8d zeigt eine höhenkodierte Darstellung eines simulierten Wasserspiegels (die verwendete Methode wird im folgenden Abschnitt 4.2.3. näher beschrieben). Man sieht, dass die Grenzen des simulierten Wasserspiegels nahezu dekongungsgleich mit den zuvor semi-automatisch bestimmten Flussgrenzen sind.

Das Ergebnis scheint die Theorien über die Entstehungsgeschichte der Abflusskanäle zu bestätigen. Allerdings ist der Grund für das „eigenwillige“ Verhalten der Depressionsanalyse in der numerischen Genauigkeit der verfügbaren Daten zu suchen. Es wurden hier nicht die oben

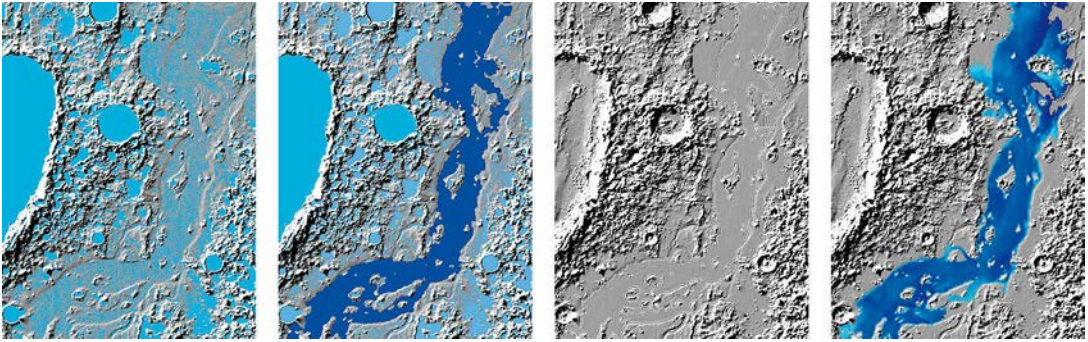


Abb. 8a: Ergebnis der Depressionsanalyse im Bereich des Marte Vallis.

Abb. 8b: Anwendung von morphologischem Schließen, Öffnen und einer Selektion.

Abb. 8c: Extraktion der Begrenzungslinie.

Abb. 8d: Simulierter Wasserspiegel.

genannten Originalspurdaten verwendet. Neumann et. al [19] stellen neben diesen Originaldaten auch ein abgeleitetes DGM mit einer Gitterweite von $1/128^\circ$ (entspricht 463 m am Äquator) zur Verfügung. Vor der Berechnung dieses Gitters wurden die Vertikalabstände sich überschneidender Spuren in einem globalen Ausgleichsprozess minimiert. Die innere Genauigkeit beträgt rund 1,4 m (mittlerer Abstand sich überschneidender Spuren). Da der untersuchte Bereich extrem flach ist ($\Delta H = 180$ m auf 600 km = Länge des *Marte Vallis*) und die Gitterdaten auf Meter gerundet zur Verfügung stehen, haben stets mehrere benachbarte Gitterelemente die selbe Höhe. Daraus ergibt sich ein terrassenförmiges Geländemodell und jede Terasse wird durch eine Depression repräsentiert. Somit kann in diesem Fall das Ergebnis der Depressionsanalyse auch als Rauheitsanalyse interpretiert werden.

4.2.3. Wasserspiegelsimulation

Ma'adim Vallis ist das längste Tal an der Marsoberfläche (Länge: 950 km, Breite: bis zu 25 km). Auf seinem Weg in Richtung *Aeolis Region* überwindet es den *Gusev Krater* (Durchmesser: 150 km, Tiefe: 1,6 km), welcher durch die Landung des *Mars Exploration Rovers (MER)* im Januar 2004 ins Interesse der Medien gerückt ist [20]. Die Entstehungsgeschichte des *Ma'adim Vallis* wird ebenfalls auf Oberflächenwasser zurückgeführt. Im Gegensatz zum *Marte Vallis* scheint es sich in diesem Fall um größere Vorkommen von Oberflächenwasser zu handeln, welches über einen längeren Zeitraum den Flussverlauf geformt zu haben scheint [21]. Abb. 9a zeigt eine Überlagerung aus Farbkodierung und Schummerung des Gebietes.

Der in Abb. 9c dargestellte Wasserspiegel wurde mit zwei unterschiedlichen hydrologischen Analyse- bzw. Modellierungsverfahren ermittelt:

- Der Wasserspiegel im Bereich des Tales wurde dadurch definiert, dass im Flussoberlauf, welcher auch einige Zuflüsse aufweist, die Wassermenge kontinuierlich zunimmt (Abb. 9b, Profile 1 – 6). Von Profil 6 bis zum Krater bleibt die Wassermenge konstant. Aus den in den angegebenen Profilen definierten Wasserpegeln wurde mittels morphologischer Modellierung [22] eine geschlossene Wasseroberfläche modelliert. Eine Verschneidung dieser Oberfläche mit dem DGM liefert somit ein Modell des Wasserkörpers. Dieses wurde farbkodiert und in Abb. 9c dem DGM überlagert dargestellt.
- Der Wasserspiegel im Bereich des Gusevkraters wurde mittels Depressionsanalyse definiert und ist somit im gesamten Kraterbereich konstant. So konnten nahezu drei gleich hoch gelegene Abflusspunkte im nördlichen Bereich des Kraterrandes bestimmt werden ($\Delta H = \pm 30$ m).

Bei irdischen Anwendungen wird im Bereich der Wasserkörpermodellierung umgekehrt vorgegangen: Zunächst werden Flussprofile gemessen. Diese werden dann mittels der beschriebenen, morphologischen Operatoren verdichtet um das Flussbett zu beschreiben. Der Flusskörper ergibt sich somit aus der Differenz eines interpolierten Flussbettes mit einem wohldefinierten Wasserspiegel. Bei der Anwendung im *Ma'adim Vallis* war die Topographie des Flussbettes genau definiert und daraus wurde ein simulierter Wasserspiegel abgeleitet. Der gewählte Ansatz zur Definition des Wasserspiegels ist sehr einfach. Selbstverständlich können auch komplexere

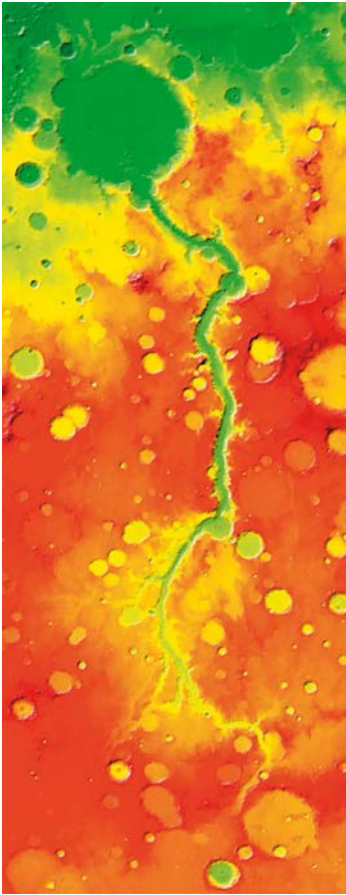


Abb. 9a: Höhenkodierung überlagert mit einer Schummerung des Bereiches Ma'adim Vallis und Gusev Krater.

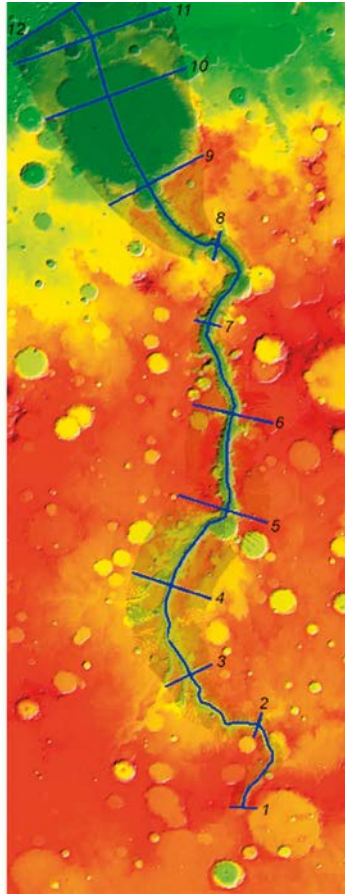


Abb. 9b: Definition des Flusslaufes und von 11 Wasserpegeln (blau). Die Querprofile wurden in dem grau schattierten Bereich verdichtet und definieren so einen geschlossenen Wasserspiegel.

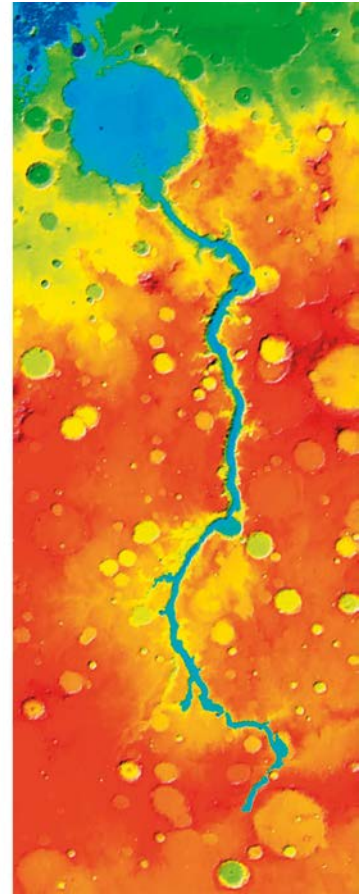


Abb. 9c: Überlagerung des DGMs mit dem höhenkodierten Wassermodell.

Modelle wie beispielsweise jenes von Cabrol und Grin [23] zur Bestimmung der lokal entlang des Flusslaufes auftretenden Wassermenge berücksichtigt werden. Eine exakte Abbildung der Wassermenge auf die Flusstiefe müsste natürlich auch die lokale Topographie wie etwa Flussquerprofil, Fließgeschwindigkeit (z.B. abhängig von der Flussneigung) und vieles mehr berücksichtigen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die *High Resolution Stereo Camera (HRSC)* hat seit Januar 2004 rund 4500 Bilder der Marsoberfläche zur Erde übertragen. Das Datenvolumen

welches mit dem *Topographischen Mars Informationssystem (TMIS)* derzeit verwaltet wird beträgt rund 1.500 GB.

Neben der Entwicklung von TMIS wurden in der Vorbereitungsphase der *Mars Express* Mission aus bereits vorhandenen Topographiedaten des Mars qualitativ hochwertige Geländemodelle abgeleitet und anschließend analysiert. Die vorgestellte Methode zur Elimination grober Fehler in den untersuchten Datensätzen lässt sich automatisiert auf alle vorhandenen 600 Millionen Messungen anwenden. Allerdings wurde der Originaldatensatz in der Zwischenzeit auch von der verantwortlichen Forschungsgruppe verbessert [19], wodurch dies nicht mehr notwendig war.

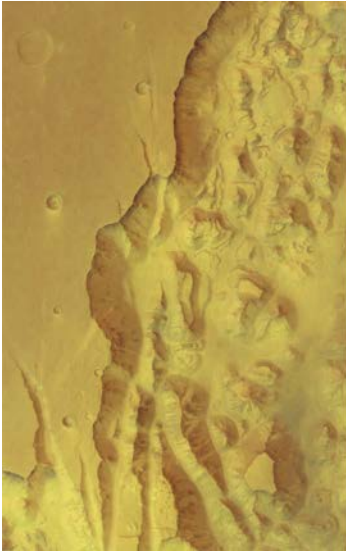


Abb. 10a: HRSC-Farorthophoto des Bereiches Hydraotes Chaos.

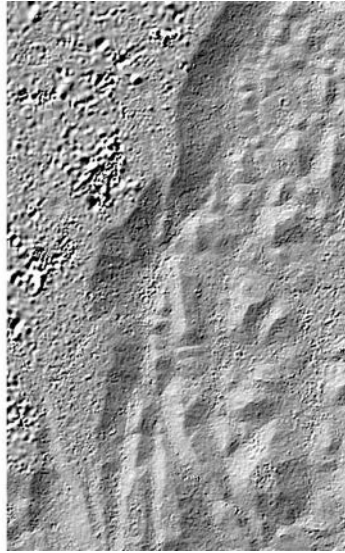


Abb. 10b: Schummerung der Originalpunkt看ke.

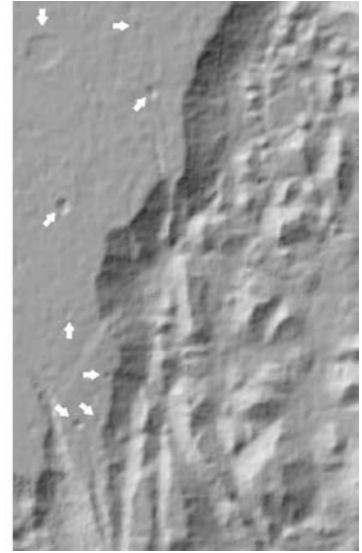


Abb. 10c: Schummerung der klassifizierten Punkt看ke. Die weißen Pfeile markieren Details, welche erst nach der Klassifizierung erkennbar werden.

Die präsentierten hydrologischen Analyseergebnisse wurden mit Geologen und Hydrologen in der Projektgruppe „HRSC on Mars Express“ diskutiert und werden derzeit unter Berücksichtigung von HRSC Bildinformation weiter untersucht. Erste Korrelationen zwischen Bildinterpretation und geometrischer Analyse, beispielsweise im Bereich des Gusev Kraters, bestätigen die Zuverlässigkeit der Ergebnisse.

5.1. Aktuelle Forschungstätigkeiten im Rahmen der Projektbeteiligung

Die aktuellen Tätigkeitsbereiche des I.P.F. im Rahmen der Mars Express Beteiligung sind

- Sicherung und Aufrechterhaltung des Betriebes von TMIS
- Qualitätsverbesserung der aus HRSC Bildern abgeleiteten Geländemodelle

Aus den Stereobildern der HRSC werden mittels flächenbasierter Bildkorrelation Oberflächepunkte bestimmt [24]. Diese Methode zur Objektpunktbestimmung ist allerdings direkt vom Rückstrahlverhalten der Oberfläche (Albedo) abhängig. Dadurch kommt es zum Teil zu einem starken Messrauschen bzw. können in texturlosen Gebieten keine Punkte bestimmt werden. Seit die ersten DGMe aus HRSC Bildern erstellt wurden,

befasst sich Frau Attwenger im Rahmen ihrer Dissertation damit, mittels robuster Punktklassifizierung den Einfluss des Messrauschens zu reduzieren. Durch die Fusion von MOLA und HRSC Objektpunkten können überdies punktlöse Gebiete überbrückt werden. Die Abbildungen 10a bis 10c zeigen erste Ergebnisse der Methode, angewandt in der Region *Hydraotes Chaos*, aufgenommen in Orbit 18. Abb. 10a zeigt das RGB-Orthophoto des Testgebietes und Abb. 10b eine Schummerung der vom Matchingalgorithmus erzeugten HRSC Objektpunkt看ke. Abb. 10c zeigt das Ergebnis der Punktklassifizierung. Das störende, hochfrequente Messrauschen konnte zum größten Teil eliminiert werden, wodurch eine Vielzahl von Kleinstrukturen im Modell ersichtlich wird (durch weiße Pfeile markiert). Die Methode ist in [25] ausführlich beschrieben.

Die ursprünglich stark verrauschten Geländemodelle (Abb. 10b) konnten nicht als Grundlage für hydrologische Analysen herangezogen werden. Die Anwendung der Depressionsanalyse auf klassifizierte Punkt看ken scheint jedoch durchaus plausibel. Das in Abb. 11a gezeigte Ergebnis der hydrologischen Analyse, angewandt auf DGM Daten im Bereich des *Hydraotes Chaos* zeigt die Vorzüge der Zusammenführung von HRSC und

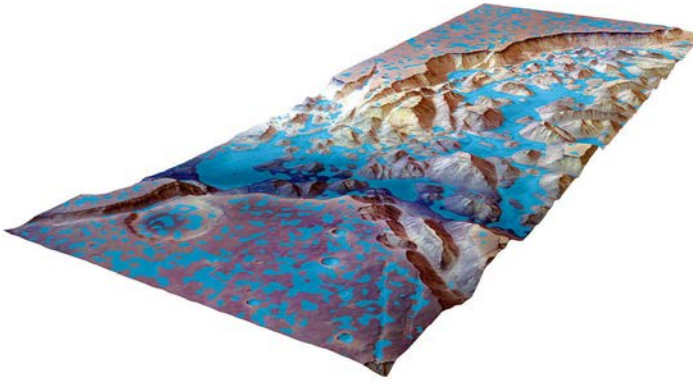


Abb. 11a: Ergebnis der Depressionanalyse, angewandt auf HRSC-DGM-Daten im Bereich des Hydrates Chaos.

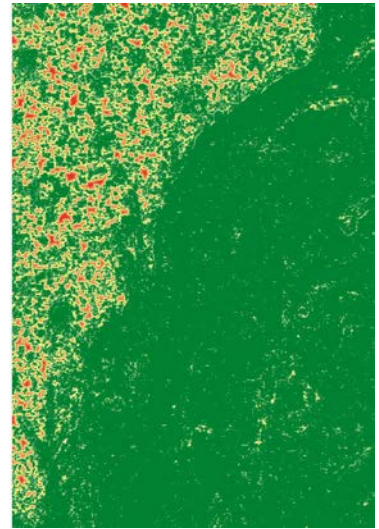


Abb. 11b: Distanzkarte des Testgebietes. Dunkelgrün: Distanz < 100 m; rot: Distanz > 500 m

MOLA Daten. In den stark strukturierten, chaotischen Bereichen (raues Gelände im mittleren Bildbereich) kann der hohe Detaillierungsgrad, welchen das HRSC DGM bietet, voll ausgeschöpft werden. In den sehr glatten und beinahe texturlosen Bereichen im südlichen bzw. nordwestlichen Bildbereich wurden zur Unterstützung des DGMs MOLA Punkte hinzugezogen, um flächendeckende Aussagen treffen zu können. Die Qualität dieses homogen wirkenden Ergebnisses ist natürlich direkt von der Verteilung der Stützpunkte abhängig. Die Erstellung eines „Qualitätslayers“, z.B. in Form einer Distanzkarte (Ergebnis einer Distanztransformation, siehe Abschnitt 3.3.), ist daher unumgänglich. Abb. 11a zeigt das Ergebnis der Depressionsanalyse in Überlagerung mit dem RGB-Orthophoto des Testgebietes. Abb. 11b den zugehörigen Qualitätslayer in Form einer Distanzkarte. Der dargestellte Bereich entspricht der nördlichen Hälfte des Testgebietes.

5.2. Ausblick

Nach mittlerweile zwei Jahren operationellem Betrieb ist die Entwicklungsarbeit am TMIS weitgehend abgeschlossen und es gilt nun den Betrieb zu sichern. Derzeit wird eine Umstellung durchgeführt, so dass auch aus den Bilddaten abgeleitete Geländemodelle verwaltet und den Forschungsgruppen zur Verfügung gestellt werden können. Um die Qualität dieser DGMe zu

verbessern wird auch untersucht, wie sich die zuvor beschriebene HRSC-Punktklassifizierung in eine automatisierte Prozessierungskette eingliedern lässt. Die Integration unterschiedlicher Qualitätslayer zur Gewährleistung der Qualität wird ebenfalls erprobt.

Wie bereits in Abschnitt 4.1. erwähnt, wird derzeit auch die Möglichkeit zur Berücksichtigung weiterer Parameter in Bezug auf die automatische Ableitung von Flussläufen aus Oberflächenabflussanalysen untersucht. Ein weiterer Schritt hinsichtlich der Erweiterung der Anwendungsfelder der vorgestellten, hydrologischen Analysemethoden scheint darin zu bestehen, nicht nur „gleichmäßige“ Beregnungen zu ermöglichen (derzeit werden in jedem Iterationsschritt auf jede Rastereinheit die selbe Regenmenge aufgebracht), sondern beliebige „Beregnungslayer“ zuzulassen. Auf diese Weise können sogar unterschiedliche Aufnahmeeigenschaften des Bodens berücksichtigt werden. Diese Art der Anwendung ist auch für irdische Zwecke von großem Interesse und wird im Rahmen des Christian Doppler Labors für „Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing“ untersucht und weiterentwickelt.

Literatur

- [1] *Batrick, B. (Editor), Redfearn, J. (Text), Haakman, C. (Design) (2001): Mars Express – Europe goes to Mars, European Space Agency, ESA Publications Division, BR-174, The Netherlands, July 2001.*
- [2] *Dorninger, P. (2004): A Topographic Mars Information System – Concepts for Management, Analysis and Visualization of Planet-Wide Data, Dissertation am I.P.F., TU Wien, Juni 2004. <http://www.ub.tuwien.ac.at/diss/AC04223140.pdf>*
- [3] *Dorninger, P. (2005): Das Topographische Mars Informationssystem: Konzept und Realisierung eines Systems zur Verwaltung planetenweiter Bild- und Topographiedaten, Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (PFG), Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V., 5/2005.*
- [4] *Albertz, J., Attwenger, M., Barrett, J., Casley, S., Dorninger, P., Dorner, E., Ebner, H., Gehrke, St., Giese, B., Gwinner, K., Heipke, Ch., Howington-Kraus, E., Kirk, R. L., Lehmann, H., Mayer, H., Muller, J.-P., Oberst, J., Ostrovkiy, A., Renter, J., Reznik, S., Schmidt, R., Scholten, F., Spiegel, M., Stilla, U., Wählisch, M., Neukum, G., and the HRSC Col-Team (2005): HRSC on Mars Express – Photogrammetric and Cartographic Research, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PE&RS), Journal of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), in Druck.*
- [5] *Hoffmann, H., Behnke, Th., Hauber, E., Flohrer, J., Matz, K.-D., Pischel, R., Jaumann, R., Neukum, G. (2003): Science Performance Budget for the HRSC on Mars Express. Doc. No.: HRSC-DLR-BG-9000-010.*
- [6] *Mars Global Surveyor (MGS): Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, USA. <http://mars.jpl.nasa.gov/mgs>*
- [7] *Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA): Science Investigation Site, NASA's Goddard Space Flight Center, USA. <http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/tharsis/mola.html> <http://www.wustl.edu>*
- [8] *Briese, Ch., Pfeifer, N., Dorninger, P. (2002): Applications of the Robust Interpolation for DTM Determination. Symposium of ISPRS Com. III, Graz, September 2002. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Graz, Austria, Vol. XXXIV/3A, S. 55-61.*
- [9] *Kreslavsky, M. A., Head, J. W. (2000): Kilometer-scale roughness of Mars: Results from MOLA data analysis, J. Geophys. Res., 101, 26,695-26,711.*
- [10] *Kraus, K. (2000): Topographische Informationssysteme. Photogrammetrie, Band 3, Dümmler-Verlag, Bonn, 419 Seiten, S. 154-180 (Lineare Prädiktion), S. 72-79 (Delaunay-Triangulation), S. 398-400 (Regensimulation)*
- [11] *Franzen, M., Mandlbauer, G. (2003): Die neue Generation des digitalen Geländemodells von Österreich. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91. Jahrgang (2003), 3; 154 - 162.*
- [12] *Borgefors, G. (1986): Distance transformation in digital images. Computer Vision Graphics Image Processing 34 (3), S. 344-371.*
- [13] *Dorninger, P., Jansa, J., Briese, C. (2004): Visualizations and Analysis of Mars Surface. Planetary Space Journal, Volume 52, Issues 1-3, January-March 2004, S. 249-257.*
- [14] *Rieger, W. (1992): Hydrologische Anwendungen des digitalen Geländemodells. Dissertation an der TU Wien. Geowissenschaftliche Mitteilungen der Studienrichtung Vermessungswesen, Heft 39b, 1992, 95 Seiten.*
- [15] *Gaisky, D. (2005): Rasterbasierte Geländeoberflächenanalysen. Dissertation am I.P.F., TU Wien, Januar 2005.*
- [16] *Mars Orbiter Camera (MOC): Malin Space Science Systems, San Diego, California, USA. <http://www.msss.com/>*
- [17] *Wählisch, M., Niedermaier, G., van Gasselt, S., Scholten, F., Wewel, F., Roatsch, T., Matz, K.-D., Jaumann, R. (2002): A new digital orthoimage map of the Martian western hemisphere using data obtained from the Mars Orbiter Camera at a resolution of 256 pixel/deg. 33rd Lunar and Planetary Science Conference, Houston, TX, März 2002.*
- [18] *Fuller, E., R., Head, J., W. (2001): Volcanism and Sedimentation: Origins of the Smoothest Plains on Mars. GSA Annual Meeting, Paper No. 178-0, 5.-8. November 2001.*
- [19] *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, 34th Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Texas, 17.-21. März 2003.*
- [20] *Grant, J. A., Golombek, M. P., Parker, T. J., Crips, A. J., Squyres, S. W., Weitz, C. M. (2004): Selecting landing sites for the 2003 Mars Exploration Rovers. Planetary and Space Science. Volume 52, Issues 1 – 3, January – March 2004. S. 11-21.*
- [21] *Jaumann, R., Hauber, E., Lanz, J., Hoffmann, H., Neukum, G. (2001): Geomorphological Record of Water-Related Erosion on Mars, in Horneck, G., Baumstark-Khan, Ch. (Editors): Astrobiology: The Quest for the Conditions of Life, Springer Verlag, Köln, 2001, pp. 89-110.*
- [22] *Mandlbauer, G. (2000): Verdichtung von Echolot Querprofilen unter Berücksichtigung der Flussmorphologie. Österreichische Zeitschrift für Vermessung adim Vallis Evolution: Geometry and Models of Discharge Rate. International Journal of Solar System Studies (Icarus), Vol. 132, S. 362-377.*
- [24] *Oberst, J., Roatsch, T., Giese, B., Wählisch, M., Scholten, F., Gwinner, K., Matz, K.-D., Hauber, E., Jaumann, R., Albertz, J., Gehrke, S., Heipke, C., Schmidt, R. Ebner, H., Spiegel, M., vanGasselt, S., Neukum, G., and the HRSC Co-Investigator Team (2004): The Mapping Performance of the HRSC/SRC in Mars Orbit, in Proceedings: XX ISPRS Congress, Commission IV, WG IV/9, 12.-23. Juli 2004, Istanbul, Türkei.*
- [25] *Attwenger, M. (2005): Klassifikation von HRSC Objekten zur Generierung hochwertiger Geländemodelle der Marsoberfläche, Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (PFG), Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V., 5/2005, in Druck.*

Alle angegebenen Hyperlinks wurden am 19. Mai 2005 getestet.

Anschrift des Autors:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Dorninger: Technische Universität Wien, Christian Doppler Labor für „Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing“ am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.), Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien. email: pdo@ipf.tuwien.ac.at